

ФИЗИКА

10

1-бөлім

Жалпы білім беретін мектептің
жаратылыстану-математика бағытындағы
10-сыныбына арналған оқулық

*Қазақстан Республикасы Білім және
ғылым министрлігі бекіткен*



Алматы «Мектеп» 2019

ӘОЖ 373.167.1
КБЖ 22.3я72
Ф49

Авторлар :

Кронгарт Б. А., Қазақбаева Д. М., Имамбеков О., Қыстаубаев Т.

Физика: Жалпы білім беретін мектептің жаратылыстану-математика
Ф49 бағытындағы 10-сыныбына арналған оқулық. 1-бөлім / Б.А.Кронгарт,
Д.М.Қазақбаева, О.Имамбеков, Т.Қыстаубаев — Алматы: Мектеп, 2019. —
280 б.

ISBN 978-601-07-1152-5

Ф $\frac{4306021200-051}{404(05)-19}$ 40(1)-19

ӘОЖ 373.167.1
КБЖ 22.3я72

ISBN 978-601-07-1152-5

© Кронгарт Б. А., Қазақбаева Д. М.,
Имамбеков О., Қыстаубаев Т., 2019
© "Мектеп" баспасы,
көркем безендірілуі, 2019
Барлық құқықтары қорғалған
Басылымның мүлкітік құқықтары
"Мектеп" баспасына тиесілі



I бөлім. МЕХАНИКА

1-тарау. Кинематика

2-тарау . Динамика

3-тарау . Статика

4-тарау . Сақталу заңдары

5-тарау . Сұйықтар мен газдар механикасы

II бөлім. ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ

6-тарау . Газдардың молекулалық-кинетикалық теориясының негіздері

7-тарау . Газ заңдары

8-тарау . Термодинамика негіздері

9-тарау . Сұйық және қатты денелер

АЛҒЫ СӨЗ

Әлемде ерекше ештеңе жоқ,
Ешқандай сиқырлық та,
Тек физика ғана...

Чак Паланик

Құрметті оқушылар! Сендер физиканы, міне, үш жыл бойы оқып келесіңдер. Осы уақыт ішінде физиканың мектеп курсы бойынша барлық бөлімдерін дерлік қамтитын көптеген физикалық құбылыстармен тыныстыңдар. 10-сыныпта білімдерінді тереңдетіп, оларды тәжірибеде қолданудың мықты іргетасын қалау керек. Жаңа материалды оқу барысында оған сын көзбен қарап, құбылыстың немесе заңның физикалық мәнін түсінуге тырысыңдар.

И. Ньютон, Дж. Максвелл, А. Эйнштейн және басқа да әйгілі ғалымдардың еңбектерінің арқасында адамзат ақиқаттың шексіз теңізі жасырынған есікті сәл кеңірек ашып отыр. Дегенмен қоршаған әлемнің біз білмейтін қаншама құпиясы бар!

Әлемнің құпияларын табу өте қиын әрі қызық. Бірақ табиғат заңдылықтарының көркемдігі мен үйлесімділігін ұғынып, сондай-ақ оның құпияларын ашуға тырысып жатқан адамзаттың ақыл-парасатының көлемі мен ұлылығын бағалай алу үшін сендер физика пәнінен қажетті білім алуға тиіссіңдер. Осы білімге жүйелі әрі көп еңбектену арқылы ғана қол жеткізуге болады.

Ұсынылып отырған оқулықтың материалы ондағы көп нәрсені өздерің меңгере алатындай етіп құрылған. Ол үшін әрбір параграфтың басында түйінді сөздер және тақырыпты оқып болғаннан кейін үйренуге тиісті мақсаттар белгіленген. Параграфтың соңында ұсынылған сұрақтарға жауап беру арқылы сендер теориялық материалды қандай деңгейде меңгергендерінді анықтай аласыңдар.

Өздігінен орындауға арналған сын көзқарасты дамытатын және шығармашылық тапсырмалар айдарлары параграфтарда көк сызықпен белгіленген. Әрбір параграф пән бойынша білімдерінді тереңдетуге септігін тигізетін “Шығармашылық шеберхана” тапсырмаларымен аяқталады, онда берілген есептер деңгейге бөлінген: ■ — орта деңгейлі тапсырмалар, * — күрделілігі жоғары тапсырмалар. Олардың арасында физикалық есептерді шешу үшін теориялық білімдерінді қолдана біту дағдыларыңды бекітуге арналған күрделілігі әртүрлі практикалық жаттығулар бар. “Шығармашылық шеберханадан” сендер физикалық құбылыстарды оқу кезінде өздеріңізде бақылағыштықты және шығармашылық тәсілдемені қалыптастыруға және дамытуға көмектесетін жаттығуларды да кездестіре аласыңдар. Кейбір тапсырмалар тәжірибелік және зерттеу жұмыстарын жүргізу дағдыларың игерулеріне бағытталған.

Авторлар осы оқулық пәнді түсінуге және оны жақсы көруге, сонымен қатар, 10-сыныптың физика курсың оқу барысында кездесетін қиындықтарды жеңуге көмектеседі деп үміттенеді.

Авторлар

Қазіргі заманғы физиканың рөлі

Физиканың рөлі туралы сөз болған кезде оның үш негізгі бағыттары баса айтылады. *Біріншіден*, физика адам үшін әлемді қоршаған орта туралы ең маңызды білімнің көзі. *Екіншіден*, физика, адамның мүмкіндігін үздіксіз ұлғайтып және әлдеқайда көбейтіп, оның техникалық прогресс жолында сенімді алға қадам басуын қамтамасыз етеді. *Үшіншіден*, физика адамның рухани келбетін дамытуға елеулі үлесін қосады, мәдени байлықтардың шкаласында бейімделуін оқытып, оның ғылыми көзқарасын қалыптастырады. Сондықтан, физиканың ғылыми, техникалық және гуманитарлық мүмкіндіктері туралы айта аламыз.

Физикада бұл үш бағыт барлық кезде қолданылады. XX ғасырда бірақ олар физикада ерекше айқын және салмақты етіліп көрсетілді және физиканың қазіргі әлемдегі маңызын анықтады.

Физика қоршаған әлем туралы ең маңызды білімнің көзі. Физика материя қозғалысы мен оның қасиеттерінің ең маңызды және жалпылама заңдылықтарын зерттейтіні белгілі. Ол: «қоршаған әлем қалай құрылған; ондағы болып жатқан құбылыстар мен процестер қандай заңдылықтарға бағынады» деген сұрақтарға жауап іздейді. «Ең алғашқы зат» және «құбылыстың ең бірінші себебі» түсініктерін танып біле отырып, физика өзінің даму прогресінде бірінші әлемнің механикалық бейнесін (XVIII—XIX ғғ.), содан кейін электромагниттік бейнесін (XIX екінші жартысында — XX ғ. басында) және сонында әлемнің қазіргі физикалық бейнесін жасады.

XX ғасырдың басында салыстырмалық теориясы — бірінші арнайы, содан кейін жалпысы жасалды. Оны XIX ғасырда жүргізілген үздіксіз зерттеулердің жиынтығының керемет нәтижесі деп қарастыруға болады, бұл классикалық физика құлдырауына әкелді. Салыстырмалық теория туралы айтатын болсақ — ол механиканың, электродинамиканың және гравитацияның бірігуі орын алатын мүлдем жаңа тұжырымдама болып саналады. Олар өзімен бірге кеңістік және уақыт деген жаңа түсініктер алып келді. Бұл идеялардың жиынтығы қандай да бір мағынада XIX ғасырдағы физиканың шыңы мен синтезі болып табылады. Олар классикалық дәстүрлермен органикалық байланысы бар.

Сол кезде ғасырдың басында басталып, ал ғасырдың соңғы бірінші үштігінде жеткілікті түрде қалыптасқан басқа іргелі (фундаментальная) физикалық теория XX ғасырда — кванттық теория құрылды. Егер де салыстырмалық теория физиканың дамуының алдыңғы этапын тиімді аяқтаса, онда кванттық теория адамның материяны тануына жаңа этапты сапалы ашып берді. Кванттық теория — XIX ғасыр физика идеясының ауқымына сыймайтын, зерттелмеген құбылыстар әлеміне қадам басу еді. Атомдар мен молекулалар әлемін, олардың дискретті энергетикалық күш мен спектрлардың сипаттамалық ерекшеліктерін

және химиялық байланыстарын түсіну үшін жаңа ойлау әдістерін қалыптастырды. XX ғасыр физикасы кванттық теорияны қолдана отырып, молекулалар, атомдар, атомның ядросы, элементар бөлшектердің өзара түрленуі кристалдардың қасиеттері мен құрылымына қатысты сұрақтарды түсінуге күшті серпіліс жасады. Физикада қатты денелер, плазмалар, атомдар мен молекулалар, ядролық, элементар бөлшектердің физикасы сияқты жаңа бөлімдер пайда болды.

Физика іргелі заңдылықтардың құбылысын зерттейді; бұл оның жаратылыстану-математикалық ғылымдарының барлық цикліндегі жетекші рөлін алады ала анықтайды. Физиканың жетекші рөлі дәл XX ғасыр ерекше анық байқалады. Оның айқын мысалдардың бірі — химиялық элементтердің периодтық жүйелерін квантты-механикалық көріністермен түсіндіру. Физика мен басқа жаратылыстану ғылымдарының түйісінде жаңа ғылыми пәндер пайда болды. *Химиялық физика* — атомдар мен молекулалардың электрондық құрылымын, химиялық байланыстардың физикалық табиғатын, химиялық реакциялардың кинетикасын зерттейді. *Астрофизика* — ғаламдағы физикалық құбылыстардың алуандығын; спектрлік талдау әдістерін және радиоастрономиялық әдістерін зерттеп кенінен қолданады. *Биофизика* — тірі ағзалардағы физикалық және физика-химиялық құбылыстарды, түрлі физикалық факторлардың тірі ағзаларға әсерін қарастырады.

Физика ғылыми-техникалық прогрестің негізі. XIX ғасырда жылулық құбылыстарды зерттеу жылу қозғалтқыштарының жылдам жетілуіне ықпал етті. Электромагнетизм саласындағы іргелі зерттеулер электромеханиканың пайда болуына және қарқынды дамуына мүмкіндік берді. XIX ғасырдың бірінші жартысында телеграфтар, ғасырдың ортасында электр жарығы және кейін электрқозғалтқыштары пайда болды. XIX ғасырдың екінші жартысында электр тогының химиялық көздері электр генераторларына ауыстырылды. Осы ғасыр үлкен жетістіктермен аяқталды: радио, телефон, бензинмен жүретін қозғалтқышы бар көліктер жасалып, бірнеше қалаларда метро желілері ашылып, авиация қалыптасты.

Сонымен бірге, ғылыми-техникалық прогресте жаңа серпінмен дами бастады. Алдымен вакуумдық электроника (электронды түтіктер, катодты түтіктер), 1950 жылдары жартылай өткізгіш, электроника (1948 жылы транзисторды ойлап тапты), ал 60 жылдары микроэлектроника пайда болды. Электроникадағы прогресс озық радиобайланыс, радиобасқару, радиолокация жүйелерінің құрылуына ықпалын тигізді. Электрондық есептеуіш машиналарының өнімділігі артып, жадысы жақсартылып, функционалдық мүмкіндіктері артқан сайын бірін-бірі ауыстырып жанартып отырды, өнеркәсіптік роботтар пайда болды. 1957 жылы алғашқы Жер серігі Жердің орбитасына шығарылды, 1961

жылы ғаламшардың алғашқы ғарышкері Ю.А. Гагарин ғарышқа ұшып, 1969 жылы алғаш рет адамдар Айға қарай сапар шекті. Ғарышқа ұшып жатқан жасанды Жер серіктерінің саны күннен-күнге артуда, ғарыш аппараттарымен ғарышкерлердің ұшуына, олардың орбиталық станцияларында ұзақ уақыт өткізетініне қазір ешкім таң қалмайды. Ғарыш кемелерінің көмегімен Айдың екінші жағының, Шолпан, Марс, Юпитер, Галлей кометасының фотосуреттерін көре аламыз.

Ядролық физика саласындағы іргелі зерттеулердің өзекті мәселелерінің бірі — энергияның жаңа көздерін табу мәселесін шешуге мүмкіндік береді. Алғашқы ядролық реакторлар 40-жылдарда пайда болды, ал 1954 жылы КСРО-да әлемдегі бірінші атом электрстанциясы іске қосылып, ядролық энергетика мүмкіндіктері пайда болды. Қазіргі уақытта Жер бетінде 450 жуық атом электрстанциясы жұмыс істейді; олар бүкіләлемде шығарылған электр энергиясының шамамен 10% береді. Термоядролық синтез бойынша қарқынды зерттеулер жүргізілді, нәтижесінде термоядролық энергетикаға жол ашылатын.

Лазер сәулесі дәнекерлеу, қысқарту, саңылауларды кеңейту, нығайту және т.с.с. әртүрлі технологиялық операцияларды орындайды, хирургиялық скальпелдің орнына қолданылады, дәлдігі жоғары өлшеулер жүргізеді, аэродромдар құрылыс алаңдарында және ұшу-қону жолақтарындағы жұмыстарды атқарады, ауаның және мұхиттың ластануын бақылайды. Болашақ уақытта лазерлік техника кең ауқымда оптикалық байланыс жүргізуге және ақпаратты оптикалық өңдеуді жүзеге асыруға, химияда химиялық процестерді басқару, жаңа заттарды, өте жоғары дәрежеде тазартылған заттарды алу сияқты революциялық өзгерістерді және басқарылатын термоядролық синтезді жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Физикалық шамалардың қателіктері.

Өлшеу нәтижелерін өңдеу

Зертханалық жұмыстарды орындаған кезде сендер алдымен физикалық тәжірибелердің орындалу ережесімен және мақсатымен танысасыздар. Бұл тәжірибелердің мақсаты — өлшеудің көмегімен қандай да бір физикалық шаманы анықтау. Сонымен қатар өлшенетін шамалардың өлшемдерінің дәлдігі өте маңызды. Алынған нәтижелердің қателігін бағалау — әрбір тәжірибелік жұмыстың ажырамас бөлігі. Сондықтан физика бойынша зертханалық практикумға өлшеу құралдарымен және әдістерімен танысу ғана емес, сондай-ақ әртүрлі өлшеу құралдарының көмегімен өлшеу кезінде пайда болатын қателерді анықтау әдістерін үйренесіндер.

Физикалық өлшеулер. Физикалық өлшеулер *тікелей* және *жанана* болып екі түрге бөлінеді. Тікелей өлшеуге мысал ретінде денелердің

сызықты өлшемдерін сызғышпен, штангенциркульмен, микрометрмен, уақытты секундомермен, электрлік шамаларды (ток, кернеу) сәйкес электрөлшеуіш құралдарымен өлшеуді алуға болады.

Көп жағдайда анықталатын шаманы тікелей өлшеу арқылы алу мүмкін болмайды. Сондықтан анықталатын шаманы анықтауға қажетті басқа шамалармен өлшейді. Мұндай жағдайда тәжірибе жүргізуші алынған басқа шамаларды қолданып, жанама өлшемді белгілі физика заңдары мен математикалық формулалардың көмегімен анықтайды. Жанама өлшемдерге денелердің тығыздығын, дене қозғалысының үдеуін, магнит өрісінің индукциясын өлшеу және т.б. жатады.

Өлшеу кезінде *жүйелік және өрескел қателер* кетуі мүмкін.

Жүйелік қателер көптеген факторлар әсерінен пайда болады, мысалы, электрлік немесе магнит өрісінің құралға әсерінен, құралдың немесе оның бағытты көрсететін құрал тілінің дұрыс орналаспауынан және т.с.с. Мұндай жағдайда құрал тілін түзеткіш (корректор) көмегімен нөлге қою, электрлік өріс әсерін жою нәтижесінде және т.с.с. арқылы жүйелік қателікті жоюға болады.

Өрескел қателер (тәжірибе жүргізушінің ұқыпсыздығынан кеткен қателер) әсерінен өлшеулер кезіндегі тәжірибе нәтижелері өлшеніп отырған шаманың артық мәнінен едәуір ерекшеленеді. Өрескел қателіктер әсерінен алынған нәтижелер есепке алынбайды.

Өлшеулердегі қателіктер. Кез келген өлшеулер шаманы тек белгілі бір шекте дәл өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл өлшейтін құралдардың кемшілігінен, өлшеу әдістерінің нашарлығынан, адамның дұрыс естімей қалуынан, нұсқауды дұрыс байқамауынан және т.б. болады. Сонымен қатар өлшенген шама оның нақты өлшемінен ерекшеленеді. Басқаша айтқанда, өлшеулерді қандай да бір қателіксіз жүргізу мүмкін емес. Көп жағдайда қателіктер едәуір көп болуы мүмкін. Сондықтан тәжірибе жүргізуші берілген шаманы өлшеп қана қоймай, алынған нәтиженің қателігін бағалауы (есептеуі) қажет. Өлшенетін шаманың x мәні келесі түрде жазылады: $x = \Delta x$, мұндағы Δx — абсолют қателік.

Тікелей өлшеулердегі қателердің бағалануы. Өлшеудің нақтылығын арттыру үшін математикалық қателерді мүмкіндігінше жою қажет. Ол үшін әртүрлі тәсілдерді қолдануға болады. Егер қатенің табиғаты белгілі болса және шаманы анықтау мүмкін болса, қажетті түзетулер енгізіледі. Мысалы, өлшеу құралдарының кемшілігімен байланысты (пінді таразы, нөлге келтірілген құрал және т.б.) температура және ауаның қысымы тәрізді факторлардың өлшеу нәтижелеріне әсерін жою. Әрине, мұндай түзетулер өлшеулерінің шамасы басқа да өлшеулердің нәтижесімен бірдей болған жағдайда ғана енгізіледі.

Сондай-ақ арнайы өлшеу әдістерін пайдалана отырып, жүйелік қателіктердің кейбір түрлерін болдырмауға болады. Мысалы, пінді

таразымен денені екі рет өлшеу арқылы, яғни алдымен таразының бір жақ табағына, содан кейін екінші табағына салып өлшеу арқылы қателікті жоюға болады. Жүйелік қателіктерді болдырмаудың басқа да тәсілдері бар. Алайда, жоғарыда айтылғандай, қолданылатын құралдардың кемшілігімен байланысты және де алдын ала болжау мүмкін емес кездейсоқ қателер әрдайым орын алады.

Егер өлшеуіш құрал арқылы алынған қателік кездейсоқ қателіктерден біршама үлкен болса, өлшеу бір-ақ рет орындалады (мысалы, арнайы дайындалған бөлшектің ұзындығын сызғышпен өлшеу). Онда өлшеудің абсолют қателігі құралдың қателігіне тең болады. Керісінше кездейсоқ қатені анықтау керек болса, оның шамасын бірнеше рет өлшеу арқылы азайту қажет. Кездейсоқ қатені бағалау әдісін қарастырайық.

x шамасы n рет тікелей өлшенсін. x_1, x_2, \dots, x_n — жекелей өлшеулер нәтижелері, кездейсоқ қателіктердің бар болуы салдарынан жалпы жағдайда әртүрлі мәнге ие болады. Ықтималдылық теориясынан өлшенген шаманың нақты мәні көптеген өлшеулер кезінде алынған шаманың орта мәніне (кездейсоқ қате болмаған жағдайда) тең болады, яғни $x_{\text{орт}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$. Өлшенген x_n мәндерінің $x_{\text{орт}}$ ауытқуы *өлшемдердің абсолют қателігі* деп аталады: $\Delta x_i = |x_{\text{орт}} - x_i|$, мұндағы $i = 1, \dots, n$.

Қателіктер. Белгілеулер енгізейік: A, B, C, \dots қандай да бір физикалық шамалар болсын. Онда $A_{\text{жұық}}$ — физикалық шаманың жуық мәні, яғни тікелей немесе жанама жолмен алынған мәні; Δ — кез келген физикалық шаманы өлшеудің абсолют қателігі; ΔA — A физикалық шаманың абсолют қателігі; ал ε — салыстырмалы қателік: $\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_{\text{жұық}}} \cdot 100\%$.

Тікелей өлшеудің максимал абсолют қателігі басқа қателіктер болмаған кезде абсолют құралдың қателігі мен есептеудің абсолют қателігінің қосындысына тең: $\Delta A = \Delta A_a + \Delta A_e$, мұндағы ΔA_a — аспаптың құрылымының кемшілігінің әсерінен кеткен қателік, абсолют құралдың қателігі, ΔA_e — есептеудің абсолют қателігі (өлшеу құралдарының жеткілікті түрде дұрыс оқымауы нәтижесінде алынады).

Өлшеудің абсолют қателігінің әдетте жуық мәні алынады ($\Delta A = 0,17 \approx 0,2$); өлшеу нәтижесінің сандық мәні, оның соңғы цифры сол разрядта қалатындай етіп жуықталады ($A = 10,332 \approx 10,3$).

Салыстырмалы қателік. Екі физикалық шамалардың өлшеу нәтижелері $A = 2,5 \pm 0,05$, $B = 0,025 \pm 0,001$ болсын. Бұлардың қайсысы жоғары дәлдікпен өлшенген? $\Delta A = 0,05$ абсолют қателік $\Delta B = 0,001$ -ден 50 есе үлкен екенін байқауға болады. Дегенмен бұл екінші өлшеу жоғары дәлдікпен орындалды дегенді білдірмейді. Өлшеу дәлдігін

$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x}$ салыстырмалы қателік береді. Демек, $\frac{\Delta A}{A} = 0,02$; $\frac{\Delta B}{B} = 0,04$, т.с.с. $\varepsilon_A = 2\%$, ал $\varepsilon_B = 4\%$ т.с.с. бірінші өлшеу дәлірек орындалған.

I бөлім. МЕХАНИКА

1-тарау. КИНЕМАТИКА

§ 1. Кинематиканың негізгі ұғымдары



Тірек ұғымдар: кинематика, радиус-вектор, орын ауыстыру векторы, лездік және орташа жылдамдық, үдеу.

Бүгінгі сабақта: кинематиканың негізгі ұғымдарымен танысасыздар: денелердің ілгерілемелі қозғалысын сипаттауды үйренесіздер.



1.1-сурет



1.2-сурет

Кинематика — денелердің қозғалысын, оларды тудырған себептерді қарастырмай зерделейтін механиканың бөлімі. Бұл бөлімде дене қалай қозғалады деген сұраққа жауап аласыздар, бірақ неліктен дәл солай қозғалады деген сұрақты қарастырмайсыздар.

Механикалық қозғалыс деп дененің немесе оның жеке бөліктерінің уақыт өтуіне қарай санақ денесіне қатысты орнын өзгертуін айтады.

Механикалық қозғалысқа Жер бетіндегі кез келген денелердің қозғалысы, ұшақтардың ұшуы, өзендердің ағысы, ауа массаларының (жел) қозғалысы, жұлдыздардың, кометалардың, метеорлардың, планеталардың, планеталар серіктерінің, астероидтердің қозғалысы т.б. жатады (1.1, 1.2-суреттер).

Санақ денесін таңдап алуына байланысты механикалық қозғалысты сипаттауға және зерттеуге ыңғайлы болады.

Механикалық қозғалысты қалай зерттейді? Ол үшін нені білу қажет?

Кинематиканың негізгі міндеті кеңістіктегі дененің кез келген уақыт мезетіндегі орнын анықтау болып табылады. Ол үшін санақ денесінің ғана болуы жеткіліксіз. Санақ жүйесі қажет.

Санақ жүйесі санақ денесінен, координаталар жүйесінен және уақытты есептейтін құралдан (сағаттан) тұрады.

Бұдан санақ жүйесі мен координаталар жүйесінің бірдей емес екені анық.

Дененің түзу бойындағы, жазықтықтағы немесе кеңістіктегі орнын анықтау үшін нүктенің радиус-векторы ұғымы енгізілген.

Нүктенің радиус-векторы — санақ басын, яғни O нүктесін материялық нүктенің берілген уақыт мезетіндегі орнымен, яғни A нүктесімен қосатын вектор (1.3-сурет).

Материялық нүкте орнының өзгеруімен оның радиус-векторы да өзгереді, яғни радиус-вектор материялық нүктенің орнын “қадағалап” отырады деуге болады. Радиус-вектор график түрінде O координаталар басынан берілген A нүктесіне жүргізілген бағытталған кесіндімен кескінделеді. Радиус-вектордың сандық мәні (модулі) O және A нүктелерінің арасындағы қашықтыққа тең (1.3-сурет).

Таңдап алынған Ox бағыты бойымен материялық нүктенің A орнынан B орнына орын ауыстыру процесін қарастырайық (1.4-сурет):

$$\Delta \vec{s} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad (1.1)$$

шамасы *орын ауыстыру векторы* деп аталады (1.4, 1.5-суреттер).

Орын ауыстыру векторы деп дененің бастапқы және соңғы орындарын қосатын векторды айтамыз.

Ox осіне қатысты орын ауыстыру векторының проекциясына көшу арқылы

$$x = x_0 + s_x \quad (1.2)$$

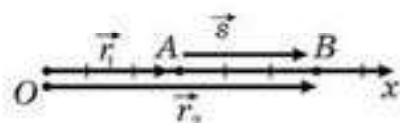
екенін аламыз, мұндағы x және x_0 — дененің бастапқы және соңғы координаталары, s_x — дененің орын ауыстыруының x осіндегі проекциясы. Егер дененің жазықтықтағы қозғалысын қарастырсақ, 1.5-суретте көрсетілген дененің орын ауыстыруындағы s_x және s_y — сәйкесінше Ox және Oy осьтеріндегі орын ауыстыру векторларының проекциялары. 1.5-суреттен көрініп тұрғандай, бұл проекциялардың модульдері

$$s_x = x - x_0 \text{ және } s_y = y - y_0.$$

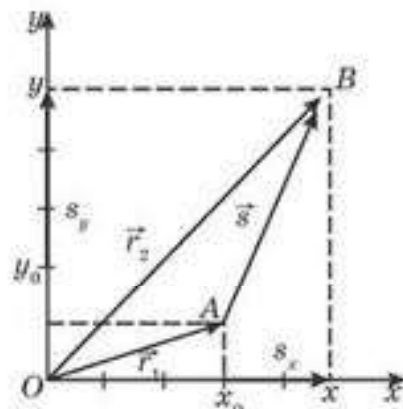
1.5-суреттен $s_y > s_x$, яғни дененің Oy бойымен жасаған орын ауыстыруы оның Ox осі бойымен жасаған проекциясынан артық екенін байқаймыз. Демек, дененің қозғалысы екі немесе бірнеше бағытта өтсе, онда біз қорытқы қозғалысты ғана байқаймыз. Бұл кез келген күрделі қозғалысты бағыттар бойынша құраушыларға, яғни координаталар жүйесінің координаталар осьтері бойынша жіктеуге болатынын білдіреді. Олай болса, қозғалыс



1.3-сурет



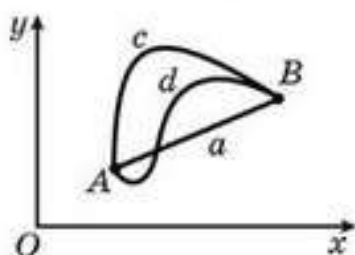
1.4-сурет



1.5-сурет

эртүрлі бағыттар бойынша бір-біріне тәуелсіз өтеді. Осыдан қозғалыстардың тәуелсіздік принципі шығады: берілген санақ жүйесіндегі дененің қозғалыстары бір-біріне ықпал етпейді және бір-бірінен дербес зерделенеді.

Денелердің қозғалысын қарастырған кезде тәуелсіздік принципін қалай қолдануға болады?



1.6-сурет



1.7-сурет

Дене A нүктесінен B нүктесіне AcB немесе AdB немесе AaB сызықтары бойымен орын ауыстыра отырып жетуі мүмкін (1.6-сурет).

Дененің қозғалыс кезінде өткен нүктелерін қосатын сызықты қозғалыс траекториясы деп атайды.

Ұшак пен пойыздың шығу және келу бекеттері бірдей болғанмен, қозғалыс траекториялары эртүрлі (1.7-сурет). Траектория түзу-сызықты және қисықсызықты болуы мүмкін.

Траекторияның ұзындығы жүрілген жол деп аталады және l белгіленеді. Жол — бағыты болмайтын скаляр шама. Ол тек сан мәнімен сипатталады.

Егер дене бір бағытта түзу-сызықты қозғалса, онда жол мен орын ауыстырудың модулі тең. Қозғалыс траекториясы бұл жағдайда — түзу сызық. Баска жағдайларда жол орын ауыстырудан артық болады.

Дене кеңістікте тез немесе баяу қозғала алады. Орын ауыстыру векторының өзгеру

шапшаңдығын сипаттау үшін ерекше физикалық шама — орын ауыстыру жылдамдығы енгізілген.

Орын ауыстыру жылдамдығы уақыт бірлігі ішіндегі дененің орын ауыстыруымен анықталады:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{\Delta t} \quad (1.3)$$

Дененің траектория бойымен қозғалу шапшаңдығын сипаттау үшін жол жылдамдығы деп аталатын физикалық шама енгізілген.

Жол жылдамдығы уақыт бірлігі ішінде дененің жүріп өткен жолымен анықталады:

$$v = \frac{l}{t} \quad (1.4)$$

Берілген уақыт мезетіндегі материялық нүктенің күйін сипаттау үшін лездік жылдамдық ұғымы енгізіледі.

Лездік жылдамдық — берілген уақыт мезетіндегі дененің жылдамдығы .

Дененің қозғалысы кезінде дене жылдамдығының өзгеріп отыратынын есте ұстаған жөн. Жылдамдығы өзгеріп отыратын қозғалысты айнымалы қозғалыс дейді. Айнымалы қозғалысты толық сипаттау үшін және жылдамдықтың өзгеріс заңын анықтау үшін арнайы физикалық шама — үдеу енгізіледі.

Үдеу — жылдамдық векторының өзгеру шапшаңдығын сипаттайтын шама, яғни

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} . \quad (1.5)$$

ХБ жүйесіндегі үдеудің өлшем бірлігі — метрдің секунд квадратына қатынасы : $[\vec{a}] = \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]$.

Дене 1-нүктеден 2-нүктеге орын ауыстырған кезде оның жылдамдығының бағыты және шамасы өзгереді, яғни жылдамдық векторының өзгерісі векторларды азайту ережесіне сәйкес анықталады (1.8-сурет): $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$. Бұл жағдайдағы толық үдеу :

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t} .$$

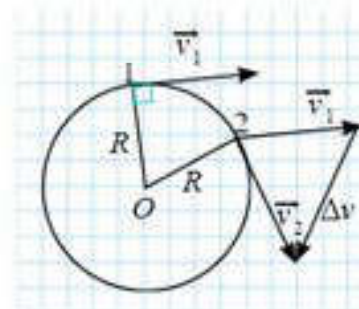
Жылдамдық векторының өзгерісі жылдамдықтың шамасы бойынша да, бағыты бойынша да өзгередінін көрсетеді. Сондықтан толық үдеу векторын бір-біріне өзара перпендикуляр болатын екі құраушы векторға жіктеген ыңғайлы: *тангенциал* (жананама) \vec{a}_t үдеу векторы және *нормаль* (центрге тартқыш) \vec{a}_n үдеу векторы (1.9-сурет) .

Тангенциал үдеу деп жылдамдықтың шамасы бойынша өзгеріс шапшаңдығын сипаттайтын толық үдеудің құраушысы ретінде түсінеміз, ол әрқашан траекторияның кез келген нүктесіне жананама бойымен бағытталады .

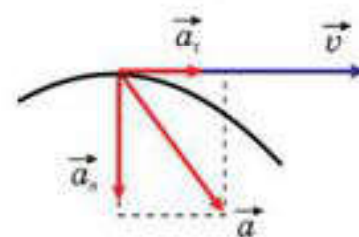
Бұл үдеудің модулін былай анықтайды:

$$a_t = \frac{v - v_0}{t} . \quad (1.6)$$

Нормаль үдеу деп жылдамдықтың бағыты бойынша өзгеру шапшаңдығын сипаттайтын толық үдеудің құраушысы түсініледі; ол әрқашан траекторияның берілген нүктесіндегі қисықтық центріне қарай радиус бойымен бағытталған .



1.8-сурет



1.9-сурет

Бұл үдеудің модулі былай анықталады:

$$a_n = \frac{v^2}{R}. \quad (1.7)$$

Осыны ескере отырып, дененің толық үдеуінің векторын тангенциал \vec{a}_t және нормаль \vec{a}_n үдеулерінің векторлық қосындысымен анықтай аламыз:

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n. \quad (1.8)$$

\vec{a}_t және \vec{a}_n векторлары әрқашан өзара перпендикуляр болғандықтан (1.9-сурет), толық үдеудің модулін Пифагор теоремасы арқылы табуға болады:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}. \quad (1.9)$$

Нормаль және тангенциал үдеулерінің мәні арқылы дененің қозғалысын сипаттауға болады. Мысалы, егер $a_t = 0$ және $a_n = 0$ болса, онда қозғалыс бірқалыпты түзусызықты болады. Ал $a_t \neq 0$, $a_n = 0$ болған кезде, қозғалыс түзусызықты және бірқалыпты емес.

Механикалық қозғалыстың салыстырмалылығы. Кез келген механикалық қозғалыстың салыстырмалылық сипаты болады. Бұл санақ жүйесін тандап алумен байланысты. Мысалы, қалың тұман кезіндегі ұшақтың жолаушысы ұшақтың қозғалып келе жатқанын немесе қозғалмай тұрғанын анықтай алмайды. Бұл жолаушының санақ жүйесі болмауымен түсіндіріледі. Ұшақ қалың тұманнан өте салысымен ол ұшақтың жерге қатысты қозғалып келе жатқанын анықтай алады, ал өзі ұшаққа қатысты қозғалмайтын күйде қала береді. Демек, қозғалыс жылдамдығы салыстырмалы шама болып табылады. Сол сияқты орын ауыстыру да салыстырмалы шама болып табылады. Қозғалыс траекториясының да салыстырмалы сипаты бар.

Барлық механикалық процестер инерциялық санақ жүйелерінде бірдей өтеді.

Механикадағы салыстырмалылық принципі осыған негізделген. Оны Галилейдің салыстырмалылық принципі деп те атайды.

Инвариантты және салыстырмалы шамалар. *Инварианттылық дегеніміз* — физикалық шамалар мен заңдардың белгілі бір шарттардың немесе түрленулер кезіндегі өзгермеуі. Мысалы, ғарышкердің салмағы Жер мен Айда бірдей; доптың қабырғаға соғылу күші бақылаушы (адам, қасындағы адам, бірқалыпты қозғалып бара жатқан автобустағы жолаушы) қандай инерциялық санақ жүйесінде орналасқанына байланысты емес.

Бір санақ жүйесінен екінші санақ жүйесіне өткен кезде үдеу, масса, күш, уақыт инварианты болып есептеледі. Галилейдің салыстырмалылық принципіне сәйкес Ньютонның барлық заңдары инвариантты болып саналады.

Алайда әртүрлі инерциалдық санақ жүйелеріндегі дененің қозғалысын сипаттайтын теңдеулер әртүрлі жазылады.

Бір инерциалдық санақ жүйесінен екіншісіне өткен кезде өзгертін шамалар салыстырмалы (инвариантты емес).

Кинетикалық шамалар: үдеу, орын ауыстыру, қозғалыс траекториясы салыстырмалы шамалардың мысалы болып табылады.

Егер дене бір мезгілде бірнеше қозғалысқа қатысса (мысалы, өзенмен жүзіп келе жатқан теплоходтың жолаушысы палуба бойымен орын ауыстырады), онда қорытқы орын ауыстыру оның әрбір қозғалысында жасалатын орын ауыстырулардың векторлық қосындысына тең болады, яғни $\Delta \vec{s} = \Delta \vec{s}_1 + \Delta \vec{s}_2$. Онда қорытқы қозғалыс жылдамдығы да дененің қозғалыстағы санақ жүйесіне қатысты және осы қозғалыстағы санақ жүйесінің қозғалмайтын санақ жүйесіне қатысты жылдамдықтарының векторлық қосындысына тең болады, яғни $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$. Жылдамдықтарды қосудың бұл заңын Г. Галилей тұжырымдаған болатын және ол жарық жылдамдығынан көп кіші денелер қозғалыстары үшін орынды болып табылады.

Мысалы, 12 км/сағ жылдамдықпен жүзіп келе жатқан кеменің үстіндегі адам кеме қозғалысының бағытына қарама-қарсы бағытта 12 км/сағ жылдамдықпен жылжитын болса, онда жағалауға қатысты оның жылдамдығы нөлге тең. Демек, жағалауға қатысты адам орын ауыстырмайды. Егер адам кеменің бағытымен қозғалатын болса, онда жағалауға қарағанда $v = v_x + v_y = 24$ км/сағ жылдамдықпен орын ауыстырады. Сондықтан адам кемеге қарағанда екі есе артық жол жүреді.

Осы мысал жылдамдық пен орын ауыстыру шамалары салыстырмалы екенін дәлелдейді.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Санақ жүйесі дегенді қалай түсінесіңдер?
2. Санақ жүйесі не үшін қажет?
3. Радиус-вектор дегеніміз не?
4. Қандай кинематикалық шамалар санақ жүйесін анықтауға байланысты?
5. Жол мен орын ауыстырудың айырмашылығы неде?
6. Орын ауыстыру жүрілген жолдан артық, оған тең немесе одан аз болуы мүмкін бе? Жауаптарыңды негіздендер.
7. Қозғалыс траекториясы дегеніміз не?
8. Денені қандай жағдайда материалдық нүкте ретінде қарастыра аламыз?
9. Қозғалыстардың тәуелсіздік принципінің мәні неде?
10. Қозғалыс жылдамдығына толық сипаттама беріндер.
11. Орын ауыстыру жылдамдығы жол жылдамдығынан немен ерекшеленеді?
12. Тангенциал үдеудің физикалық мағынасы қандай?
13. Нормаль үдеудің бағытын қалай анықтауға болады?

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Ермексаз түйіршіктерінің ауада және суда түсуін қарастырыңдар. Ермексаз түйіршіктерінің екі жағдайдағы қозғалысын сипаттаңдар.

Түсіндіріңдер

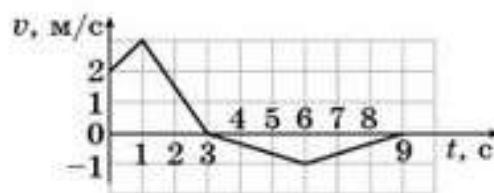
1. Айдар мен Айсар жолда келе жатқанда айналаны тұман басып кетті. Тұманда Айсар Айдардың қай жерде тұрғанын анықтай алады ма?

2. Неліктен Күн шықты және Күн батты деп айтылады? Бұл жағдайда санақ денесі ретінде қандай дене алынады?

3. Көшеде көлік бағдаршамының жанынан қарама-қарсы бағытта автокөлік және балалар автобустарының тізбегі қозғалып барады. Автобустар бір-біріне қатысты қозғала ма? Автокөлікке немесе бағдаршамға қатысты ше?

Зерттеңдер

1.10-суретте дененің тұзусызықты қозғалысы кезіндегі $v(t)$ тәуелділік графигі берілген. Дененің қозғалысын зерттеңдер. 9 с дененің жүріп өткен жолын, орын ауыстыру векторының модулін анықтаңдар.



Жауабы: 7,5 м; 1,5 м

1.10-сурет

Талдаңдар

1. Жаяу жүргінші 1 сағ 20 мин уақытта 7,2 км қашықтықты жүріп өтті. Алғашқы 20 мин ішінде ол ауыл ішіндегі ұзындығы 1,8 км болатын жолмен бір қарқынмен жүрді. Жолдың қалған бөлігін тасжол бойымен бірқалыпты жылдамдықпен жүріп өтті. Жүргіншінің қозғалысы қандай қозғалысқа жататынын анықтаңдар.

2. Пойыз кестеге сәйкес жылдамдығын өзгерте отырып бір бекеттен екіншіге келе жатыр. Қозғалыс уақытында бірінші, үшінші және алтыншы вагондардың жүріп өткен жолдарының қатынасын анықтаңдар.

Ойлап табыңдар

Қаладағы автобустың қозғалысына байланысты есеп құрастырыңдар.

Шығарыңдар

1. Ұзындығы 20 м атты жасақ жыраның бойымен 18 км/сағ жылдамдықпен бірқалыпты қозғалып келеді. Жасақ қанша уақытта жырадан өтеді? Жыраның ұзындығы 40 м.

Жауабы: 12 с

2. Кеше қиылысынан екі автобус бір уақытта қозғалады. Бірінші автобустың жылдамдығы 40 км/сағ, екінші 30 км/сағ жылдамдықпен бірінші автобустың бағытына перпендикуляр қозғалады. Олар бір-бірінен қандай салыстырмалы жылдамдықпен алыстайды?

Жауабы: 50 км/сағ

*3. Өзенде моторлы қайықпен жүзіп келе жатқан адам көпірдің астына келгенде үрлемелі камераны түсіріп алады. Бір сағаттан кейін камерасының түсіп қалғанын білген ол кері қайтып, көпірден 6 км қашықтықта камераны қуып жетеді. Қайықтың суға қарағанда жылдамдығын тұрақты деп алып, өзен ағысының жылдамдығын анықтаңдар.

Жауабы: 3 км/сағ

*4. Талғатқа v жылдамдықпен жоғары көтеріліп бара жатқан эскалатормен көтерілу үшін 6 мин уақыт кетті. Егер ол эскалатормен 3 есе жылдам жүрсе, онда көтерілу уақыты 4 есе азаяды. 2-жылдамдықпен қозғала отырып, ол қозғалмайтын эскалатормен қанша уақытта жоғары көтеріледі?

Жауабы: 6 мин

*5. А бекетінен В бекетіне моторлы қайықпен жүзіп бару үшін бір сағат, кері қайту үшін үш сағат уақыт қажет. Қайықтың суға қатысты жылдамдығы тұрақты болса, бұл жылдамдық өзен ағысының жылдамдығынан неше есе артық болады?

Жауабы: 2 есе

*6. Пойыз солтүстікке қарай 20 м/с жылдамдықпен қозғалады. Пойыздың үстінде ұшып бара жатқан тікұшақтың ішіндегі адамға, пойыз батысқа 20 м/с жылдамдықпен қозғалып бара жатқан сияқты болып көрінеді. Тікұшақтың жылдамдығын және ұшу бағытын табыңдар.

Жауабы: 28 км/сағ, солтүстік-шығысқа 45° бұрышпен

7. Жеңіл машина жүргізушісі жүк көлігін екеуінің арақашықтығы 20 м болған кезде 90 км/сағ жылдамдықпен басып озып, бұрынғы қатарға қайта орналасады. Осы кезде екеуінің арақашықтығы 15 м болды. 72 км/сағ жылдамдықпен қозғалатын жүк көлігін жеңіл машина қанша уақытта басып озады? Жеңіл көліктің ұзындығы 4 м, ал жүк көліктің ұзындығы 16 м тең.

Жауабы: 11 с



Рефлексия

1. Қандай ұғымдар мен терминдер сендерге таныс?
2. Материалдың қандай бөлігін жақсы, қандай бөлігін нашар түсіндіңдер?
3. "Шығармашылық шеберхана" сендерге тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 2. Түзусызықты қозғалыс



Тірек ұғымдар: түзусызықты бірқалыпты және түзусызықты бірқалыпты айнымалы қозғалыс, түзусызықты қозғалыс кезіндегі орын ауыстыру, жылдамдық.

Бүгінгі сабақта: түзусызықты қозғалысты таныласындар; координаталар және жылдамдық теңдеулерін мекендеудің негізгі мәселесін шешуге қолдануды үйренесіңдер.

Түзусызықты бірқалыпты қозғалыс. Дене кеңістікте бірқалыпты өзгертін немесе тұрақты жылдамдықпен, қисықсызықты немесе түзусызықты траектория бойымен қозғала алады.

Түзусызықты бірқалыпты қозғалыс деп дене өзінің қозғалыс бағытын өзгертпей, кез келген тең уақыт аралығында бірдей орын ауыстыратын қозғалысты айтады.

Неліктен “кез келген” сөзі түзусызықты бірқалыпты қозғалысты анықтауда маңызды рөл атқарады?

Мұндай қозғалыс кезінде дененің жылдамдық векторы шамасы бойынша да, бағыты бойынша да өзгермейді, яғни $\vec{v} = \text{const}$.

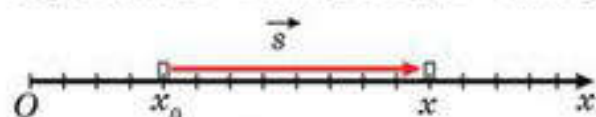
Түзусызықты бірқалыпты қозғалыс табиғатта сирек кездеседі, алайда көптеген денелер мейлінше аз уақыт аралығында түзусызықты траектория бойымен тұрақты жылдамдықпен қозғала алады.

Қоршаған ортаға көз жүгіртіп қарасаңдар, мұндай қозғалыс жиі кездеспейтінін байқауға болады. Түзусызықты бірқалыпты қозғалысқа мысал келтіре аласындар ма?

Электровоздың түзу темір жолдың бойымен орын ауыстыруын қарастырайық және ол бірқалыпты қозғалады деп есептейік. Онда орын ауыстыру шамасы мен жүрілген жол бірдей болады. Оларды

$$s_x = v_x t \quad (2.1)$$

формуласы бойынша анықтай аламыз. 2.1-суретте электровоздың x_0 бастапқы орны мен x соңғы орны және \vec{s} орын ауыстыру векторы көрсетілген. Электровозды материялық нүкте деп алайық.



2.1-сурет

2.1-суреттен орын ауыстыру мен жолды (қозғалыс түзусызықты) соңғы және бастапқы координаталардың айырымы ретінде табуға болады:

$$s_x = x - x_0 \quad (2.2)$$

Бұдан кез келген уақыт мезетіндегі электровоздың x координатасын табу үшін оның бастапқы x_0 координатасына орын ауыстыру шамасын қосу керек:

$$x = x_0 + s_x \quad (2.3)$$

(2.1) формуладағы орын ауыстыруды (2.3) формулаға қойып,

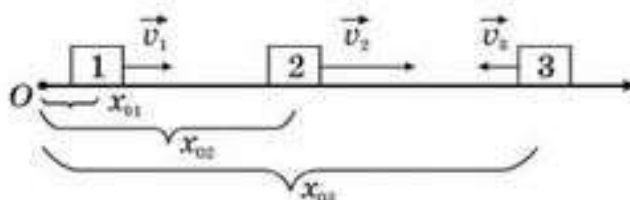
$$x = x_0 + v_x t \tag{2.4}$$

өрнегін аламыз. Бұл өрнек материялық нүктенің бірқалыпты түзусызықты қозғалыс заңы деп аталады. (2.4) формула бойынша кайсыбір уақыт мезетіндегі түзусызықты және бірқалыпты қозғалатын кез келген дененің координатасын табуға болады.

Механикалық қозғалысты график түрінде бейнелеуге болады. Бұл қозғалысты көрнекі түрде көрсетуге мүмкіндік береді. Ол үшін берілген масштабта абсцисса осінің бойымен қозғалыс уақытын, ал ордината осінің бойымен дененің координатасының мәндерін қоямыз. Одан кейін дененің қозғалыс заңын пайдаланып график тұрғызамыз.

Бірқалыпты түзусызықты қозғалыс кезіндегі жылдамдық пен үдеудің координатасының тәуелділік графиктерін тұрғызындар.

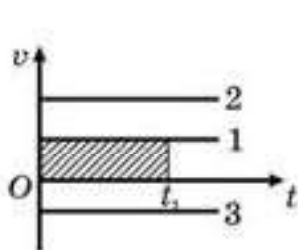
Үш дененің қозғалысын қарастырайық, мұндағы 1 жеңіл автокөлік пен 2 мотоцикл оң деп қабылданған бағыт бойынша, ал 3 автобус оларға қарама-қарсы бағытта қозғалады (2.2-сурет).



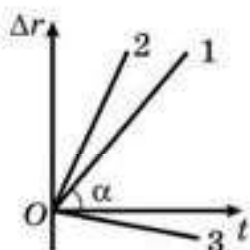
2.2-сурет

Кинематикалық шамалардың тәуелділігін график түрінде көрсетейік. 1, 2, 3 — үш дене үшін жылдамдық, орын ауыстыру, жол және координаталар графиктерін салайық (2.3, 2.4, 2.5, 2.6-суреттер). 1- және 2-дене Ox осі бойымен оң бағытта қозғалады, мұндағы $v_2 > v_1$; 3-дене Ox осінің бағытына қарама-қарсы бағытта қозғалады; олардың бастапқы координаталары 2.6-суретте, жылдамдық графиктері 2.3-суретте көрсетілген. Штрихталған тікбұрыш ауданы сан мәні бойынша 1-дененің t_1 уақыт ішінде жүріп өткен s жолына (орын ауыстыру модуліне) тең (2.3-сурет).

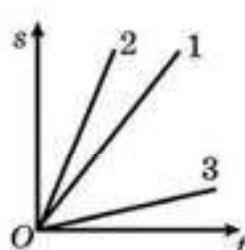
Қозғалыс графиктерінің көмегімен: 1) кез келген уақыт мезетіндегі дененің координаталарын; 2) кайсыбір уақыт мезетіндегі дененің жүріп өткен жолын; 3) қандай да бір жолды жүріп өтуге кеткен уақытты; 4) кез келген уақыт мезетіндегі денелер арасындағы ең қысқа қашық-



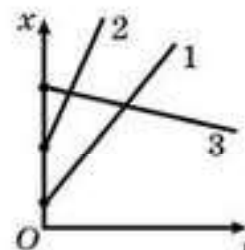
2.3-сурет



2.4-сурет



2.5-сурет



2.6-сурет

тықты; 5) денелердің кездесу мезетін, орнын және басқа да шамаларды анықтауға болады.

Түзусызықты бірқалыпсыз қозғалыс. *Түзусызықты бірқалыпсыз қозғалыс деп түзусызықты траектория бойымен жылдамдығы өзгеріп отыратын қозғалысты айтады.* Осындай қозғалыстың дербес жағдайы — тенайнымалы қозғалысты қарастырайық.

Тенайнымалы түзусызықты қозғалыс деп кез келген тең уақыт аралығында дененің жылдамдығы бірдей шамаға өзгеріп отыратын қозғалысты айтады. Мұндай қозғалыстың траекториясы түзу сызық болып табылады. Осы қозғалысты сипаттауда үдеу қолданылады. Үдеу өздерің білетіндей, жылдамдықтың өзгеру шапшаңдығын көрсетеді. Мысалы, аңшы мылтығынан ұшып шыққан оқ секундтың азғана үлесінде өзінің жылдамдығын 500 м/с дейін арттыра алады, демек, оқтың үдеуі өте үлкен. Тыныштық қалпынан қозғалған пойызға өзінің жылдамдығын азғана шамаға өзгерту үшін едәуір уақыт керек. Бұл пойыздың алатын үдеуі оқтың алатын үдеуінен бірнеше есе аз екенін көрсетеді.

Тенайнымалы түзусызықты қозғалыс кезінде үдеудің шамасы мен бағыты өзгермейді, яғни $\vec{a} = \text{const}$.

Жылдамдықтың шамасы үнемі артып отырған жағдайда үдеудің мәні оң болады. Мұндай тенайнымалы қозғалыс *теңүдемелі* деп аталады.

Егер жылдамдықтың мәні кеміп отырса, ондай үдеудің мәні теріс болады. Мұндай тенайнымалы қозғалыс *теңбаяулайтын* қозғалыс деп аталады.

Тенайнымалы қозғалыс кезінде дененің жылдамдығы үнемі өзгеріп отырады. Ал кез келген уақыт мезетіндегі дененің жылдамдығын табу үшін алдыңғы параграфта қарастырылған үдеудің анықтамасын пайдалануға болады:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}, \quad (2.5)$$

Бұдан теңүдемелі қозғалыс кезіндегі дененің жылдамдығы кез келген уақыт мезетінде

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \quad (2.6)$$

екені шығады. Егер дене оң бағытта қозғалса, онда проекциялар арқылы теңдеуді былай жаза аламыз:

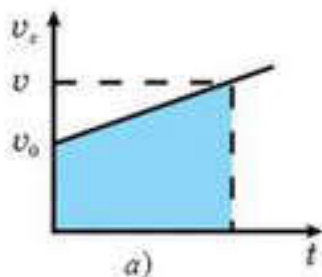
$$v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (2.7)$$

Демек, теңүдемелі қозғалыс кезінде дененің жылдамдығы уақыт бойынша сызықты түрде өзгереді.

Жылдамдық графигінің көмегімен (2.7) формуламен анықталатын тәуелділікті көрсетейік (2.7, *a*-сурет).

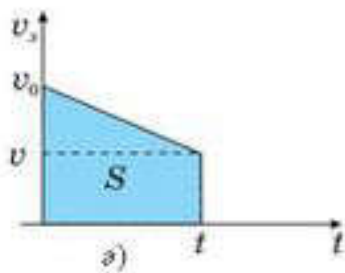
Штрихталған фигураның (трапеция) ауданы түзусызықты теңүдемелі орын ауыстыруға немесе жүрілген жолға тең, демек,

$$s = \frac{v + v_0}{2} t = \frac{v_0 + at + v_0}{2} t = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (2.8)$$

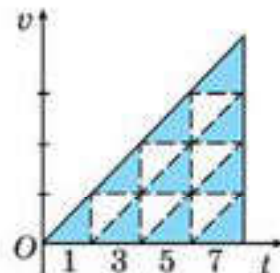


а)

2.7-сурет



б)

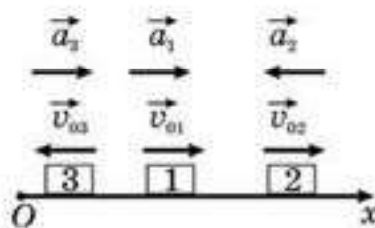


2.8-сурет

Егер қозғалыс теңбәяулайтын болса (2.7, б-сурет), онда

$$s = v_0 t - \frac{at^2}{2}. \quad (2.9)$$

Теңүдемелі қозғалыс кезіндегі жылдамдықтың уақытқа тәуелділік графигінен (2.8-сурет), егер дененің бастапқы жылдамдығы нөлге тең болса, онда оның тең уақыт аралығында жүріп өтетін жолдарының бір-біріне қатынасы так сандардың қатынасына тең екенін байқаймыз, яғни

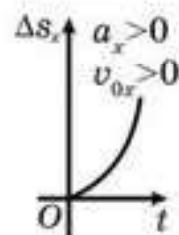


2.9-сурет

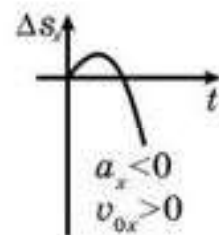
$$s_1 : s_2 : s_3 : \dots = 1 : 3 : 5 : \dots \quad (2.10)$$

(2.10) формуламен (2.8) формуланы қолданып дәлелдендер.

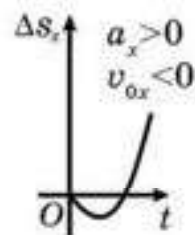
Үш дененің теңайнымалы қозғалысын қарастырайық (2.9-сурет): 1-дене оң бағытта оң үдеумен, 2-дене оң бағытта теріс үдеумен, 3-дене кері бағытта оң үдеумен қозғалады. Бұл денелер үшін орын ауыстырудың уақытқа тәуелділік графигтері 2.10-суретте көрсетілген.



1-дене



2-дене



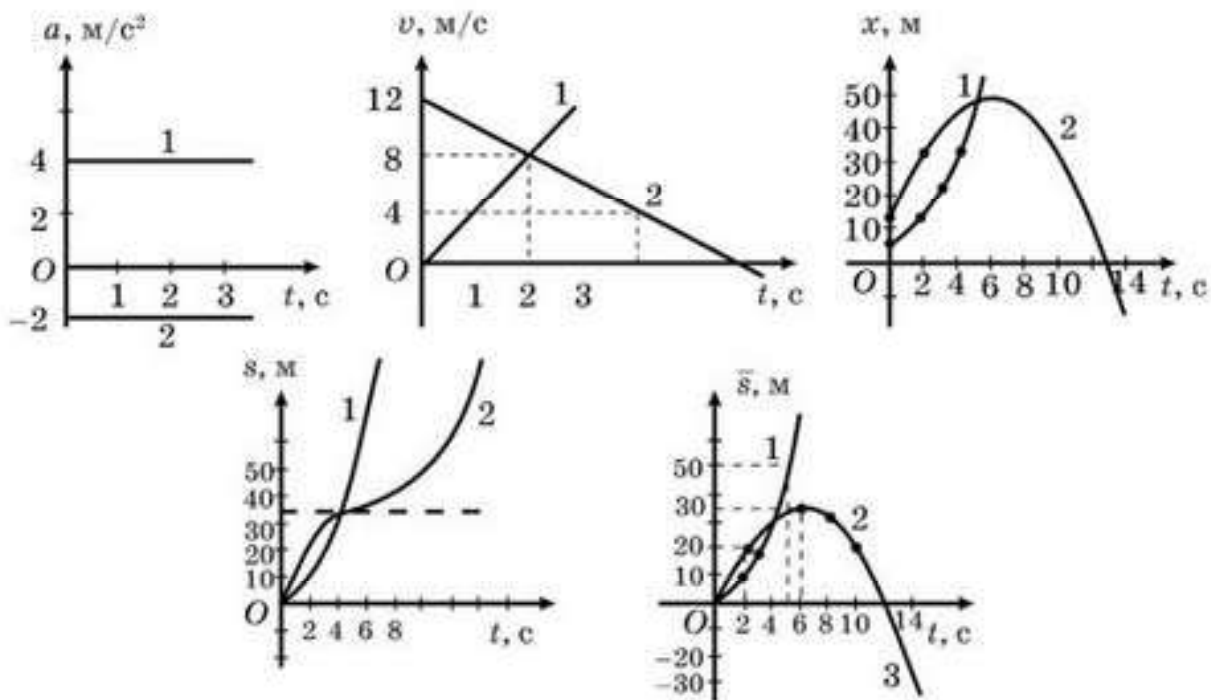
3-дене

2.10-сурет

Қарастырылған денелердің жылдамдықтары мен жүрілген жолдарының уақытқа тәуелділігін өздерін график түрінде көрсетіндер (2.10-сурет).

2.11-суретте екі дене үшін теңайнымалы қозғалыс кезіндегі жылдамдық, үдеу, жол және орын ауыстыру графигтері берілген: 1-дене $x_0 = 4$ м, $v_0 = 0$, $a = 4$ м/с² және 2-дене $x_0 = 12$ м, $v_0 = 12$ м/с, $a = -2$ м/с².

Бірқалыпсыз қозғалыс кезінде көбінесе соңғы пунктке дейінгі арақашықтық арқылы оған жету уақытын білу қажет болады. Мұндай жағдайда бірқалыпсыз қозғалысты қандай да бір жылдамдықпен қозғалатын бірқалыпты қозғалыс ретінде қарастыру ыңғайлы. Мұндай жылдамдықты бірқалыпсыз қозғалыстың орташа жылдамдығы деп атаймыз.



2.11-сурет

Бірқалыпсыз қозғалыстың орташа жылдамдығы деп қарастырылып отырған уақыт аралығында дәл сондай жол жүрілетін бірқалыпты қозғалыстың жылдамдығын айтамыз :

$$v_{\text{орт}} = \frac{s}{t}. \quad (2.11)$$

Орташа жылдамдықты орташа арифметикалық шама ретінде есептелетін орташа арифметикалық жылдамдықпен шатастыруға болмайтынына назар аударамыз: $v_{\text{орта}} = \frac{v_1 + v_2}{2}$. Осы теңдеудің көмегімен бірқалыпты қозғалыс кезіндегі орташа жылдамдықты есептеуге болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Бірқалыпты түзу сызықты қозғалыс деп қандай қозғалысты айтады?
2. Бірқалыпты түзу сызықты қозғалыс кезіндегі жолды қалай есептейді?
3. Қозғалыс заңы дегеніміз не?
4. а) $x = -5 + 2t$; ә) $x = -5 - 2t$ теңдеулері түрінде берілген дене қозғалысының түрін, қозғалыс заңын сипаттаңдар.
5. Теңбәулайтын түзу сызықты қозғалыс кезіндегі дененің жылдамдығын қалай анықтауға болады?
6. Түзу сызықты теңайнымалы қозғалыс кезіндегі жол мен орын ауыстыру шамалары әрқашан бірдей бола ма? Жауаптарыңды негіздендер.
7. а) $v = 5 + 4t$; ә) $v = 2t^2$; б) $v = 2t - 4t^2$; в) $x = -2t - 4t^2$; г) $x = -2t + 4t^2$ теңдеулері түрінде берілген дене қозғалысының түрін және қозғалыс заңын сипаттаңдар.
8. Дененің қозғалысын график түрінде бейнелеңдер деген сөйлем нені білдіреді?
9. Айнымалы қозғалыстың орташа жылдамдығы дегенді қалай түсінесіңдер? Ол не үшін енгізілген?
10. Дененің орташа жылдамдығын біле отырып, оның кез келген уақыт мезетіндегі орнын анықтауға бола ма? Неліктен?

Есеп шығару үлгілері

Механикалық қозғалысқа есептер шығару мысалдарын қарастырайық. Есепті шығаратын кезде оның шартын мұқият оқып шығындар және есепте сипатталған құбылысты көз алдарына елестетіндер. Осыдан кейін бұл құбылысты сипаттайтын заңдарды анықтап, олардың математикалық өрнегін жазу керек. Әрі қарай есеп шарты физикада қабылданған тәсіл бойынша қысқаша жазылады. Есепті шешу жолын суреттер, сұлбалар немесе графиктер арқылы, ал физикалық шамалардың өлшем бірлігін ХБ жүйесінде көрсеткен орынды.

1-есеп. Суға қатысты катердің жылдамдығы судың ағысының жылдамдығынан n есе артық. Катермен екі айлақтың арасын ағыстың бойымен жүзіп өтуге карағанда ағысқа қарсы жүзіп өту үшін уақыт қанша есе көп кетеді?

Шешуі. Екі айлақтың арасын s деп белгілейік. t_1 және t_2 — катердің сәйкес ағысқа қарсы және ағыстың бойымен қозғалысына кеткен уақыттары. Онда жағаға қатысты катердің ағысқа қарсы жылдамдығы катер мен су ағысының жылдамдығының айырымы ретінде және ағыстың бойымен жылдамдығы катердің жылдамдығы мен судың жылдамдығының қосындысы ретінде анықталады: $v_1 = v_k - v_c$ және $v_2 = v_k + v_c$.

Екі айлақтың арасын жүзіп өту жолы:

$s = v_1 t_1$ (ағысқа қарсы жүзу) және $s = v_2 t_2$ (ағыс бойымен жүзу). Сонда

$$s = (v_k - v_c)t_1 = (nv_c - v_c)t_1 = v_c(n - 1)t_1;$$

$$s = (v_k + v_c)t_2 = (nv_c + v_c)t_2 = v_c(n + 1)t_2.$$

Бұдан $t_1 = \frac{s}{v_c(n - 1)}$ және $t_2 = \frac{s}{v_c(n + 1)}$. Демек, $\frac{t_1}{t_2} = \frac{n + 1}{n - 1}$.

$$\text{Жауабы: } \frac{t_1}{t_2} = \frac{n + 1}{n - 1}$$

2-есеп. Қозғалмайтын эскалатормен адам 4 мин көтеріледі, ал тыныштық қалпын сақтаған адамды эскалатор 2 мин көтереді. Қозғалыстағы эскалатор бойымен жоғары қарай жүріп бара жатқан адам онымен қанша уақытта көтеріледі?

Шешуі. Эскалатордың ұзындығын s деп белгілейік.

Онда адамның жылдамдығы : $v_1 = \frac{s}{t_1}$; эскалатордың жылдамдығы : $v_2 = \frac{s}{t_2}$; қозғалыстағы эскалатормен жүріп келе жатқан адамның жылдамдығы : $v_3 = \frac{s}{t_3}$.

$v_3 = v_2 + v_1$ болғандықтан, $\frac{s}{t_1} + \frac{s}{t_2} = \frac{s}{t_3}$ аламыз.

Бұдан $t_3 = \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}$ шығады.

Енді есептеулер жүргіземіз: $t_3 = \frac{4 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 60}{6 \cdot 60} = \frac{4 \cdot 60}{3} = 80$ с.

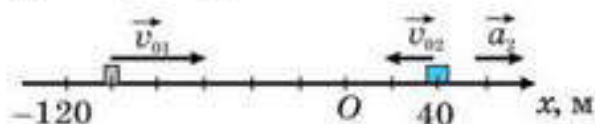
Жауабы : $t_3 = 80$ с

3-есеп. Машина мен велосипедшінің қозғалыстары $x_1 = -100 + 10t$ және $x_2 = 40 - 5t + 2t^2$ теңдеулерімен берілген. Екі дененің жылдамдықтарының теңдеулерін жазайық. Ox осінде бастапқы уақыт мезетіндегі дененің орнын, жылдамдықтардың және үдеулерінің бағыттарын көрсетіндер. Қандай уақыт мезетінде олардың жылдамдықтары бірдей болады?

Шешуі. Екі дененің де қозғалыс теңдеулерін координатаның $x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$ өзгеріс заңымен салыстыра отырып, денелердің бастапқы координаталары $x_{01} = -100$ м және $x_{02} = 40$ м, бастапқы жылдамдықтары $v_{01} = 10$ м/с және $v_{02} = -5$ м/с (дене оң бағыт деп қабылданған бағытқа қарама-қарсы бағытта қозғалады), бірінші дененің үдеуі $a_1 = 0$ м/с² (қозғалыс бірқалыпты), екінші дененің үдеуі $a_2 = 4$ м/с² деп айта аламыз. Жылдамдықтың теңдеуі

$$v = v_0 + at$$

болатындықтан, бірінші дене үшін $v_1 = 10$, ал екінші дене үшін $v_2 = -5 + 4t$.



2.12-сурет

Енді Ox осінің бойына бастапқы уақыт мезетіндегі денелердің орындарын, жылдамдықтардың және үдеулерінің бағыттарын көрсетейік (2.12-сурет).

Денелердің жылдамдықтары бірдей болатын уақыт мезетін табу үшін v_1 және v_2 жылдамдықтарын теңестірейік:

$$10 = -5 + 4t.$$

Бұдан $t = 15$ с аламыз. Демек, 15 с кейін денелердің жылдамдықтары бірдей болады.

Жауабы : $v_1 = 10$, $v_2 = -5 + 4t$, $t = 15$ с

Машина мен велосипедші кездеспейтінін өздерің дәлелдендер.



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

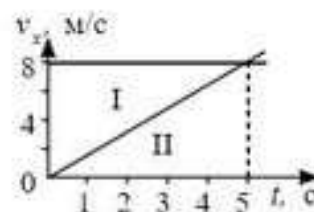
Қала көшелеріндегі маршрут автобустарының, автокөліктердің қозғалыстарын бақылаңдар. Олардың қозғалыстарының ұқсастық белгілерін анықтаңдар.

Түсіндіріңдер

Теңайнымалы жылдамдықтың уақытқа тәуелділік графигінен дененің орын ауыстыру шамасын қалай анықтауға болады?

Зерттеңдер

2.13-суретті пайдаланып, I және II денелердің қозғалысын сипаттап беріңдер. Екі графиктің қиылысқан нүктесінде қандай өзгерістер болады?



2.13-сурет

Талдаңдар

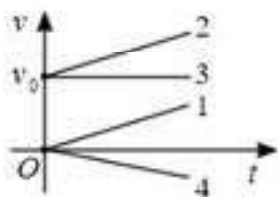
1. Қозғалыс теңдеуі $x = 12 - 3t$ болатын дененің қозғалысына талдау жүргізіңдер. Қанша уақыттан кейін дене координаталар басына барады?

2. 2.14-суреттегі қай кесінді бастапқы жылдамдығы бар теңүдемелі түзусызықты қозғалысқа сәйкес келеді?

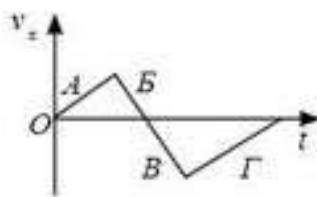
3. 1- және 2-кесінділерімен қозғалыстың қандай түрі суреттелген (2.14-сурет)?

4. 2.15-суретте дене жылдамдығы проекциясының уақыттан тәуелді графигі берілген. Графиктің қандай бөліктерінде жылдамдық пен үдеудің проекциялары бірдей таңбаға ие болады?

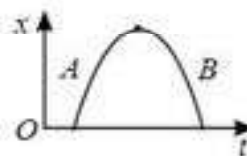
5. 2.16-суретте түзусызықты қозғалатын дененің координатасының уақытқа тәуелді графигі берілген. A және B бөліктері қозғалыстың қандай түріне сәйкес келеді?



2.14-сурет

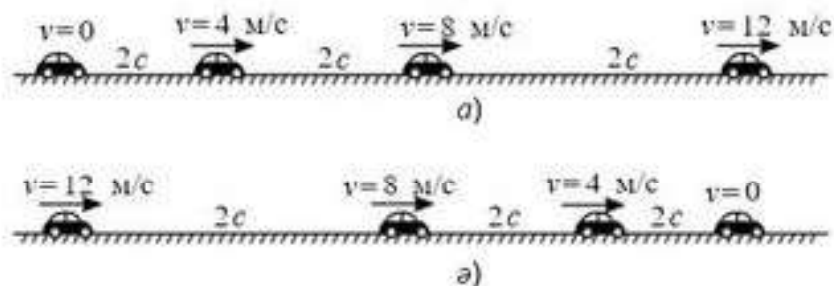


2.15-сурет



2.16-сурет

6. 2.17, a және ә-суреттерінде берілген денелердің қозғалыстарын қарастырыңдар. Олардың қозғалыстарындағы ұқсастықтар мен айырмашылықтарды табыңдар.



2.17-сурет

Шығарыңдар

1. Дене көлбеу жазықтықта 10 секундта 2 м сырғанады. Бастапқы жылдамдығын нөлге тең алып, дене үдеуінің модулін анықтаңдар.

Жауабы: 4 см/с^2

2. Екі пойыз бірдей уақыт аралығында тең жол жүріп өтті. Бірінші пойыз барлық жолда 3 см/с^2 үдеумен теңүдемелі қозғалыс жасаса, екінші пойыз жолдың екінші жартысын 18 км/сағ жылдамдықпен, ал қалған жартысын 54 км/сағ жылдамдықпен жүрді. Пойыздар жүріп өткен жолды табыңдар.

Жауабы: $3,75 \text{ км}$

3. Екі дене Ox осі бойымен түзусызықты қозғалады. Олардың қозғалыстарының уақытқа тәуелділігі $x_1 = 2 + 2t + t^2$ (м), $x_2 = -7 - 6t + 2t^2$ (м). Қозғалыс бірдей уақытта басталған болса, олар кездескен кездегі салыстырмалы жылдамдықтың модулін анықтаңдар.

Жауабы: $v_c = 10 \text{ м/с}$

4. Дене модулі және бағыты тұрақты үдеумен қозғалады. 4 с кейінгі жылдамдығы $1,2 \text{ м/с}$ болса, ал 7 с кейін дене тоқтайды. Дененің жүріп өткен жолын табыңдар.

Жауабы: $9,8 \text{ м}$

■5. Арақашықтығы 100 м болатын A және B бекетінен екі автобус бірдей 4 м/с^2 үдеумен қарама-қарсы бағытта қозғалады. Кездескен кезде олардың салыстырмалы жылдамдықтары неге тең болады?

Жауабы: 40 м/с

6. Дене кері бағытта 5 м/с жылдамдықпен қозғалатын болса, осы жылдамдықтың графигін тұрғызыңдар.

Рефлексия

1. Қандай ұғымдар мен терминдер алдыңғы тақырыптан сендерге таныс?
2. Материалдың қандай бөлігін жақсы, қандай бөлігін нашар түсіндіңдер?
3. "Шығармашылық шеберхана" сендерге тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 3. Денелердің еркін түсуі. Еркін түсу үдеуі



Тірек ұғымдар: еркін түсу, еркін түсу үдеуі, Ньютон түтігі.

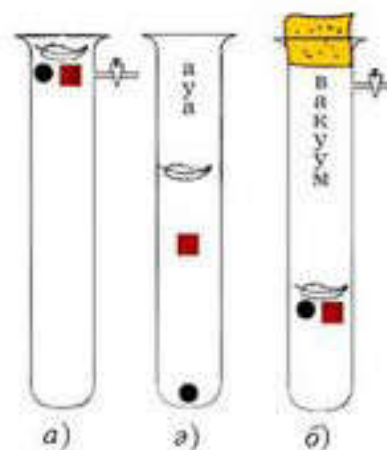
Бүгінгі сабақта: еркін түсу ұғымымен танысаңыздар, осы қозғалыс үшін координаттар және жылдамдықтың теңдеулерін массаының негізгі мәселесін шешуге қолдануды үйренесіздер.

Тенүдемелі қозғалыстың дербес жағдайына денелердің Жердің тартылыс күшінің әсерінен құлауы жатады. Оны *еркін түсу* деп атайды. Бұл қозғалыстың заңдары теңайнымалы қозғалыс заңындай жазылады. Осы жағдайда үдеу тұрақты шама болып табылады және $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ тең. Бұл үдеудің мөлшері берілген галамшардағы ауырлық күшіне байланысты. Жердегі еркін түсу үдеуінің шамасын алғаш рет Г. Галилей Пиза мұнарасынан ауыр шар мен мушкет оғын төмен қарай лақтырып анықтаған болатын (3.1-сурет). Ол барлық денелер кедергі күші болмаған жағдайда Жер бетіне Жердің тартылыс әсерінен бірдей үдеумен түседі, яғни еркін түсу үдеуі денелердің массасына тәуелді емес деп ұйғарған болатын.



3.1-сурет

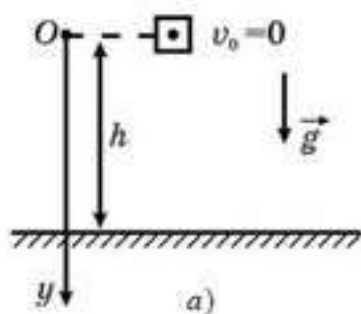
Бұған Ньютон түтігін немесе стробоскопиялық әдісті пайдаланып көз жеткізуге болады. Ньютон түтігі ұзындығы 1,5 м шыны түтік болып табылады, оның бір жағы дәнекерленген, ал екінші жағы кранмен қосылған (3.2, а-сурет). Түтікке бытыра, тығын және құстың қауырсыны салынады. Түтікті тез төңкерген кезде бұл денелер түтіктің түбіне әртүрлі уақытта түседі: алдымен бытыра, сосын тығын, ең соңында қауырсын. Денелер дәл осылай түтікте ауа болған кезде ғана құлайды (3.2, ә-сурет). Ал егер түтіктегі ауаны сорып шығаратын болсақ, онда денелер бір мезгілде түседі (3.2, б-сурет).



3.2-сурет

Жерде еркін түсу үдеуі жергілікті жердің географиялық ендігіне байланысты болады. Оның ең үлкен мәні $g_n = 9,81 \text{ м/с}^2$ полюсте, ал кіші мәні экваторда $g_e = 9,75 \text{ м/с}^2$ тең.

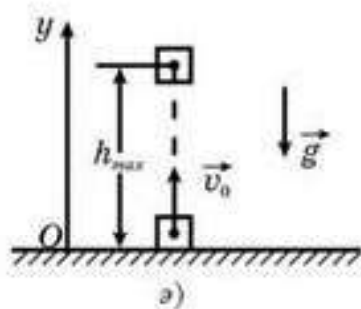
Бұл Жердің өз осінен тәуліктік айналуымен, Жердің сфералық емес пішінімен, Жер қойнауындағы қазба байлықтардың тығыздықтарының бірқалыпты таралмауымен түсіндіріледі. Еркін түсу кезіндегі жылдамдықтар мен координаталар:



$$\pm v = \pm v_0 \pm at, \quad (3.1)$$

$$h = h_0 \pm v_0 t \pm \frac{gt^2}{2} \quad (3.2)$$

түрінде жазылады. Таңба санақ жүйесін таңдаумен анықталады. Еркін түсетін дене тұзусыздықты немесе қисықсыздықты траектория бойымен қозғала алады. Бұл бастапқы шарттарға байланысты. Осыларға толығырақ тоқталайық.



3.3-сурет

Вертикаль төмен лақтырылған дененің қозғалысы. Дене Жер бетінен h биіктікте болсын (3.3, а-сурет). Дене биіктіктен бастапқы жылдамдықсыз төмен қарай құлайды. Таңдап алынған санақ жүйесінде дененің қозғалысы $v = gt$ және $h = \frac{gt^2}{2}$ теңдеулерімен сипатталады.

Соңғы формуладан дененің h биіктіктен құлау уақытын табуға болады: $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$.

Уақыттың табылған бұл өрнегін жылдамдыққа арналған формулаға қойып, дененің құлау мезетіндегі жылдамдығының модулін табамыз: $v = \sqrt{2gh}$.

Бастапқы жылдамдықпен вертикаль жоғары лақтырылған дененің қозғалысы.

Таңдап алынған санақ жүйесінде (3.3, б-сурет) дененің қозғалысы

$$v = v_0 - gt \text{ және } h = v_0 t - \frac{gt^2}{2} \quad (3.3)$$

теңдеулерімен сипатталады. Жылдамдықтың теңдеуінен дене жоғары қарай теңбаяу қозғала отырып, максимал биіктікке көтеріледі, содан кейін теңүдемелі төмен қарай қозғалады.

Егер ауаның кедергісін ескермесек, онда көтерілу уақыты мен түсу уақыты бірдей болатынын дәлелдеңдер.

Қозғалыстың тәуелсіздік принципі дененің горизонталь немесе көкжиекке бұрыш жасай лақтырылған дене қозғалысының теңдеуін анықтауға қалай көмектеседі?

Горизонталь лақтырылған дененің қозғалысы. Горизонталь лақтырылған дененің қозғалысын зерделеуде қозғалыстардың тәуелсіздік принципін ескеріп, әртүрлі координаталар осі бойынша қозғалысты бір-біріне тәуелсіз қарастырамыз: горизонталь бағыттағы қозғалыс бірқалыпты, ал вертикаль бағыттағы теңайнымалы болады. Санақ жүйесін (3.4-сурет) таңдап алып және

$$x = v_0 t \text{ және } y = \frac{gt^2}{2} \quad (3.4)$$

формуларын пайдаланып қозғалыс теңдеулерін жазамыз. Соңғы теңдеулерден

$$y = \frac{g}{2v_0^2} x^2 \quad (3.5)$$

өрнегін аламыз.

Бұл — парабола теңдеуі. Демек, горизонталь лақтырылған дене парабола бойымен қозғалады. Кез келген уақыт мезетіндегі дененің жылдамдығы параболаға жанама бойымен бағытталады (3.5-сурет). Жылдамдық модулін Пифагор теоремасы бойынша есептеуге болады:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2} \quad (3.6)$$

Көкжиекке бұрыш жасай лақтырылған дененің қозғалысы. Дене көкжиекке α бұрыш жасай v_0 жылдамдықпен лақтырылсын. Қозғалысты сипаттау үшін Ox және Oy координаталар осін таңдап алу қажет (3.5-сурет). Қозғалыстың тәуелсіздік принципі пайдаланып, бастапқы жылдамдықтың векторын екі құраушыға жіктейік:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha \quad (3.7)$$

және

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha \quad (3.8)$$

Таңдап алынған координаталар осьтері бойынша дененің қозғалыс теңдеулері мынадай болады:

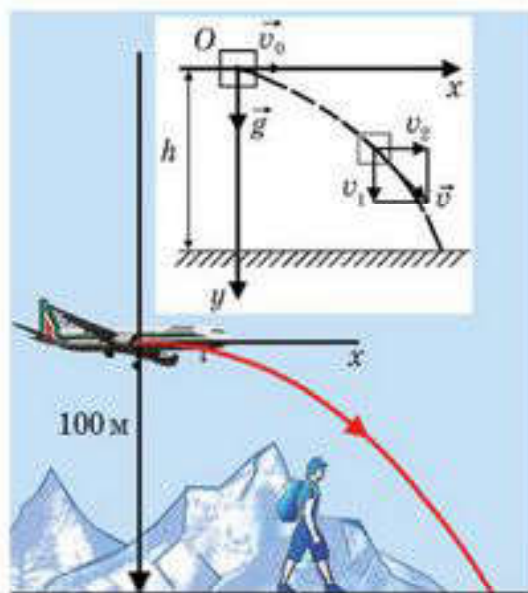
$$x = v_0 t \cos \alpha \quad (3.9)$$

және

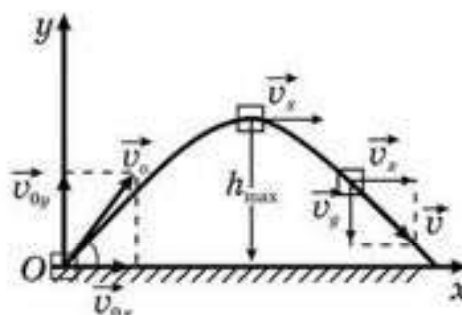
$$y = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} \quad (3.10)$$

(3.9) теңдеуден уақытты тауып және оның мәнін (3.10) теңдеуге қойып, траекторияның теңдеуін аламыз:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 \quad (3.11)$$



3.4-сурет



3.5-сурет

Бұл — *парабола теңдеуі*. Ұшу уақытын және ұшу қашықтығын табу үшін (3.10) формуладағы дененің Oy осі бойымен орын ауыстыруы нөлге тең болатынын ескеру қажет, сондықтан Oy осі бойынша соңғы координата $y = 0$. Онда ұшу уақыты

$$t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}, \quad (3.12)$$

ал ұшу қашықтығы

$$l = \frac{2v_0^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}. \quad (3.13)$$

Дененің көтерілу биіктігін анықтау үшін $h = \frac{gt^2}{2}$ формуласына ұшу уақытының жартысы $t = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$ қойып,

$$y_{\max} = h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \quad (3.14)$$

өрнегін аламыз.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Ньютон түтігі не үшін қажет?
2. Горизонталь лақтырылған дененің қозғалыс траекториясы қандай болады?
3. Көкжиекке бұрыш жасай лақтырылған дененің қозғалыс траекториясы қандай болады?
4. Г. Галилей Жердегі еркін түсу үдеуін қалай есептеген болатын?
5. Неліктен еркін түсу үдеуі экваторға жақындаған сайын азая береді?

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Дене тік жоғары v_0 бастапқы жылдамдықпен лақтырылған. Бұл дене ең жоғары нүктеге көтерілген кезде сол орнынан, бастапқы жылдамдықпен тік жоғары екінші дене лақтырылды. Осы денелер бастапқы орнынан қандай биіктікте кездеседі?

Берілгені:	<i>Шешуі.</i> Екінші дене өз қозғалысын бірінші дененің ең жоғары биіктікке көтерілу уақытына тең уақытта бастайды. Денелер еркін түскендіктен, \vec{a} үдеуі модулі жағынан g тең. Олай болса, аталған уақытты жылдамдық теңдеуі арқылы табамыз (ең жоғары көтерілу нүктесінде жылдамдық нөлге тең):
$v_{01} = v_0$	
$v_{02} = v_0$	
g	
h — ?	

$$0 = v_0 - gt_0, \text{ осыдан } t_0 = \frac{v_0}{g}. \quad (1)$$

Тенүдемелі қозғалыс теңдеуін пайдаланып және қозғалыс теңдеулерінің қозғалысты толық сипаттайтынын ескеріп, екі дененің кездесу мезетіне дейінгі қозғалысын сипаттаймыз (3.6-сурет). Санақ жүйесін Жермен байланыстырамыз.

$$1\text{-дене үшін } h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}; \quad (2)$$

$$2\text{-дене үшін } h = v_0(t - t_0) - \frac{g(t - t_0)^2}{2} \quad (3)$$

$$\text{немесе } h = v_0 t - v_0 t_0 - \frac{gt^2}{2} + 2 \frac{g t t_0}{2} - \frac{g t_0^2}{2},$$

$$\text{немесе } h = h - v_0 t_0 + g t t_0 - \frac{g t_0^2}{2}, \text{ немесе } v_0 + \frac{g t_0}{2} = g t.$$

Осыдан

$$t = \frac{v_0}{g} + \frac{t_0}{2}. \quad (4)$$

(1) формуланы (4) формулаға қойып,

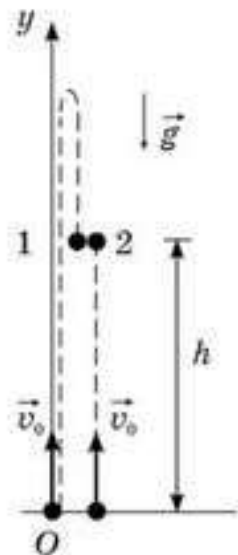
$$t = \frac{3v_0}{2g} \quad (5)$$

өрнегін аламыз.

$$h = v_0 \cdot \left(\frac{3v_0}{2g} \right) - \frac{g v_0^2 \cdot 9}{2 \cdot 4g^2} = \frac{3v_0^2}{8g}$$

екенін табамыз.

$$\text{Жауабы : } h = \frac{3v_0^2}{8g}$$



3.6-сурет

2-есеп. Әртүрлі биіктіктен бірдей жылдамдықпен горизонталь бағытта екі дене лақтырылған және $h_2 = 4h_1$. Осы денелердің ұшу қашықтығының қатынасы неге тең?

Берілгені:

$$v_{01} = v_{02} = v_0$$

$$h_2 = 4h_1$$

$$\frac{l_2}{l_1} = ?$$

Шешуі. Қозғалыстың тәуелсіздік принципі қолданық (3.7-сурет):

$$Ox: l = v_0 t; \quad Oy: h = \frac{gt^2}{2}.$$

$$\text{Осыдан } t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \text{ және } l = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

$$\text{Сонда } \frac{l_2}{l_1} = \frac{v_0 \sqrt{\frac{2h_2}{g}}}{v_0 \sqrt{\frac{2h_1}{g}}} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} = \sqrt{4} = 2.$$

$$\text{Жауабы: } \frac{l_2}{l_1} = 2$$

3-есеп. Ең жоғары көтерілу биіктігі ұшу қашықтығынан 4 есе үлкен болу үшін денені көкжиекке қандай бұрышпен лақтыру керек? Ауа кедергісі ескерілмейді.

Берілгені:

$$H = 4l$$

$$g$$

$$\alpha = ?$$

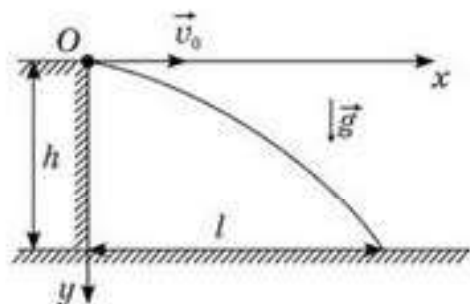
Шешуі. Қозғалыстың тәуелсіздік принципі қолданық (3.8-сурет):

$$Ox: l = v_{0x} t = v_0 t \cos \alpha; \quad Oy: -v_{0y} = v_{0y} - gt;$$

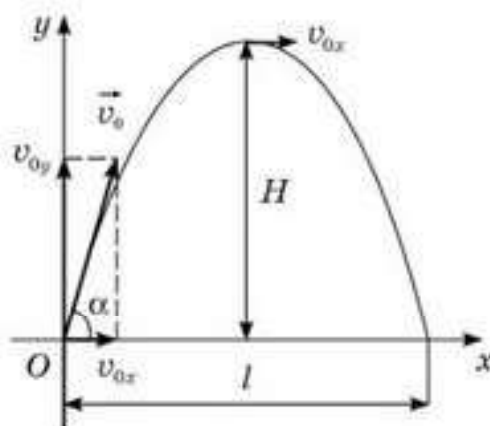
$$t = \frac{2v_{0y}}{g} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \text{ — ұшу уақыты.}$$

Онда $l = \frac{2v_0^2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{g}$. Еркін түсу кезінде дененің көтерілу уақыты

мен құлау уақыты тең, демек, $t_1 = t_2 = \frac{t}{2} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$.



3.7-сурет



3.8-сурет

Ең жоғары көтерілу биіктігі $H = \frac{gt_2^2}{2} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$ (қозғалыстың қай-
тымдылығын қолданамыз).

Есептің шарты бойынша $H = 4l$, яғни $\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{8v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}$.

Осыдан $\operatorname{tg} \alpha = 16$, яғни $\alpha = 86^\circ$.

Жауабы : $\alpha = 86^\circ$

4-есеп. Кішкене шарды көкжиекке $\alpha = 30^\circ$ бұрыш жасай, $v_0 = 14$ м/с бастапқы жылдамдықпен лақтырады. Лақтыру нүктесінен $s = 11$ м қашықтықта ол вертикаль қабырғаға серпімді соқтығысады. Қабырғадан қандай l қашықтықта шар жерге түседі?

Берілгені:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$v_0 = 14 \text{ м/с}$$

$$s = 11 \text{ м}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$l = ?$

Шешуі. Шардың ұшу қашықтығын оның жолында вертикаль қабырға тәрізді бөгет жоқ болған жағдай үшін анықтайық. Ол үшін шардың горизонталь (Ox осі) және вертикаль (Oy осі) бойымен қозғалысын қарастырамыз (3.9-сурет).

$$Ox: L = v_0 t \cos \alpha, \text{ мұндағы } t \text{ — ұшу уақыты ; (1)}$$

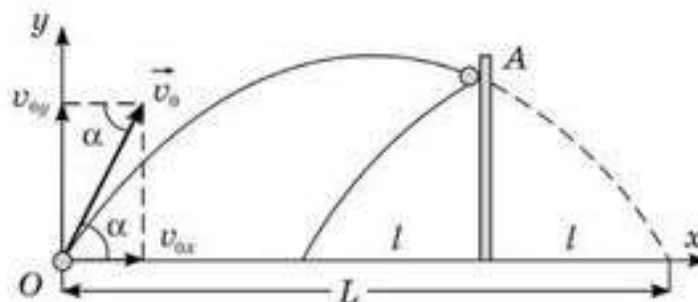
$$Oy: 0 = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}. \quad (2)$$

$$(2) \text{ теңдеуден } t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}. \quad (3)$$

(3) теңдеуді (1) теңдеуге қойсақ, $L = \frac{1}{g} 2v_0^2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha$ немесе

$L = \frac{1}{g} v_0^2 \sin 2\alpha = 17,3$ м шығады. Бірақ шардың жолында қабырға тұрғандықтан, шар одан серпіліп, $l = L - s = (17,3 - 11)$ м = 6,3 м қашықтыққа түседі.

Жауабы : 6,3 м



3.9-сурет

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Ағаштан түсетін жапырақтарды бақылаңдар. Олардың қозғалысын сипаттаңдар және түсіндіріп беріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

1. Бірі жұмарланған, екіншісі жұмарланбаған екі парақ қағазды бірдей биіктіктен лақтырыңдар. Қорытынды жасаңдар.
2. Құс қауырсыны мен теннис добын бірдей биіктіктен тастаңдар. Жауабын түсіндіріңдер.
3. Үстел деңгейіндегі бірдей биіктіктен бірін бастапқы жылдамдықсыз тігінен, ал екіншісін v_0 бастапқы жылдамдықпен горизонталь екі өшіргіш тастаңдар. Өшіргіштердің түсу уақыттарын салыстырыңдар.
4. Үй жағдайында еркін түсу үдеуін анықтаңдар. Жасаған тәжірибелердің әдіс-төмесін ойластырыңдар.
5. Баллистикалық пистолет көмегімен көкжиекке әртүрлі бұрышпен допты атқылаңдар. Әртүрлі бұрыш кезіндегі доптың ұшу биіктігін және ұзақтығын салыстырыңдар.

Түсіндіріңдер

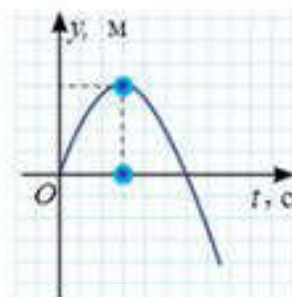
1. 3.1-суретте Г. Галилейдің Пиза мұнарасында жасаған тәжірибесі көрсетілген. Мушкет оғы мен ауыр шардың жер бетіне неліктен бірдей мезгілде түсетінін түсіндіріңдер.
2. Неліктен қар жауған кезде қар ұшқындары баяу, ал қанатын жинап алған бүркіт жылдам құлайды?

Зерттеңдер

1. 3.1-суретті қолданып, Пиза мұнарасынан көлемдері бірдей теннис добы мен болат доптың қалай құлайтынын зерттеңдер.
2. Қозғалыс теңдеуі $y = 125 - 5t^2$ берілген дене қозғалысын зерттеңдер. Қанша уақыттан кейін дене координаталар басына келеді?

Талдаңдар

1. 3.10-суретте берілген координатаның уақытқа тәуелділік графигіне талдау жүргізіңдер. Суретте қандай қозғалыс көрсетілген? Дененің қозғалысы қалай өзгереді?
2. Координатаның уақытқа тәуелділік графигін қолданып (3.10-сурет), жолдың уақытқа тәуелділік графигін салыңдар.



3.10-сурет

Шығарыңдар

1. Дене бастапқы жылдамдықсыз еркін құлайды $H = 32$ м (3.11-сурет). h_1 , h_2 , h_3 және h_4 биіктіктерін табыңдар.

Жауабы: $h_1 = 2$ м; $h_2 = 6$ м; $h_3 = 10$ м; $h_4 = 14$ м

2. Үйдің төбесінен v_0 жылдамдықпен горизонталь бағытта тас лақтырылған. Егер тасты $4v_0$ жылдамдықпен лақтыратын болса, оның жерге түсу уақыты қалай өзгереді?

Жауабы: $t_1 = t_2$

3. Екі оқушы бір-біріне доп лақтырып ойнап жүр. Егер доптың бір ойыншыдан екіншіге ұшу уақыты 4 с болса, ойын кезінде доп қандай ең үлкен биіктікке көтеріледі?

Жауабы: 20 м

■ 4. 10 м/с жылдамдықпен вертикаль жоғары көтерілген аэростаттан құлаған бұрандама (болт) жерге 16 с кейін жетті. Бұрандама аэростаттан лақтырылған кезде аэростат қандай биіктікте болған? $g = 10$ м/с² және ауаның кедергісін ескермеңдер.

Жауабы: 1120 м

5. 20 м биіктіктен шар горизонталь лақтырылып, 12 м қашықтықта жерге құлады. Шардың бастапқы жылдамдығы мен құлау уақытын анықтаңдар.

Жауабы: $t = 2$ с; $v = 6$ м/с

*6. Зымыран $a = 2g$ үдеумен вертикаль жоғары қозғалады. 10 с кейін қозғалтқыш өшетін болса, ұшып шыққаннан кейін зымыран қандай уақытта жерге құлайды?

Жауабы: 55,5 с

7. Зеңбірек пен меже бір деңгейде бір-бірінен 5,1 км қашықтықта орналасқан. Бастапқы жылдамдығы 240 м/с болатын зеңбірек межеге қанша уақытта жетеді? $g = 10$ м/с².

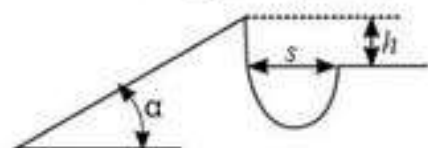
Жауабы: 25 с, 41 с

■ 8. 500 м биіктікте ұшып бара жатқан ұшақ бортынан қозғалатын нысанаға бомба тасталды. Ұшақ қозғалысының бағыты мен нысананың бағыты бірдей. Ұшақтың жылдамдығы 300 м/с, ал нысананың жылдамдығы 20 м/с. Нысанаға дәл тию үшін одан қандай қашықтықта горизонталь бағытта бомба тастау қажет? Бомба көкжиекке қандай бұрыш жасап құлайды? Ауа кедергісі ескерілмейді.

Жауабы: 2,8 км; 18°

*9. Мотоциклист шұңқырдың биік жағасына екпінмен шығады (3.12-сурет). Шұңқырдан секіріп өту үшін мотоциклисттің ең аз жылдамдығы қандай болуы керек?

$$\text{Жауабы: } v = \frac{S}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{2g}{2(h + stg\alpha)}}$$



3.12-сурет



Рефлексия

1. Қандай ұғымдар мен терминдер алдыңғы тақырыптан сендерге таныс?
2. Материалдың қандай бөлігін жақсы, қандай бөлігін нашар түсіндіңдер?
3. "Шығармашылық шеберхана" сендерге тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Here?

§ 4. Қисықсыздықты қозғалыс. Шеңбер бойымен қозғалыс



Тірек ұғымдар: қисықсыздықты қозғалыс, тангенциал және нормаль үдеу.

Бүгінгі сабақта: қисықсыздықты қозғалыстың ерекшеліктерімен танысасыздар.

Сендерге траекторияның пішініне байланысты түзусыздықты және қисықсыздықты қозғалыстар болатыны белгілі. *Қисықсыздықты қозғалысқа* толығырақ тоқталайық. Мұндай қозғалыста жылдамдық векторы әрқашан траекторияға жанама бойымен бағытталған және оның бағыты үнемі өзгеріп отырады. Еркінше таңдап алынған қисықсыздықты траектория бойымен материялық нүкте деп есептеуге болатын дененің қозғалысын қарастырайық (4.1-сурет). Дене A нүктесінен B нүктесіне қарай қозғалған кезде оның жылдамдығы модулі бойынша v_1 -ден v_2 -ге дейін артады. *Қисықсыздықты қозғалыс кезінде жылдамдық шамасы бойынша ғана емес, бағыты бойынша да өзгеретінін ескеруіміз қажет*. Демек, қисықсыздықты қозғалыс кезінде тангенциал үдеу де, нормаль үдеу де болады. Бұл жағдайда толық үдеу векторы уақыт бірлігі ішінде жылдамдық векторының өзгеруімен анықталады, яғни

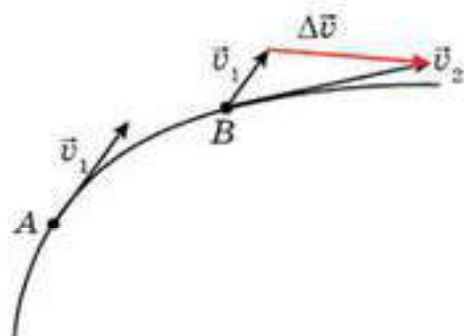
$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (4.1)$$

Түзусыздықты қозғалыс кезінде жылдамдық бағыты бойынша өзгермейді, демек, мұндай қозғалыста нормаль үдеу болмайды. Ал тангенциал үдеудің модулін мына формуламен есептеуге болады:

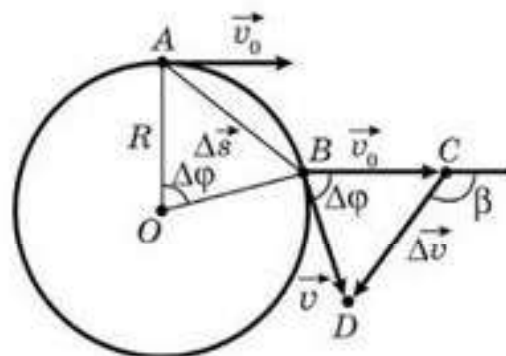
$$a_t = \frac{v - v_0}{t}. \quad (4.2)$$

Нормаль үдеу шамасын есептеу үшін нүктенің шеңбер бойымен бірқалыпты қозғалысын қарастырайық (4.2-сурет). Бұл жағдайда толық үдеу шамасы нормаль үдеуге тең. Ал анықтама бойынша толық үдеу

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$



4.1-сурет



4.2-сурет

Бұл жағдайда осы формула бойынша нормаль үдеудің шамасын есептеуге болады. $\triangle OAB$ және $\triangle BCD$ үшбұрыштарын қарастырайық. Олар теңбүйірлі. Төбелеріндегі бұрыштар бірдей (сәйкес қабырғалары перпендикуляр бұрыштар). Олай болса, $\triangle OAB$ үшбұрышы $\triangle BDC$ үшбұрышына ұқсас. Үшбұрыштардың ұқсастығынан

$$\frac{|\Delta \vec{v}|}{v} = \frac{|\vec{s}|}{R} \Rightarrow |\Delta \vec{v}| = \frac{v|\vec{s}|}{R}.$$

A және B нүктелері бір-біріне өте жақын орналасса, онда олардың арасындағы доға ұзындығы мен $\Delta \vec{s}$ орын ауыстыру векторы бір-бірімен сәйкес келеді деп есептеуге болады. Бұл жағдайда орын ауыстыру векторының модулін табамыз: $|\Delta \vec{s}| = v \Delta t$. Сонда

$$|\vec{a}| = \frac{|\Delta \vec{v}|}{\Delta t} = \frac{vv\Delta t}{R\Delta t} = \frac{v^2}{R},$$

яғни нормаль үдеудің модулін

$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (4.3)$$

формуласы бойынша есептейді.

Бұл үдеуді *центрге тартқыш үдеу* деп атайды, өйткені ол материялық нүкте қозғалатын шеңбер радиусының центріне қарай бағытталған.

Материялық нүктенің шеңбер бойымен бірқалыпты қозғалысы кезінде нормаль үдеудің модулі тұрақты болып қалғанмен, оның бағыты үздіксіз өзгеріп отыратындықтан, нүктенің қозғалысы теңүдемелі болатынына назар аударындар.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қисықсызықты қозғалыс деп қандай қозғалысты айтады?
2. Жылдамдығы өзгермейтін қисық сызық бойымен қозғалыс бірқалыпты бола ма? Жауаптарыңды негіздендер.
3. Қисықсызықты қозғалыс кезіндегі үдеудің бағыты қандай?
4. Қисықсызықты қозғалыс кезіндегі нүктенің лездік жылдамдығының бағыты қандай?
5. Нүктенің шеңбер бойымен бірқалыпты қозғалысы теңүдемелі бола ма?
6. Тангенциал үдеуі нөлге тең болатын қисықсызықты қозғалысқа мысалдар келтірiндер .



Рефлексия

1. Қандай ұғымдар мен терминдер алдыңғы тақырыптан сендерге таныс?
2. Материалдың қандай бөлігін жақсы, қандай бөлігін нашар түсіндіңдер?
3. "Шығармашылық шеберхана" сендерге тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 5. Айналымы қозғалысы



Тірек ұғымдар: айналымы қозғалысы, бұрыштық орын ауыстыру, жылдамдық және үдеу, айналу периоды және жиілігі.

Бүгінгі сабақта: айналымы қозғалыспен және оны сипаттайтын шамалармен танысыңыздар.

Айналымы қозғалысы деп центрлері айналу осі болып табылатын бір түзудің бойында жататын, барлық нүктелері шеңберлер сызатын дененің қозғалысын айтады.

Айналымы қозғалысы кезінде дененің әртүрлі нүктелері түрліше траекториялар сызады, әртүрлі сызықты жылдамдықпен және үдеумен қозғалады; бірдей уақыт аралығында әртүрлі орын ауыстырулар жасайды және әртүрлі жолдарды жүріп өтеді. Дененің барлық нүктелері үшін бұрылу бұрышы, бұрыштық жылдамдық және бұрыштық үдеу бірдей болып табылады, демек, олар тұтастай алғандағы дененің қозғалысын сипаттайды.

Бұрыштық орын ауыстыру деп берілген уақыт мезетінде дене бұрылатын бұрышты айтады. Бұрыштық орын ауыстыру Φ әрпімен белгіленеді және радианмен өлшенеді, яғни $[\Phi] = \text{рад}$.

Бұрыштық жылдамдық деп айналу шапшаңдығын сипаттайтын және уақыт бірлігінде бұрылу бұрышының өзгерісімен сипатталатын физикалық шаманы айтады, яғни

$$\omega = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (5.1)$$

Бұрыштық жылдамдықтың өлшем бірлігі: $[\omega] = \text{рад/с}$.

Егер дененің кез келген нүктесі бірдей уақыт аралығында бірдей бұрыштық орын ауыстыру жасаса, ондай айналымы қозғалысы *бірқалыпты* деп аталады, яғни $\omega = \text{const}$. Бірқалыпты айналымы қозғалыстың теңдеуі:

$$\Phi = \Phi_0 + \omega t. \quad (5.2)$$

Егер айналу процесінде бұрыштық жылдамдық өзгеріп отырса, онда айналымы қозғалысы *айнымалы* деп аталады. Бұрыштық жылдамдықтың уақыт бойынша өзгеру шапшаңдығын ϵ *бұрыштық үдеу* деп аталатын физикалық шамамен сипаттайды.

Бұрыштық үдеу деп бұрыштық жылдамдықтың уақыт бірлігінде өзгеруімен анықталатын физикалық шама түсініледі, демек,

$$\epsilon = \frac{\omega - \omega_0}{t}. \quad (5.3)$$

Бұрыштық үдеудің өлшем бірлігі: $[\epsilon] = \text{рад/с}^2$.

Егер дененің кез келген нүктесі бірдей уақыт аралығында өзінің бұрыштық жылдамдығын бірдей шамаға өзгертсе, онда мұндай айналмалы қозғалыс *теңайнымалы* деп аталады, яғни $\varepsilon = \text{const}$.

Теңайнымалы айналмалы қозғалыс үшін бұрыштық жылдамдық пен бұрыштық орын ауыстырудың теңдеулері

$$\omega = \pm \omega_0 \pm \varepsilon t \quad (5.4)$$

және

$$\phi = \phi_0 \pm \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad (5.5)$$

түрінде жазылады. Материялық нүктенің айналмалы қозғалысы шеңбердің белгілі бір радиусын сипаттайды. Бірқалыпты айналмалы қозғалыс циклді түрде қайтланады. Толық бір айналым жасауға кететін уақыт аралығы *айналу периоды* $[T]$ деп аталады. Егер t уақыт ішінде N айналым жасалса, онда период мына формуламен анықталады:

$$T = \frac{t}{N}. \quad (5.6)$$

Өртүрлі денелердің бірқалыпты айналуы олардың уақыт бірлігі ішінде жасайтын айналым санымен ерекшеленуі мүмкін. Сондықтан бірқалыпты айналмалы қозғалыстың тағы бір сипаттамасы — *айналу жиілігі* $[V]$ нгізіледі. Егер t уақыт ішінде N айналым жасалса, онда жиілік мына формуламен анықталады:

$$V = \frac{N}{t}. \quad (5.7)$$

Бұдан период пен жиіліктің бір-біріне кері пропорционал шамалар екенін байқаймыз: $V = \frac{1}{T}$.

Бірқалыпты айналмалы қозғалыс кезінде дененің периодқа тең уақыт аралығында бір айналым жасайтынын ескере отырып, бұрыштық жылдамдықты *циклдік жиілік* деп атайды:

$$\omega = \frac{\phi}{t} = \frac{2\pi}{T}. \quad (5.8)$$

Сызықтық және бұрыштық кинематикалық шамалар бір-бірімен байланысқан. Геометрия курсынан сендерге араларындағы бұрышы ϕ тең болатын екі радиуска тірелетін доғаның ұзындығы $s = \phi R$ екені белгілі. Біздің жағдайда ϕ — дене t уақыт ішінде бұрылған бұрыш (бұрыштық орын ауыстыру), ал s — осы уақыт ішінде дененің берілген нүктесінің жүріп өткен жолы.

Дененің берілген нүктедегі сызықтық жылдамдығын

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\phi R}{t} = \omega R \quad (5.9)$$

формуласы бойынша анықтаймыз. Тангенциал және бұрыштық үдеулер арасында да байланыс бар: $a_t = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta \omega R}{\Delta t} = \epsilon R$.

Нормаль (центрге тартқыш) үдеуді де бұрыштық параметрлер арқылы өрнектеуге болады: $a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R = v\omega$.

Толық үдеу векторын бұрыштық шамалар арқылы өрнектейік: $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{\omega^4 R^2 + \epsilon^2 R^2} = R\sqrt{\omega^4 + \epsilon^2}$.

Сызықтық шамаларды айналу периоды бойынша да өрнектеп жазуға болады, мысалы, сызықтық жылдамдықты

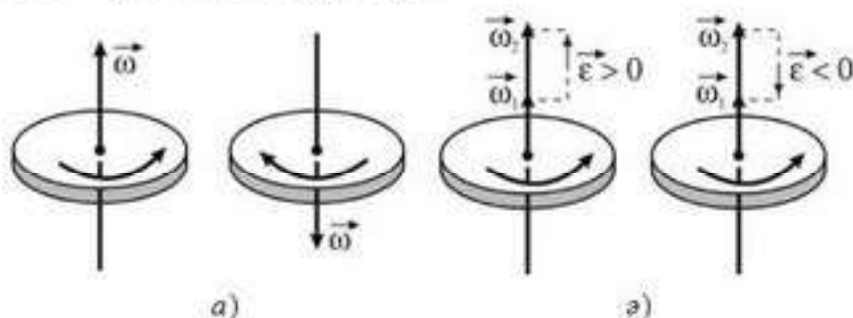
$$v = \frac{2\pi R}{T}, \quad (5.10)$$

ал нормаль үдеуді

$$a_n = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2} \quad (5.11)$$

формуласы бойынша анықтай аламыз. Бұрыштық шамалардың векторлық шамалар екенін ұмытпаған жөн. Бұл денелердің айналу бағытымен байланысты. Бұрыштық жылдамдық векторын айналу осінің бойымен оның кез келген нүктесінен салуға болады.

Бұрыштық жылдамдық векторының бағыты былай анықталады: егер оның соңғы ұшынан айналу осінде жатпайтын дененің кез келген нүктесінен қараса, онда біздің денеміздің айналуы сағат тілінің бағытына қарсы бағытта жүзеге асуы тиіс. Бұрыштық үдеу векторы да айналу осінің бойымен оның кез келген нүктесінен салынады, ал бағыты бұрыштық жылдамдықтың айырымы $\Delta \vec{\omega}$ векторының бағытымен анықталады (5.1, а, ә-суреттер).



5.1-сурет



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қисықсыздықты қозғалыстың айналымды қозғалыстан ерекшелігі неде?
2. Неліктен бұрыштық шамаларды енгізудің қажеттігі туындады?
3. Бұрыштық және сызықтық шамалар бір-бірімен қалай байланысқан?
4. Айналу периоды және жиілігі дегеніміз не? Олар бір-бірімен қалай байланысқан?
5. Бұрыштық жылдамдық және бұрыштық үдеу бағыттарын қалай анықтауға болады?

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Жер экваторындағы нүктелердің центрге тартқыш үдеуін анықтаңдар.

Берілгені: $R = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ $T = 24 \text{ сағ}$ <hr/> $a_n = ?$	<i>Шешуі.</i> Нормаль (центрге тартқыш) үдеу $a_n = \frac{v^2}{R}$ формуласымен есептеледі, мұндағы нүктелердің сызықтық жылдамдығын (біздің жағдайымызда экватор нүктелері) $v = \omega \cdot R$ формуласымен,
---	---

ал бұрыштық жылдамдықты айналу периоды арқылы өрнектейміз:
 $\omega = \frac{2\pi}{T}$, сонда $a_n = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2} R$, мұндағы T — Жердің өз осінен айналу периоды.

$$a_n = \frac{4 \cdot (3,14)^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}}{(24 \cdot 3600)^2 \text{ с}^2} = 0,034 \text{ м/с}^2 = 3,4 \text{ см/с}^2.$$

Жауабы : $a_n = 3,4 \text{ см/с}^2$

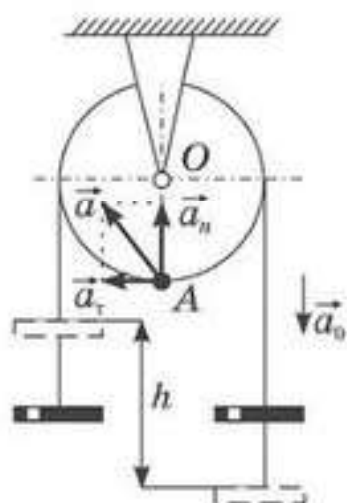
2-есеп. Бөлшек радиусы $R = 2 \text{ м}$ шеңбер бойымен бірқалыпты айналады. Оның жылдамдық векторы $t = 4 \text{ с}$ ішінде $\phi = \frac{\pi}{2}$ бұрышқа бұрылады. Бөлшектің центрге тартқыш үдеуін табыңдар.

Берілгені: $R = 2 \text{ м}$ $t = 4 \text{ с}$ $\phi = \frac{\pi}{2}$ <hr/> $a_n = ?$	<i>Шешуі.</i> $a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = \left(\frac{\phi}{t}\right)^2 R = \frac{\pi^2 R}{4t^2}$. $a_n = \frac{(3,14)^2 \cdot 2 \text{ м}}{4 \cdot 16 \text{ с}^2} = 0,308 \text{ м/с}^2 = 30,8 \text{ см/с}^2$.
---	--

Жауабы : $a_n = 30,8 \text{ см/с}^2$

3-есеп. Блок арқылы ұштарына бір деңгейде ілінген екі жүгі бар жіп асырылып тасталған (5.2-сурет). Қандай да бір күштердің әсерінсіз жүктер теңүдемелі қозғалысқа келеді. t уақыттан соң олардың бірі h биіктікте болады. Блоктың бұрылу бұрышын, бұрыштық жылдамдығын және уақыттың соңындағы A нүктесінің толық сызықтық үдеуін табыңдар. Жіптің блок бойымен сырғанауы ескерілмейді. Блоктың радиусы R .

Берілгені: h, t, R <hr/> $\phi = ?$ $\omega = ?$ $a = ?$	<i>Шешуі.</i> а) O нүктесін санақ басы ретінде алып, жүктің t уақыт ішіндегі h орын ауыстыруын, A нүктесінің \vec{a}_t жанама, \vec{a}_n нормаль және \vec{a} толық үдеуінің векторын сызбада көрсетейік.
---	---



5.2-сурет

Есептің шарты бойынша жіп блок бойымен сырғымайтындықтан, шеңбердің бойында жатқан барлық нүктелердің тангенциал үдеуінің абсолют шамасы жүктің үдеуіне тең: $a_t = a_0$.

ә) Жүктердің қозғалысы теңүдемелі және t уақыт ішінде олар бір-біріне қатысты h қашықтыққа ығысады. Әр жүктің қозғалыс теңдеуінің түрі мынадай: $\frac{h}{2} = \frac{a_0 t^2}{2}$, себебі жүктердің үдеулері бірдей болғандықтан, олардың әрқайсысы $\frac{h}{2}$ қашықтықты жүріп өтеді.

б) Блоктың теңүдемелі айналатынын ескеріп, айналмалы қозғалыс теңдеуін жазайық:

$$\omega = \varepsilon t \text{ және } \phi = \frac{\varepsilon t^2}{2}. \quad (1)$$

Блоктың ω бұрыштың жылдамдығы мен ε бұрыштық үдеуі A нүктесінің нормаль және тангенциал үдеулерімен мына формулалар арқылы байланысады:

$$\varepsilon = \frac{a_t}{R} \text{ және } a_n = \omega^2 R. \quad (2)$$

A нүктесінің толық үдеуі

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}. \quad (3)$$

в) Есептің шарты бойынша R , t және h берілгендіктен, құрылған теңдеулер жүйесінде a_0 , ω , ε , ϕ , a_n және a белгісіздер болып табылады. Теңдеулерді ϕ , ω , a белгісіздеріне қатысты шешіп, мыналарды табамыз:

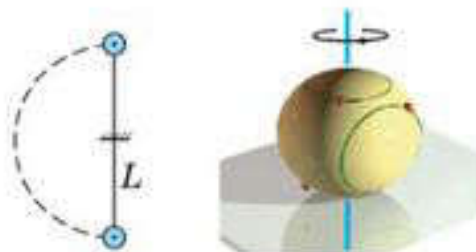
$$\phi = \frac{h}{2R}; \quad \omega = \frac{h}{Rt}; \quad a = \frac{h\sqrt{h^2 + R^2}}{Rt^2}.$$



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

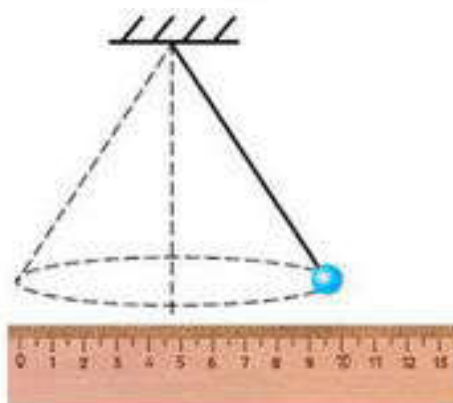
Бала вертикаль жазықтықта арқанға байланған допты бірқалыпты айналдырады. Бұл доп жазық үстел үстінде вертикаль оське қатысты да айналады (5.3-сурет). Доптың қозғалысын сипаттаңдар және қозғалыстардағы айырмашылықтар мен ұқсастықтарды атаңдар.



5.3-сурет

Тәжірибе жасаңдар

Кішкене шарды жіпке байлап, жіптің бір ұшын ұстап тұрыңдар. Шар сызғыштың 0 және 10 бөліктерінің арасында шеңбер сызып бірқалыпты айналмалы қозғалыс жасасын (5.4-сурет). Кішкене шардың бұрыштық жылдамдық модулін, айналу периодын және центрге тартқыш үдеуін анықтаңдар.



5.4-сурет

Түсіндіріңдер

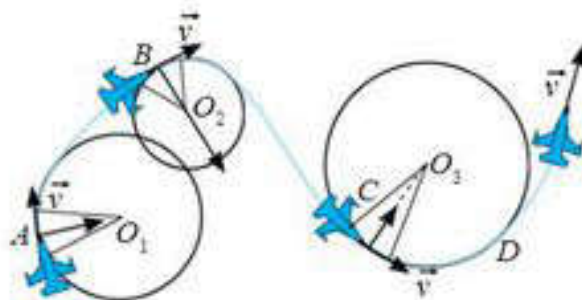
1. Қалай ойлайсыңдар, домалап бара жатқан дөңгелектің барлық нүктелері жерге қатысты бірдей жылдамдықпен қозғала ма?

2. Домалап бара жатқан велосипед дөңгелегінің неліктен жоғары біздері бірігіп, ал төменгі біздері бөлек көрінетінін түсіндіріңдер.

3. Неліктен диаметрі үлкен бұйымдарды жонғыш білдекпен айналдыра жону диаметрі кіші бұйымдарға қарағанда аз бұрыштық жылдамдықпен орындалады?

Талдаңдар

1. 5.5-суретте ұшақтың қандай қозғалысы суреттелген? Ұшақтың қозғалысы қалай өзгереді? Қандай нүктеде тангенциал және нормаль үдеулер максимал мәнге жетеді?



5.5-сурет

2. Кестеде берілген қозғалыстарды сипаттайтын формулаларды жазып, толтырыңдар.

Дененің түзусызықты ілгерілемелі қозғалысы	Қисықсызықты қозғалыс	Айналмалы қозғалыс

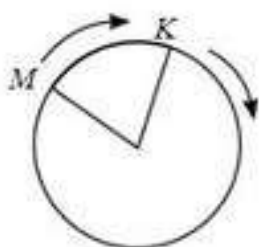
Шығарыңдар

1. Велосипед дөңгелегінің радиусы 40 см. Егер дөңгелек 120 айн/мин жасайтын болса, велосипед қандай жылдамдықпен қозғалады?

Жауабы: 5,44 м/с, 0,5 с

2. Белдікті берілістің үлкен тегершігінің радиусы 32 см және ол 120 айн/мин жиілікпен айналады. Кіші тегершіктің радиусы 24 см. Кіші тегершіктің бұрыштық жылдамдығын, айналу жиілігін және белдік нүктелерінің сызықтық жылдамдығын анықтаңдар.

Жауабы: $\omega_2 = 16,75 \text{ с}^{-1}$; 160 айн/мин; 4 м/с



5.6-сурет

■3. M және K екі нүкте шеңбер бойымен сәйкесінше 0,2 рад/с және 0,3 рад/с тұрақты бұрыштық жылдамдықтармен қозғалады (5.6-сурет). Бастапқы уақытта бұл нүктелер радиустарының арасындағы бұрыш $\pi/3$ болса, нүктелер қанша уақыттан кейін кездеседі?

Жауабы: 52,3 с

■4. Дөңгелек 2 рад/с^2 тұрақты бұрыштық үдеумен айналады. Қозғалыс басталғаннан 0,5 с уақыт өткеннен кейін дөңгелектің толық үдеуі $13,6 \text{ м/с}^2$ болды. Дөңгелек радиусын табыңдар.

Жауабы: 6,1 м

■5. Желдеткіш 15 с^{-1} жиілікпен айналады. Өшіргеннен кейін желдеткіш бірқалыпты баяу айнала отырып, тоқтағанға дейін 75 айналым жасады. Желдеткішті өшіргеннен бастап ол тоқтағанға дейін қанша уақыт өтті?

Жауабы: 10 с

6. Дөңгелек жиегіндегі нүктелердің сызықтық жылдамдығы оның осіне 5 см жақын нүктелердің сызықтық жылдамдығынан 2,5 есе үлкен. Дөңгелектің радиусын табыңдар.

Жауабы: 10 см

7. Радиусы 30 см тегістегіш тас (шлифовальный камень) 12 секундта 20 айналым жасайды. Тас дөңгелегінің сызықтық жылдамдығын табыңдар.

Жауабы: 3,14 м/с

Рефлексия

1. Қандай ұғымдар мен терминдер алдыңғы тақырыптан сендерге таныс?
2. Материалдың қандай бөлігін жақсы, қандай бөлігін нашар түсіндіңдер?
3. "Шығармашылық шеберхана" сендерге тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?



1 тараудың ең маңыздысы

Кинематика — денелердің қозғалысын оны тудыру себептерін ескермей зерттейтін механиканың бөлімі. Кинематиканың негізгі мәселесі кеңістіктегі дененің кез келген уақыт мезетіндегі орнын анықтау болып табылады. Ол үшін санақ денесі, координаталар жүйесі және уақытты есептеу құралынан тұратын санақ жүйесі таңдалады. Дененің түзу бойындағы, жазықтықтағы немесе кеңістіктегі орнын радиус-векторымен анықтайды.

Бірқалыпты үдемелі түзусызықты қозғалыс кезінде төмендегі формулалар орындалады:

$$1. x = \pm x_0 \pm v_{0x}t \pm \frac{a_x t^2}{2};$$

$$2. v_x = \pm v_{0x} \pm a_x t;$$

$$3. y = \pm y_0 \pm v_{0y}t \pm \frac{a_y t^2}{2};$$

$$4. v_y = \pm v_{0y} \pm a_y t.$$

Түзусызықты бірқалыпты қозғалыс кезінде мына формулалар қарастырылады: 1. $x = \pm x_0 \pm v_{0x}t$; 2. $v_x = \pm v_{0x}$; 3. $y = \pm y_0 \pm v_{0y}t$; 4. $v_y = v_{0y}$.

Еркін түсу — ауырлық күшінің әсерінен болатын бірқалыпты үдемелі қозғалыстың дербес жағдайы ауырлық күші әсерінен болады. Жер бетіндегі еркін түсу үдеуі $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ тең.

Егер дене қисықсызықты қозғалса, қозғалыстардың тәуелсіздік принципі қолданылады, яғни Ox және Oy осьтеріндегі дененің қозғалысы бір-бірінен тәуелсіз қарастырылады.

Қисықсызықты қозғалыс кезінде траекторияның жанамасы бойымен бағытталған тангенциал үдеуді және шеңбер радиусының бойымен центрге бағытталған нормаль үдеулерді қолданған ыңғайлы $a_t = \frac{v - v_0}{t}$, $a_n = \frac{v^2}{R}$.

Айналмалы қозғалыс кезінде дененің нүктелері центрлері айналу осі болып табылатын түзудің бойында жататын шеңберлер сызады. Айналмалы қозғалысты қарастырған кезде бұрыштық орын ауыстыру, жылдамдық, үдеу сызықтық шамалармен мынадай қатынаста болады: $s = \phi R$; $v = \omega R$; $a_t = \epsilon R$, мұндағы s , v , a_t — сызықтық орын ауыстыру, жылдамдық және жанاما үдеу; ϕ , ω , ϵ — бұрыштық орын ауыстыру, жылдамдық және үдеу.

Дененің шеңбер бойымен бірқалыпты қозғалған жағдайда мына формулалар ақиқат: $\omega = \frac{\phi}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$; $\epsilon = \frac{\omega - \omega_0}{t}$; $a_n = \omega^2 R$.

Толық үдеудің векторы нормаль және тангенциал үдеулерінің қосындысына тең: $a = \sqrt{\left(\frac{v^2}{R}\right)^2 + (\epsilon R)^2} = R\sqrt{\omega^4 + \epsilon^2}$.

2-тарау. ДИНАМИКА

§ 6. Ньютонның бірінші заңы.
Инерциялық санақ жүйелері

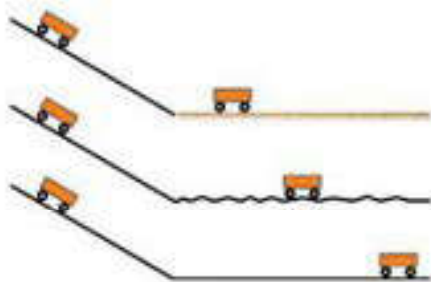
Тірек ұғымдар: инерциялық санақ жүйелері, қозғалыс және тыныштық, еркін қозғалған дене, инерттілік, инерция, Ньютонның бірінші заңы.

Бүгінгі сабақта: тыныштық және қозғалыс денелердің табиғи күйі екенін білесіңдер; инерциялық санақ жүйелерімен, Ньютонның бірінші заңымен танысасыңдар.

Динамика — механикалық қозғалысты, оның пайда болу себептерін ескере зерттейтін механиканың бөлімі, яғни динамикада біз қарастырылатын дененің қозғалыс сипатын анықтайтын себептерді білетін боламыз.

Адамзат баласы ежелден-ақ қозғалыстың себептері не болып табылады деген сұраққа жауап беруге талпыныс жасады. Бұл сұраққа бірінші болып Аристотель жауап қайтарған болатын. Аристотельдің ойынша, Жерге қатысты денелердің табиғи күйі тыныштық болып табылады және ол ұзақ уақыт бойы сақталуы мүмкін. Қозғалыс дененің өзіне тән емес, өйткені ол *тыныштық* күйі сияқты дене үшін табиғи күй болып табылмайды. Қозғалыс әрқашан себепті талап етеді. Себепсіз — сырттан әсер болмаса қозғалыс басталмайды және ұзақ уақыт бойы бола да алмайды.

Галилейдің көлбеу жазықтық бойымен денелердің сырғанауын зерттеу мақсатында жасаған атақты тәжірибесінен көлбеу жазықтық бойымен сырғанап келе жатқан дененің әрі қарайғы қозғалысы оның горизонталь бет бойымен жалғасқан қозғалысына байланысты болады (6.1-сурет). Егер бұл бетке құм төселген болса, онда қозғалыс тез тоқтайды, ал егер бет шыны немесе өте жақсы тегістелген мәрмәр бет болса, қозғалыс ұзақ уақыт бойы жалғасады. Егер ойша бетті идеал тегіс деп қарастырсақ, онда қозғалыс тіпті де тоқтамаған болар еді. Аристотель дененің тоқтауының себебі дене мен бет арасындағы үйкеліс екенін байқамаған еді.



6.1-сурет

Қозғалыс тыныштық күйі сияқты денеге тән екенін және оған ешқандай себептің қажет емес екенін түсіну үшін Г. Галилейдің ойша тәжірибесі және оның еркін денелер Жерге қатысты бірқалыпты және түзусызықты қозғалады деген ой тұжырымдауы қажет болды.

Галилейдің тәжірибелерінен қозғалыс тыныштық күйі сияқты дененің табиғи күйі бола тыны шығады. Ньютон Галилейдің тә-

жірибелері мен қорытындыларын тақдай отырып, дененің тыныштық күйі мен бірқалыпты түзусызықты қозғалысы сақталуы үшін ешқандай сыртқы әсердің қажет емес екенін дәлелдеді. *Инерттілік* деп аталатын дененің динамикалық қасиеті осыдан көрініс табады. *Дененің тыныштық күйін немесе бірқалыпты түзусызықты қозғалыс күйін сақтауға ұмтылуы инерттілік деп аталады.*

Сондықтан да Ньютонның бірінші заңын *инерция заңы*, ал басқа денелер тарапынан сыртқы әсер болмаған кездегі дененің қозғалысын *инерция бойынша қозғалыс* деп атайды.

Механикалық қозғалыс салыстырмалы: бір-біріне қатысты қозғалатын санақ жүйелеріндегі бір дене үшін оның сипаты әртүрлі болуы мүмкін. Мысалы, Жердің жасанды серігінің бортындағы ғарышкер серікпен байланысты санақ жүйесіне қатысты қозғалмайды, сонымен қатар ол серікпен бірге эллипстік орбита бойымен Жерге қатысты бірқалыпсыз және қисықсызықты қозғалады.

Демек, Ньютонның бірінші заңы кез келген санақ жүйелерінде орындала алмайды. Мысалы, бірқалыпты және түзусызықты қозғалып келе жатқан пойыздың еденінде жатқан шар оған басқа денелер тарапынан ешқандай әсер болмай-ақ қозғалысқа келуі мүмкін. Ол үшін пойыздың қозғалыс жылдамдығының өзгере бастауы жеткілікті.

Егер денеге басқа дене әсер етпесе және ол түзусызықты, бірқалыпты қозғалса, онда ондай санақ жүйесі қолайлы болады.

Ньютон тәжірибелік деректерді қорытындылай отырып, Галилейдің тұжырымын Жермен байланысқан санақ жүйелеріне ғана емес, сансыз көп *инерциялық санақ жүйелері* үшін де ақиқаттығын дәлелдеді.

Инерциялық санақ жүйесі деп еркін дене бірқалыпты және түзусызықты қозғалатын немесе тыныштық күйін сақтайтын санақ жүйесін айтады.

Ньютонның бірінші заңы былай тұжырымдалады: **егер денеге басқа денелер әсер етпесе немесе оларға әсер ететін басқа денелердің әсері теңгерілген болса, онда инерциялық деп алынған санақ жүйелеріне қатысты дене өзінің жылдамдығын өзгертпей сақтайды.**

Ньютонның бірінші заңынан кез келген еркін дененің табиғи күйі бірқалыпты және түзусызықты қозғалыс немесе тыныштық күйі болып табылатыны шығады. Бұл тыныштық күйі мен бірқалыпты түзусызықты қозғалыс еркін дененің теңқұқықты күйі болып табылатынын білдіреді.

Ньютонның бірінші заңының мазмұны нақтысында екі тұжырымға саяды: біріншіден, барлық денелерге инерттілік қасиет тән және екіншіден, инерциялық санақ жүйелерінің бар болуы.

Егер санақ жүйесін 6.2, 6.3, 6.4-суреттердегі көрсетілген денелермен қатысты қарастырсақ, онда қай санақ жүйесі инерциялы?



6.2-сурет. Трактор бірқалыпты түзусызықты қозғалады



6.3-сурет. Автомобильдің тежелуі



6.4-сурет. Ұшақ бірқалыпты жылдамдықпен бір биіктікте ұшады

Кез келген екі инерциялық санақ жүйелері бір-біріне қатысты ілгерілемелі және де тек бірқалыпты және түзусызықты қозғала алады. Тәжірибе жүзінде Күнмен байланысқан санақ жүйесін инерциялық деп есептеуге болатыны анықталған.

Координаталық осьтері Жермен қатаң байланысқан *зертханалық санақ жүйесі*, негізінен, Жердің өз осінен тәуліктік айналуына байланысты инерциялық санақ жүйесі бола алмайды. Алайда Жер өз осінен баяу айналатындықтан, оның беткі нүктелерінің тәуліктік айналымдағы максимал нормаль үдеуі 34 мм/с^2 -ден артапайды. Сондықтан көптеген практикалық есептеулерде зертханалық санақ жүйесін, жуықтап алғанда, инерциялық санақ жүйесі деп есептеуге болады.

Инерциялық санақ жүйелері тек механикада ғана емес, физиканың басқа да бөлімдерінде маңызды рөл атқарады. Бұл Эйнштейннің салыстырмалылық принципіне сәйкес кез келген физикалық заңның математикалық өрнегінің түрі барлық инерциялық санақ жүйелерінде бірдей болуы тиіс екенімен байланысты. Табиғатта инерциалды емес санақ жүйелері болады. Ондай санақ жүйелері салыстырмалы инерциялық жүйеге қатысты үдеу арқылы қозғалады. Ондай жүйеде Ньютон заңдары жұмыс істеу үшін инерция күштері деген ұғымды енгіземіз. Ал оларды жоғары сыныпта қарастырамыз.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Неліктен дене өз-өзінен тоқтай алмайды немесе үдей қозғала алмайды?
2. Инерция деп қандай құбылысты айтады?
3. Арбашалармен жүргізілген тәжірибеден кейін Г. Галилей қандай қорытындыларға келді?
4. Инерциялық санақ жүйелері деп қандай санақ жүйелерін айтады?
5. Инерциялық емес санақ жүйелері деп қандай санақ жүйелерін айтады?
6. Автобус кенеттен тежелгенде немесе жылдамдығын бірден өзгерткенде жолаушылардың құлап кетуі мүмкін екенін қалай түсіндіруге болады?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Үстелдің үстінде тұрған кітаптың бетіне теннис добын қойыңдар. Кітапты қозғалтсақ, нені байқауға болады? Түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

1. Неліктен құлаштап ұру арқылы ағаш шөркесін бөлшектеп жарған оңай?
2. Санақ жүйесі автокөлікпен байланыстырылған. Егер автокөлік: 1) горизонталь бет бойымен бірқалыпты және түзусызықты; 2) горизонталь бет бойымен үдемелі; 3) шеңбер бойымен бірқалыпты; 4) бірқалыпты таумен жоғары; 5) таудан төмен қарай бірқалыпты; 6) таудан төмен қарай үдемелі қозғалатын болса, санақ жүйесі инерциалды бола ма?
3. Кілемді ұру арқылы шаңнан тазалау неге негізделген? Ал сілкілеу арқылы ше?
4. Инерция құбылысы болмаған жағдайда Күн мен Жер қалай қозғалар еді?

Зерттеңдер

Вагон тосыннан тоқтаған кезде қозғалып бара жатқан вагондағы адамдар қай бағытқа қарай еңкейеді?

Талдаңдар

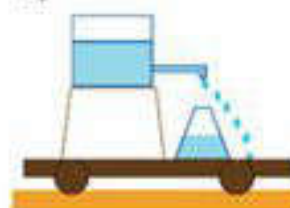
1. Автокөлік қозғалтқышын сөндіріп горизонталь шоссе бойымен қозғалып келеді. Оның қозғалысын инерциялық қозғалысқа жатқызуға бола ма?
2. Су тамшыларына қарап, арба қалай қозғалып келе жатқанын анықтаңдар (6.5-сурет).

Ойлап табыңдар

Инерция құбылысына тәжірибелік мазмұндағы есеп ойластырыңдар.



a)



ә)



б)

6.5-сурет

Рефлексия

1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба, жоқ көмек қажет пе?
2. "Шығармашылық шеберхана" айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?

§ 7. Дененің массасы. Күш. Ньютонынң екінші заңы



Тірек ұғымдар: дененің массасы, күш, Ньютонынң екінші заңы.

Бүгінгі сабақта: инерттілік және гравитациялық массаның физикалық мғығысын түсінесіңдер; Ньютонынң екінші заңын қолдануды үйренесіңдер.

Динамикада механикалық қозғалысты зерделеу үшін ерекше физикалық шамалар — *масса* мен *күш* енгізіледі.

Дененің массасы. Бір дене екінші бір денеге әсер еткен кезде олардың жылдамдықтары өзгеріп, дене үдеу алады. Бұл әсерлесуде әртүрлі денелер түрліше үдеу алады, яғни сыртқы әсерге түрліше ықпал жасайды.

Әр дененің өзінің бірқалыпты түзусызықты қозғалыс немесе тыныштық күйін сақтауға ұмтылуы инерттілік деп аталады.

Демек, дененің жылдамдығын белгілі бір шамаға өзгерту үшін оған баска дене әсер етуі және бұл әсер қандай да бір уақыт ішінде өтуі тиіс.

Инерттілік — барлық денелерге тән қасиет. Инерттілікті сандық жағынан сипаттау үшін инерттік масса ұғымы енгізілген.

Өзара әсерлесу нәтижесінде жылдамдығын азырақ өзгертетін денені инерттеу деп айтады және оның массасы көбірек болады, яғни массасы көбірек дене азырақ үдеу алады:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2} \quad (7.1)$$

(7.1) формуланың массалары әртүрлі екі арбаны соқтығысқаннан кейінгі арақашықтықтарын өлшеуге арналған тәжірибе арқылы оңай есептеуге болады. Осы тәжірибені 7-сынып физика курсынан естеріңе түсіріңдер.

ХБ жүйесіндегі массаның өлшем бірлігі килограмм (кг) болып табылады.

Масса — күрделі физикалық ұғым. Ол материяның әртүрлі физикалық қасиеттерін бейнелейді.

Дененің инерттілігінің өлшемі ретіндегі массамен қатар, гравитациялық масса да болады, ол масса гравитациялық өзара әсерлесу өлшемі болып табылады және Бүкіләлемдік тартылыс заңына кіреді.

Салыстырмалылықтың арнайы теориясы бойынша масса мен $E = mc^2$ энергияның арасындағы байланыс массасы дененің толық жергіясының өлшемі болып табылады. Бұл — атақты Эйнштейннің формуласы.

Бұл массалар материяның әртүрлі қасиетін сипаттағанымен, тәжірибелер мен есептеулер бойынша олардың сандық мәндері бірдей болатынын көрсетеді.

Дененің массасының *аддитивті* (қосу жолымен алынатын) қасиеті бар: екі денені біріктірген кезде олардың массалары қосылады. Масса-

сының *аддитивті* қасиеті макроскопиялық денелер үшін өте дәл орындалады және тек дененің құрамды бөліктерінің өзара әсерлесу энергиясы өте үлкен болса, мысалы, протондар мен нейтрондардың атом ядросына бірігуі кезінде бұзылады.

Дененің массасын анықтаудың екі негізгі тәсілі бар:

1) массасы белгісіз дене мен масса эталонының өзара әсерлесу кезіндегі үдеулерін салыстыру арқылы $\left(m_x = \frac{a_x}{a_s} m_s\right)$;

2) иінді таразыларда өлшеу жолымен.

Классикалық механикада:

1) дененің массасы оның қозғалыс жылдамдығына тәуелді емес;

2) дененің массасы оны құрайтын барлық бөлшектердің (материялық нүктелердің) массаларының қосындысына тең;

3) берілген денелер жүйесі үшін массаның сақталу заңы орындалады: денелер жүйесінде туындайтын кез келген процестерде оның массасы өзгеріссіз қалады деп есептеу қабылданған.

Күш. Денеге басқа денелер әсер еткенде оның пішіні немесе өлшемі (дене деформацияланады), немесе дененің жылдамдығы (дене үдеу алады), немесе бір мезгілде олардың барлығы да өзгеруі мүмкін.

Нәтижесінде денелер үдеу алатын немесе деформацияланатын бір дененің екінші бір денеге әсерін сипаттайтын физикалық шаманы күш деп атайды. Демек, күш пайда болу үшін оған белгілі бір дене қажет. Денеге қанша дене әсер етсе, сонша күштермен әсерлеседі.

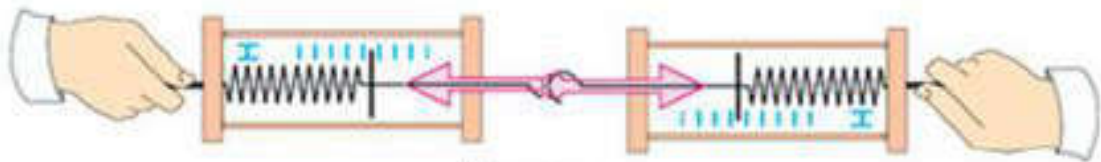
\vec{F} күші — векторлық шама. Ол модулімен (сандық мәнімен), түсірілу нүктесімен, кеңістіктегі бағытымен, әсер ету уақытымен және ол әсер ететін ауданмен сипатталады. Бойымен күш векторы бағытталған түзу күштің *әсер ету сызығы* деп аталады.

Қатты денеге күштің түсірілу нүктесін оның денеге әсер ету нәтижесін өзгертпей, оның әсер ететін OO' сызығының бойында ғана көшіруге болады.

ХБ жүйесіндегі күштің өлшем бірлігі — ньютон (Н). Күшті динамометрдің көмегімен өлшейді.

Денелердің өзара әсерлесуі. Денелердің өзара әсерлесуіне көптеген мысалдар келтіруге болады. Егер сендер қайықта отырып, басқа қайықты арқанмен тартсаңдар, онда сендердің қайықтарың міндетті түрде алға қарай жылжиды. Басқа қайыққа әсер ете отырып, оны да сендердің қайықтарыңа әсер етуге мәжбүр етесіңдер.

Егер допты аяқпен тепсеңдер, онда бірден доптың да аяққа түсіретін әсерін бірден сезесіңдер. Екі бильярд шары соқтығысқан кезде олардың екеуі де жылдамдықтарын өзгертетін болады. Мұның бәрі денелердің өзара әсерлесуінің көрініс табуының нәтижесі.



7.1-сурет

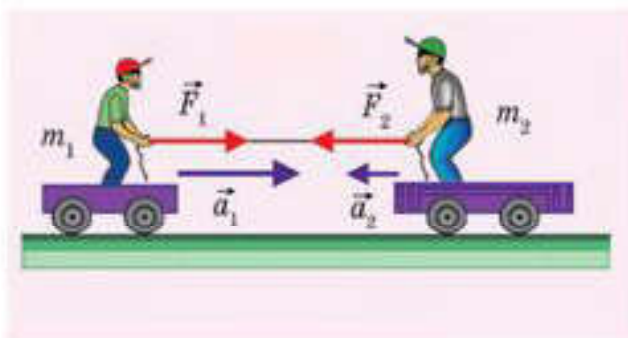
Денелердің өзара әсерлесуі денелер тікелей жанаспаған кезде де болуы мүмкін.

Жер өзіне Айды тартады (Бүкіләлемдік тартылыс күші) және оны қисықсызықты траектория бойымен қозғалуға мәжбүр етеді; өз кезегінде Ай да Жерді өзіне тартады (бұл да Бүкіләлемдік тартылыс күші). Жермен байланысқан санақ жүйесінде бұл күштің әсерінен туындайтын Жердің үдеуін тікелей бақылау мүмкін емес, алайда ол теңіздің толысу құбылысы түрінде көрініс табады.

Екі дененің өзара әсерлесуі өзара қалай байланысқанын тәжірибенің көмегімен анықтайық. Күшті өлшеуге арналған қарапайым тәжірибелер қарастырайық.

1-тәжірибе. Екі динамометр алып, оларды бір-біріне ілгішпен іліп, сақиналарынан ұстап тұрып екі жаққа қарай созайық (7.1-сурет). Созу кезіндегі екі динамометрдің де көрсеткіштерін бақыласақ, кез келген созу кезінде олардың көрсеткіштері бірдей болады. Демек, бірінші динамометрдің екіншісіне әсер ететін күші екінші динамометрдің біріншісіне әсер ететін күшіне тең болады.

2-тәжірибе. Рельстердің үстімен сырғанайтын екі арбашаның үстінде екі адам тұрсын (7.2-сурет). Олар арқанның екі жақ ұштарынан ұстаған. Арқанды олардың қайсысы тартса да немесе екеуі қатар тартса да, арбашалар бір мезгілде қозғалысқа келеді, ал олардың қозғалыс бағыттары қарама-қарсы. Арбашалардың үдеулерін есептесек, олардың адамымен қоса алғанда алатын үдеулері массаларына кері пропорционал болатынын көрсетеді. Бұдан арбашаларға әсер етуші күштердің модулі бойынша тең болатыны шығады. Егер жіпті үзіп, оған екі динамометр орнатсақ, олар бірдей мән көрсететінін байқауға болады. Бұл әсер ететін күштер тең екенін дәлелдейді.



7.2-сурет



7.3-сурет

Ньютонаң екінші заңы. Дененің жылдамдығы қандай жағдайда өзгереді? Ньютон *дене жылдамдығының өзгеру себебі оған әсер ететін тең әсерлі күш болып табылатынын* дәлелдеді. Бұл әсердің нәтижесі тұтас дененің үдеу алуы немесе оның бөлігінің деформациялануы болып табылады.

Ньютон көптеген тәжірибелер мен бақылаулар жүргізе отырып, *денелер қозғалысының негізгі заңын* тұжырымдады. Сұлбасы 7.3-суретте көрсетілген тәжірибе көмегімен оны көрнекі түрде көрсетуге болады. Тамызғыштан бірдей уақыт аралығында таматын тамшылардың арақашықтығын өлшей отырып, арбаша үдеуінің шамасын анықтайық. И. Ньютон дәл осылай дененің үдемелі қозғалысын тудырған күш пен оның үдеуінің арасындағы байланысты анықтаған болады.

Ньютонаң екінші заңы былай тұжырымдалады: **дененің алатын үдеуінің шамасы оған әсер етуші тең әсерлі күштің шамасына тура пропорционал және дене массасына кері пропорционал, ал үдеу векторы тең әсерлі күштің әсер ету бағытымен бағытталады:**

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (7.2)$$

Тең әсерлі күш деп денеге түсірілген барлық күштердің әсеріндегі әсер жасайтын күшті айтады. Тең әсерлі күшті денеге әсер етуші күштердің векторлық қосындысы ретінде анықтайды:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n. \quad (7.3)$$

(7.2) формуладан тең әсерлі күш дене массасының оның алған үдеуіне көбейтіндісі ретінде табылуы мүмкіндігі шығады:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (7.4)$$

(7.4) өрнегі **динамиканың негізгі заңы атауына ие болды.**

Дәл осы Ньютонаң екінші заңы барлық классикалық механикаға ерекше сипат береді, яғни барлық физикалық дүние ең сезімтал хронометр тәрізді әсер қалдырады. Егер сендерге кеңістік координаталары мен әлемдегі барлық нүктелердің жылдамдықтары және барлық әсер етуші күштердің бағыты мен шамасы көрсетілсе, онда оның кез келген болашақтағы күйін болжап айтуға болады. Зат табиғатына дәл осындай көзқарас кванттық механика пайда болғанға дейін рас болып тұрды.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Денелер өзара әсерлескенде қандай құбылыс байқалады?
2. Қандай шама инерттілікті сан жағынан сипаттайды?
3. Күштің әсерлесуін сипаттау үшін не білу қажет?
4. Денеге қанша күш әсер етіп тұрғанын қалай білуге болады?
5. Ньютонаң екінші заңының мәні неде?
6. Неліктен лезде тоқтауға немесе лезде үлкен жылдамдық алуға болмайды?

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Жеңіл қораптың көмегімен екі шариктің қайсысы ауыр екенін анықтаңдар.

Түсіндіріңдер

1. Бір нүктеге түсірілген модульдері жағынан тең үш күштің тең әсер күші нөлге тең болуы мүмкін бе?
2. Қандай жағдайда дене а) бірқалыпты; ә) үдемелі қозғалады?

Шығарыңдар

1. Массасы 2 кг дене белгілі бір күштің әсерінен 2 м/с^2 үдеумен қозғалады. Массасы 5 кг дене дәл сол күштің әсерінен қандай үдеумен қозғалады?

Жауабы: $0,2 \text{ м/с}^2$

2. Автомобильдің массасы 1,8 т. Автомобиль жылдамдығы $v_x = 10 + 0,5t$ заңымен өзгереді. Автомобильге әсер ететін тең әсерлі күштің мәні неге тең?

Жауабы: 900 Н

3. Дене 20 Н күштің әсерінен $2,5 \text{ м/с}^2$ үдеумен қозғалады. Дененің массасы қандай?

Жауабы: 8 кг

4. Массасы 1,5 кг дененің қозғалысы $x = 2t + 0,4t^2$ теңдеуімен сипатталады. Денені қозғалысқа түсірген күштің модулін есептеңдер.

Жауабы: 1,2 Н

5. Массасы 60 кг денеге екі күш әсер етеді: бірінші күштің шамасы 60 Н, бағыты орын ауыстыру бағытына қарама-қарсы, екінші күштің шамасы 150 Н, қозғалыс бағытымен бағытас. Дене қандай үдеумен қозғалады?

Жауабы: $1,5 \text{ м/с}^2$

■6. Массасы 600 г материялық денеге 2Н және 3Н күштер әсер етеді. Дене 8 м/с^2 үдеумен қозғалатын болса, денеге әсер ететін күштердің арасындағы бұрышты анықтаңдар.

Жауабы: 33°

Рефлексия

1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба, жоқ көмек қажет пе?
2. “Шығармашылық шеберхана” айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?

§ 8. НЬЮТОННЫҢ ҮШІНШІ ЗАҢЫ



Тірек ұғымдар: денелердің өзара әсерлесуі, Ньютонның үшінші заңы.

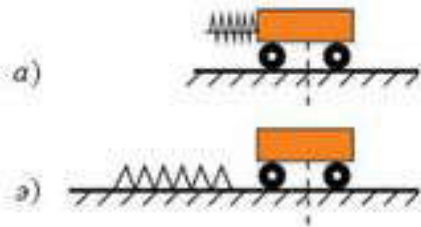
Бүгінгі сабақта: Ньютонның үшінші заңын қолдануды үйренесіңдер.

Дене қозғалысының өзгеру себебі сыртқы әрекет болып табылады. Әсер — денелердің өзара әсерлесуінің нәтижесі. Өзара әсерлесудің сандық өлшемі күш болып табылады. Ньютон денелердің қозғалысын зерттеуді жалғастыра отырып, қозғалысқа басқа көзқарас тұрғысынан қарады. Ол денелер бір-бірімен өзара әсерлескенде оларда не болатынын және өзара әсерлескенде пайда болатын күштер бір-бірімен қалай байланысқанын айқындау қажет деп шешті. Ол үшін біркатар тәжірибе жүргізді.

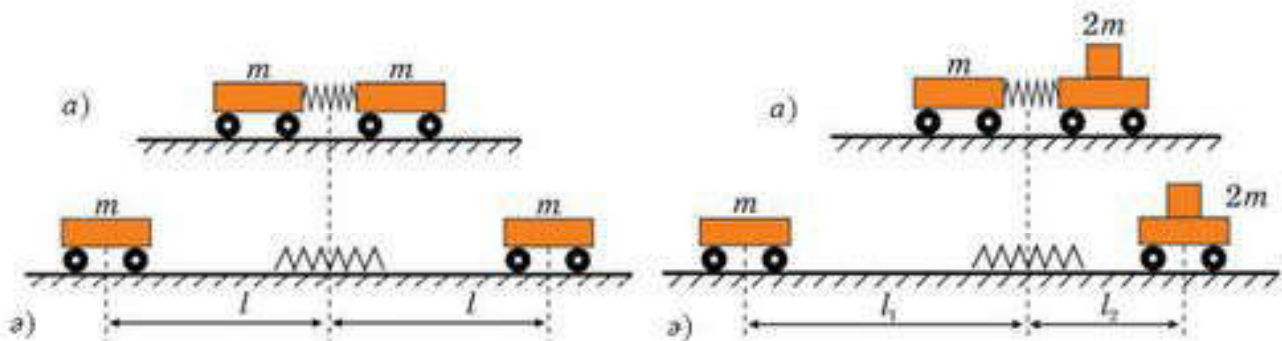
1-тәжірибе. Серпімді серіппе бекітілген кішкене арбаша алайық. Серіппе сығылып, жіпке байланған. Арбаша үстелге қатысты тыныштық қалпын сақтаған. Жіпті күйдіріп, үзіп жіберсек, ол қозғала ма? Жіпті күйдіріп жібергеннен кейін серіппе жазылғанмен, арбаша бір орнында қалады (8.1, *a* және *ә*-суреттер).

2-тәжірибе. Енді бірінші арбашаның жанына серіппенің екінші ұшымен жанасатын дәл сондай арбашаны орналастырайық. Тағы да жіпті күйдіріп жіберейік. Бұл жағдайда нені байқайсындар? Серіппе жазылғаннан кейін арбашалар қарама-қарсы жаққа бірдей қашықтыққа жылжиды (8.2, *a* және *ә*-суреттер). Демек, арбашалар бір-бірімен серіппе арқылы әсерлескенде ғана қарама-қарсы жаққа қарай қозғалады. Серіппе бұл жағдайда оларды байланыстырушы рөл атқарады, яғни оның көмегімен бір арбаша екіншісіне әсер етеді.

3-тәжірибе. Егер оң жақтағы арбашаға массасы арбашаның массасынан екі есе артық жүкті орналастырып, жіпті үзіп жіберсек, олар қарама-қарсы жаққа, бірақ әртүрлі қашықтыққа жылжиды (8.3, *a* және *ә*-суреттер).



8.1-сурет



8.2-сурет

8.3-сурет

Бұл тарауда сипатталған тәжірибелерден массалары әртүрлі арбашалардың өзара әсерлесуі кезінде олардың алатын үдеулері де түрліше болатыны шығады. Бұған арбашалардың тоқтағанға дейін әртүрлі қашықтықты жүріп өткен жолдары дәлел бола алады: жүгі бар арбашаның жүріп өткен жолы жүгі жоқ арбашаға карағанда үш есе аз. Арбашалардың үдеулерін есептеп және массаларын біле отырып, (8.1) формула бойынша әр арбашаға әсер етуші күштің шамасын анықтауға болады. Есептеулер бұл күштердің шамасы бойынша тең екенін көрсетеді:

$$m_1 a_1 = m_2 a_2. \quad (8.1)$$

Арбашалар қарама-қарсы бағытта қозғалған, демек, олардың қозғалысын тудырған күштер де қарама-қарсы жаққа қарай бағытталады. Тәжірибеден өзара әсерлесу кезінде күштер жұбымен пайда болатынын байқаймыз:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (8.2)$$

Бұл теңдіктегі “минус” таңбасы күштердің қарама-қарсы бағытталауының көрсетеді. Өзара әсерлесу кезінде пайда болатын күштер әртүрлі денелерге түсіріледі, сондықтан оларды қосуға болмайды.

Осындай тәжірибелердің нәтижелерін қорытындылай келе Ньютон денелер қозғалысының тағы бір заңын тұжырымдады, ол *Ньютонның үшінші заңы* деп аталады: табиғаттағы күштер денелердің өзара әсерлесу нәтижесінде және де жұбымен пайда болады; бұл күштердің модульдері тең, ал бағыттары қарама-қарсы және бір түзудің бойында әсерлеседі; бұл күштердің табиғаты бірдей болып табылады.

(8.2) формуласы осы заңның математикалық түрдегі жазылуы болып табылады.

Ньютонның үшінші заңы инерциялық санақ жүйелерінде орынды. Бұл заң жеке материялық нүктенің динамикасынан еркін механикалық жүйелердің динамикасына (материялық нүктелердің жүйесіне) көшуге мүмкіндік береді.

Ньютонның үшінші заңынан кез келген механикалық жүйедегі ішкі күштердің геометриялық қосындысы нөлге тең екені шығады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Денелердің өзара әсерлесуі дегеніміз не?
2. Денелер өзара әсерлескенде олардың қозғалысы қалай өзгереді?
3. Өзара әсерлесу кезінде пайда болған күштердің шамасы туралы не айтуға болады?
4. Өзара әсерлесу кезінде пайда болған күштердің бағыты туралы не айтуға болады?
5. Ньютонның үшінші заңын тұжырымдаңдар.
6. Ньютонның үшінші заңы әрқашан орындала ма?



Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Екі динамометрдің ортасына үшінші динамометрді қыстырғышпен өзара бекітіңдер. Екі шеткі динамометрді екі жаққа тартыңдар. Динамометрлердің көрсеткіштерін салыстырыңдар. Тәжірибе нәтижесін түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

Арқанның керілу күші қандай жағдайда үлкен болады: 1) екі адам арқанның екі ұшынан модульдері жағынан тең, бағыттары қарама-қарсы күштермен тартса; 2) арқанның бір ұшын қабырғаға бекітіп, ал екінші ұшын адам дәл сол күшпен тартса?

Талдаңдар

Крыловтың әйгілі аңызында аққу, шаян және шортан жүк толған арбаны модулі жағынан тең күштермен тартады. Бірақ арба орнынан қозғалмайды. Күштер қалай бағытталған? Есептеу жүргізіңдер.

Шығарыңдар

1. Екі бала динамометрді қарама-қарсы бағытта тартып тұр. Әрқайсысы 10 Н күш жұмсап тұрса, динамометрдің көрсететін мәнін табыңдар.

Жауабы: 10 Н

2. Серіппелі динамометрге қарама-қарсы бағытта 4 Н және 7 Н күштер әсер етеді. Динамометрдің көрсететін мәні қандай? Егер динамометрге қарама-қарсы бағытта әрқайсысы 5 Н тең күш әсер ететін кезде қалай өзгереді?

Жауабы: 3 Н, 5 Н

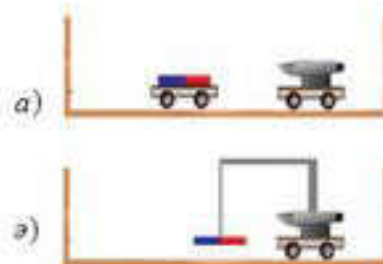
3. Керілу күші 150 Н тең жіпке әрқайсысы 120 Н болатын қарама-қарсы бағытта екі адам тартып тұрса, жіп үзіле ме?

Жауабы: жоқ

4. Таразыға жарты стақан су қойып теңестірген. Егер стақанға қарандаш салып, оны қолмен ұстап тұрса, тепе-теңдік бұзыла ма?

Жауабы: жоқ

■ 5. 8.4, а-суретке қарасаңдар арбашалардың үстіне біріне магнит, ал екіншісінде болат төс (наковальня) қойылған. 8.4, ә-суретте арбашаның үстіндегі болат төске магнит ілінген. Қандай жағдайда арбаша қозғалады?



8.4-сурет

Рефлексия

1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба, жоқ көмек қажет пе?
2. “Шығармашылық шеберхана” айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?

§ 9. Серпімділік күші. Гук заңы. Тіректің реакция күші



Тірек ұғымдар: деформация, серпімділік күші, Гук заңы, механикалық кернеу, Юнг модулі.

Бүгінгі сабақта: деформацияның түрлерін ажыратуды, Гук заңын есеп шығаруда қолдануды үйренесіңдер.

Егер денелердің өзара әсерлесуі оларда үдеудің пайда болуына әкелмесе, онда денелер деформацияға ұшырайды. Бұл жағдайда күштің статикалық әсері көрініс табады.

Сыртқы күштердің әсерінен дененің өлшемі мен пішінінің кез келген өзгерісі деформация деп аталады (латынша *Deformatio* — өзгеру).

Денелер деформацияның екі түріне ұшырауы мүмкін: *серпімді және пластикалық*.

Сыртқы күштің әсері тоқтағаннан кейін дененің бастапқы өлшемі мен пішіні қайтадан қалпына келсе, мұндай деформация серпімді деп аталады.

Сыртқы күштің әсері тоқтағаннан кейін дененің бастапқы өлшемі мен пішіні өзгерсе, мұндай деформация пластикалық деп аталады.

Көпірлерді, ғимараттардың қабырғаларын, машина бөлшектерін дайындайтын материалдардың серпімділік қасиеті болуы тиіс. Соғу, штамптау, сомдау процестеріне ұшырайтын материалдардың пластикалық қасиеті болуы тиіс.

Деформацияның сипаты күштің әсер ету шамасы мен ұзақтығына, зат табиғатының материалына, оның температурасына және т.б. факторларға байланысты болады.

Серпімді деформацияның түрлері: *созылу, сығылу, бұралу, иілу, ығысу* деформациялары.

Жұмсақ резеңке өшіргіш алып, оның бойына қарындашпен параллель сызықтар жүргізіп, өшіргішті саусағымызбен басаіық (9.1-сурет). Саусағымыз резеңкенің жоғары қабаттарын ығыстырады, ал төменгі қабаттары өзгеріссіз қалады, өйткені бұл қабаттар резеңкеге қарағанда анағұрлым қаттырақ болатын үстел бетімен жанасады. Резеңке өшіргіштің әртүрлі бөліктері түрліше ығысады да, өшіргіш өз пішінін өзгертеді: деформация пайда болады. Деформацияланған өшіргіш оған жанасқан денеге қандай да бір күшпен әсер етеді. Саусақ резеңкенің қысымын сезеді. Егер саусағымызды көтерсек, өшіргіш өзінің бастапқы пішініне қайта келеді.



9.1-сурет

Қатты дененің деформациясы кезінде оның кристалдық торының түйіндерінде орналасқан бөлшектері (атомдары, молекулалары, иондары) өздерінің тепе-теңдік калпынан ауытқиды. Бұл ығысуға қатты дененің бөлшектерінің арасында

оларды бір-бірінен белгілі бір қашықтықта ұстап тұратын өзара әсерлесу күштері кедергі жасайды. Сондықтан серпімді деформацияның кез келген түрінде оның деформациялануына кедергі жасайтын ішкі күштер пайда болады.

Дененің серпімді деформациясы кезінде пайда болатын және деформация тудырған дене бөлшектерінің ығысу бағытына қарама-қарсы бағытталған күштерді **серпімділік күштері** деп атайды.

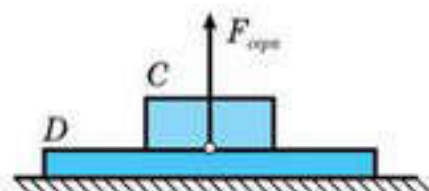
Серпімділік күштері дененің өлшемдері мен пішінінің өзгеруіне кедергі жасайды. Ол деформацияланған дененің кез келген қима-сында, сондай-ақ деформацияны тудырған денемен жанасқан жерінде пайда болып, әсер етеді. Мысалы, серпімді деформацияланған D тақта тарапынан онда жатқан C білеушеге $F_{серп}$ серпімділік күші әсер етеді, оны **тіректің реакция күші** деп атайды (9.2-сурет).

Серпімділік күшінің денелердің жанасу бетіне **перпендикуляр бағыттатуы** оның маңызды ерекшелігіне жатады, ал егер деформацияланған серіппе, қысылған және созылған өзектер, жіптер мен баулар туралы сөз болса, онда серпімділік күштері олардың осьтері бойымен бағытталады. Біржақты созу немесе сығу жағдайында серпімділік күші дененің деформациясын тудырған сыртқы күштер әсер ететін түзудің бойымен оған қарама-қарсы және дене бетіне перпендикуляр бағытталады.

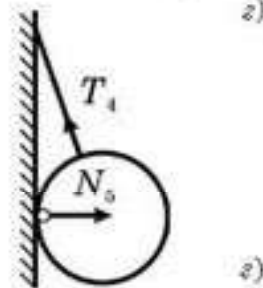
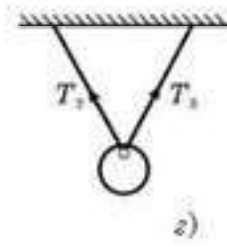
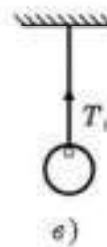
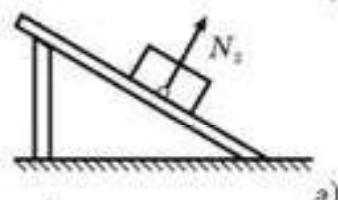
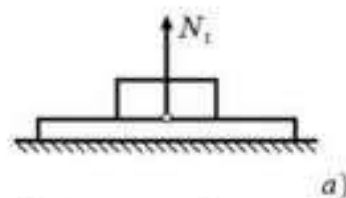
Денеге тірек немесе аспа тарапынан әсер ететін күшті **тіректің реакция күші** немесе **аспаның керілу күші** деп атайды. 9.3-суретте денелерге түсірілген тіректің реакция күші (N_1, N_2, N_3, N_4 және N_5 күштері) мен аспаның керілу күшіне (T_1, T_2, T_3 және T_4) мысалдар келтірілген.

Сызықты деформация (созылу деформациясы) — дененің тек сызықтық өлшемдерінің өзгерісі жүзеге асатын деформация. Сандық жағынан ол Δl абсолют және ε салыстырмалы ұзарумен сипатталады (9.4-сурет):

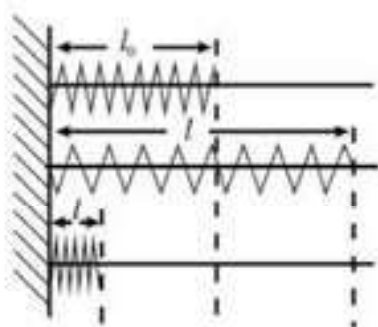
$$\Delta l = |l - l_0|, \quad (9.1)$$



9.2-сурет



9.3-сурет



9.4-сурет

мұндағы Δl — абсолют ұзару (м), l және l_0 — дененің бастапқы және соңғы ұзындықтары.

Салыстырмалы ұзару — бірлік ұзындықтағы дененің ұзаруымен анықталатын шама:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (9.2)$$

мұндағы ε — дененің салыстырмалы ұзаруы, Δl — дененің абсолют ұзаруы (м), l_0 — дененің бастапқы ұзындығы (м).

Серпімділік күші мен дененің серпімді деформациясының (аздаған деформация кезіндегі) арасындағы байланысты Ньютонның замандасы ағылшын ғалымы Р. Гук тәжірибе жүзінде анықтаған. Созылу (сығылу) деформациясы үшін Гук заңының математикалық өрнегі мынадай:

$$F_{\text{серп}} = -k \cdot \Delta l, \quad (9.3)$$

мұндағы $F_{\text{серп}}$ — деформация кезінде денеде пайда болатын серпімділік күшінің модулі (Н), Δl — дененің абсолют ұзаруы (м).

k коэффициенті **дененің қатаңдығы** деп аталады. Ол деформациялаушы күш пен Гук заңындағы деформацияның арасындағы пропорционалдық коэффициент. Бұл қарастырылатын дененің серпімділік қасиетін сипаттайды және заттың серпімділік қасиеті мен өлшеміне байланысты болады.

Серіппенің қатаңдығы сан мәні бойынша серпімді деформацияланатын дененің бірлік деформациясын туғызу үшін оған түсірілетін күшке тең.

ХБ жүйесінде серіппенің қатаңдығының өлшем бірлігі ньютонның метрге қатынасымен анықталады $\left(\frac{\text{Н}}{\text{м}}\right)$.

Созылу (сығылу) деформациялары үшін **Гук заңы** былай тұжырымдалады: **денеде пайда болатын серпімділік күші осы дененің абсолют деформациясына тура пропорционал.**

Серпімді деформацияланған дененің күйін σ **механикалық кернеу** деп аталатын шамамен сипаттайды.

σ механикалық кернеу дененің S көлденең қимасының бірлік ауданына келетін $F_{\text{серп}}$ күшінің модулімен анықталады:

$$\sigma = \frac{F_{\text{серп}}}{S}, \quad (9.4)$$

Механикалық кернеудің өлшем бірлігі: $[\sigma] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}$.

Бақылаулар деформацияның мәні аз кезде σ **механикалық кернеудің ε салыстырмалы ұзаруға пропорционал екенін көрсетеді:**

$$\sigma = E \cdot |\varepsilon|, \quad (9.5)$$

Бұл формула созылу (сығылу) деформациялары үшін Гук заңының жазылу түрлерінің бірі болып табылады. Бұл формулада салыстырмалы ұзару модуль арқылы алынған, өйткені ол оң да, теріс те болуы мүмкін.

Гук заңындағы E пропорционалдық коэффициент — серпімділік модулі (*Юнг модулі*). Тәжірибе жүзінде *Юнг модулінің сан мәні дене 2 есе ұзарғанда пайда болуы мүмкін механикалық кернеуге тең екені тағайындалған*.

Осыны дәлелдейік. Гук заңынан $E = \sigma/\epsilon$ шығады. Егер E Юнг модулі сан мәні бойынша σ механикалық кернеуге тең болса, онда $\epsilon = 1$. Бұдан $\Delta l/l_0 = 1$ және $\Delta l = l - l_0 = l_0$; $l = 2l_0$ аламыз.

Юнг модулінің өлшем бірлігі — паскаль: $[E] = \text{Па}$.

Тәжірибе жүзінде кез келген дене (резенкеден басқа) серпімді деформация кезінде өзінің ұзындығын екі есе арттыра алмайды, яғни үзіліп кетеді. Серпімділік күші неғұрлым үлкен болса, бірдей жағдайлар (l_0, S, F) туғызылған жағдайда, дене соғұрлым аз деформацияланады. Сонымен, *Юнг модулі созылу немесе сығылу серпімді деформациясына материалдың кедергі туғызуын сипаттайды*.

(9.5) түрінде жазылған Гук заңын (9.3) түріне онай келтіруге болады.

Расында да, $\sigma = \frac{F_{\text{серп}}}{S}$ және $\epsilon = \frac{|\Delta l|}{l_0}$ шамаларын ескерсек, $\frac{F_{\text{серп}}}{S} = E \cdot \frac{|\Delta l|}{l_0}$

немесе $F_{\text{серп}} = E \cdot S \cdot \frac{|\Delta l|}{l_0}$ аламыз, мұндағы $E \cdot \frac{S}{l_0} = k$. Онда $F_{\text{серп}} = k\Delta l$.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Дененің деформациялануы дегеніміз не?
2. Дененің деформациялануы қалай жүзеге асады?
3. Деформацияның қандай түрлерін білесіңдер?
4. Қандай деформация серпімді деп аталады?
5. Қандай деформация пластикалық деп аталады?
6. Серпімді денелерге және олардың техникада, құрылыста қолданылуына мысалдар келтіріңдер.
7. Пластикалық денелерге және олардың техникада, құрылыста қолданылуына мысалдар келтіріңдер.
8. Денелердің серпімділік қасиетін қалай өзгертуге болады? Мысалдар келтіріңдер.
9. Серпімділік күші қалай пайда болады?
10. Абсолют созылу дегеніміз не?
11. Гук заңын тұжырымдаңдар.
12. Динамометр не үшін қолданылады?
13. Мектеп динамометрінің құрылысы неге негізделген?
14. Динамометрді градуирлеуді қалай жүзеге асырады?

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Резеңке және ермексаздан жасалған екі шарды алыңдар. Шарларды қабырғаға лақтырған кезде қандай құбылысты байқауға болады? Түсіндіріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

Екі бірдей кішкене шарды алып, оларды бірдей биіктіктен тастаңдар. Енді оларды қайтадан сол биіктікке көтеріп, алдымен вертикаль төмен, сосын вертикаль жоғары бірдей жылдамдықпен лақтырыңдар. Тәжірибе нәтижесін түсіндіріңдер.

Зерттеңдер

Резеңке жіпке жүкті бекітіп іліндер. Содан кейін жіпті екіге бүктеп, сол жүкті тағы бекітіңдер. Бірінші және екінші жағдайда резеңкелердің керілуін салыстырыңдар. Нәтижені түсіндіріңдер және сәйкес есептеулерді жүргізіңдер.

Шығарыңдар

1. Қатандығы 100 кН/м сымды 1 мм созу үшін оның ұштарына қандай күш түсіру қажет? *Жауабы: 100 Н*

2. Серіппені 10 Н күшпен созатын болсақ, оның ұзындығы 16 см , ал 30 Н күшпен созатын болсақ, оның ұзындығы 20 см болады. Деформацияланбаған серіппенің ұзындығы қандай? *Жауабы: 14 см*

3. Арқан 3 кН жүктемені көтереді. Егер арқанға массасы $0,5 \text{ т}$ жүк ілетін болсақ, ол үзіледі ме? *Жауабы: иә*

4. Серіппе массасы 400 г жүк ілінген бос ұшынан $0,8 \text{ м/с}^2$ үдеумен вертикаль жоғары көтерілді. Серіппенің қатандығы 250 Н/м . Серіппенің массасын ескермей, оның ұзаруын анықтаңдар. Қозғалыс басталғаннан 5 с өткеннен кейінгі жүктің жылдамдығын табыңдар. *Жауабы: 17 мм ; 4 м/с*

■5. Қатандықтары 200 Н/м және 300 Н/м серіппелерді алдымен параллель, содан кейін тізбектей жалғайды. Параллель жалғанған серіппелер жүйесінің қатандығы тізбектей жалғанған жүйе қатандығынан қанша есе артық? *Жауабы: $\approx 4,2$*

■6. Көлемі 2 м^3 және массасы 7 т мүсінді су айдынының түбінен баяу жылдамдықпен көтерген кездегі сым арқанның ұзаруын табыңдар. Сым арқанның қатандығы $2,5 \text{ МН/м}$. *Жауабы: 2 см*

Рефлексия

1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба, жоқ көмек қажет пе?
2. "Шығармашылық шеберхана" айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?

§ 10. Үйкеліс күші. Кулон—Амонтон заңы



Тірек ұғымдар: құрғақ және сұйық үйкеліс, сырғанау, тыныштық, домалау үйкелістері, Кулон—Амонтон заңы

Бүгінгі сабақта: үйкелістің түрлерімен танысасыздар.

Үйкеліс күшімен сендер әр қадам жасаған сайын кездесесіңдер. Үйкеліс күнделікті өмірде үлкен рөл атқарса да, үйкелістің пайда болуының жеткілікті деңгейдегі толық бейнесі әлі құрылып біткен жоқ. Бұл үйкеліс табиғатының күрделілігіне емес, үйкеліске жасалатын тәжірибелерді жүзеге асыру беттердің жанасуына қатысты болуымен тығыз байланысты.

Үйкеліске қатысты үш физикалық құбылыс қарастырылады: дененің сұйықтар мен газдардағы қозғалысы кезіндегі кедергісі, оны *сұйық үйкеліс* деп атайды; бір дене екінші дененің бетімен сырғанаған кезде пайда болатын кедергіні *сырғанау* немесе *құрғақ үйкеліс*, ал дене басқа бір дененің бетімен сырғанамай, домалаған кезде пайда болатын кедергіні *домалау үйкелісі* деп атайды.

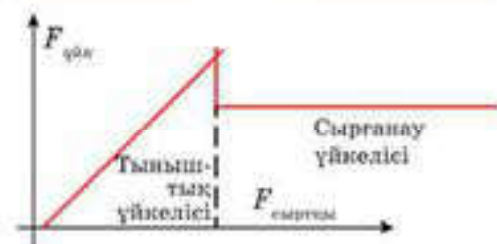
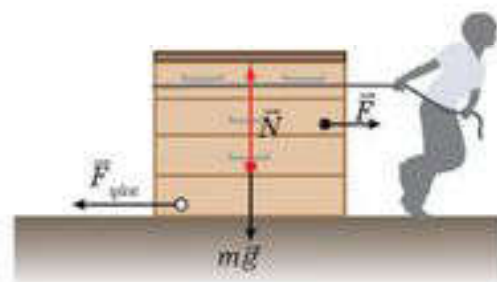
Дененің қозғалысына әдетте үйкеліс күші кедергі жасайды. Егер қатты денелердің беттері жанасса, олардың бір-біріне қатысты қозғалысына *құрғақ үйкеліс* күші кедергі жасайды. Құрғақ үйкеліске тән ерекшелікке іркіту (тоқырау) аймағының болуы жатады. Денеге түсіретін сыртқы күштердің абсолют шамасы белгілі бір мәннен артқанша оны орынан қозғалту мүмкін емес. Бұл мезетке дейін үйкелетін беттер арасында *тыныштық үйкеліс* күші пайда болады, ол сыртқы күштерді теңестіріп қана қоймай, онымен бірге артып та отырады (10.1-сурет). Тыныштық үйкеліс күшінің максимал мәні

$$F_{\text{үйк.}} = \mu N$$

формуласымен анықталады, мұндағы μ — жанасатын беттердің қасиеттеріне байланысты болатын үйкеліс коэффициенті, N — тіректің реакция күші.

Сыртқы күштердің абсолют шамасы $|F_{\text{үйк. max}}|$ мәнінен артқанда сырғанау пайда болады. *Сырғанау үйкеліс күші салыстырмалы қозғалыс жылдамдығына тәуелді емес және төменгі жылдамдық кезінде оны $|F_{\text{үйк. max}}|$ шамасына тең деп есептеуге болады.*

Денелердің сұйықтардағы және газдардағы қозғалысына сұйық үйкеліс күші кедергі жасайды. Сұйық үйке-



10.1-сурет

лістің құрғақ үйкелістен ерекшелігі — іркілу (тоқырау) аймағының болмауы. Сұйықтарда немесе газдарда тыныштық үйкеліс күші пайда болмайды, сондықтан тіпті түсірілген сыртқы күштің азғана шамасы дененің қозғалысын тудыра алады.

Біз білетін үйкеліс бойынша алғаш зерттеулерді шамамен осыдан 500 жыл бұрын Леонардо да Винчи жүргізген. Ол тақтай бойымен сырғанап келе жатқан ағаш білеушеге әсер ететін үйкеліс күшін өлшеген. Ол білеушені тақтайға әр қырымен қоя отырып, үйкеліс күшінің тірек ауданына тәуелділігін де анықтады. Алайда Леонардо да Винчи еңбектері үйкелістің классикалық заңдарын XVII—XVIII ғасырларда француз ғалымдары *Амонтон* мен *Кулон* ашқаннан кейін ғана белгілі болды. Бұл заңдар мынадай:

1. F сырғанау үйкеліс күшінің шамасы дене қозғалып келе жатқан бетке түсірілетін N нормаль қысым күшінің шамасына тура пропорционал, яғни

$$F = \mu N. \quad (10.1)$$

2. Үйкеліс күші беттердің арасындағы жанасу бетінің ауданына тәуелді емес.

3. Үйкеліс коэффициенті жанасатын беттердің қасиетіне тәуелді болады.

4. Үйкеліс күші денелердің қозғалыс жылдамдығына тәуелді емес.

Үйкеліс механизмі өте күрделі. Мына модельді талдайық. Беттердің кедір-бұдыр болуынан олар бір-бірімен кейбір нүктелерде ғана — кедір-бұдырлардың дөңес жерлерінде ғана жанасады (10.2-сурет). Мұнда жанасатын беттердің молекулалары денелердің өздеріндегі молекулалардың арақашықтығымен өлшемдес болатын қашықтыққа дейін жақындап, бір-бірімен ілініседі. Пайда болатын берік байланыс денені басу кезінде үзіледі. Дененің қозғалысы кезінде мұндай байланыстар үнемі пайда болып отырғандықтан, молекулалар тербеліске түседі. Энергия осы тербелістерге шығындалады.

Нақты жанасу ауданы әдетте бірнеше мың квадрат микрон шамасында болады. Ол дененің өлшеміне емес, негізінен, жанасу беттерінің табиғатына, олардың өңделу сапасына, температураларына және нормаль қысым күшіне тәуелді. Егер денені қысып бассак, дөңес жерлер тегістеліп, нақты жанасу ауданымен қатар үйкеліс күші де артады.



10.2-сурет

Беттердің кедір-бұдыры көп болған жағдайда үйкеліс күшінің артуына олардың дөңес жерлерінің арасындағы механикалық ілінісу үлкен рөл атқарады. Олар дененің қозғалысы кезінде ауысып отырады, сондықтан мұнда да молекулалардың тербелістері пайда болады.

Бір-біріне үйкеленген екі дененің арасында үйкеліс күшінің пайда болуын олардың бір-бірімен әсерлескен жерлерінде молекулалардың өзара тартылысымен түсіндіруге болады. Өте жақын қашықтықта молекулалар арасында өзара тартылыс пайда болады.

Беткі қабаты жақсы тегістелген денелерді бір-біріне түйістірген жағдайда олардың молекулаларының өзара тартылатыны байқалады. Мысалы, бет жақтары вакуумда арнайы технологиямен тегістелген және таза екі металдардың арасында пайда болатын үйкеліс күші, беті тегіс емес ағаш білеушені жер бетімен орын ауыстырғанда пайда болатын үйкеліс күшінен көбірек болады. Кейбір жағдайда ол металдар бір-біріне жабысып, оларды сырғыту мүмкін емес.

Құрғақ үйкелістің тағы бір ерекшелігі бар. Ол тыныштық үйкелісінің болуы. Сұйықтар мен газдардағы үйкеліс дененің қозғалысы кезінде пайда болады және денені тіпті аз күш түсіріп-ақ орнынан жылжытуға болады. Ал құрғақ үйкеліс кезінде денеге түсірілген F күштің проекциясы ол жатқан бетке жанама жазықтыққа түсірілген күштің проекциясынан қайсыбір шамаға артық болғанда ғана қозғала бастайды. Дененің қозғалысы басталғанға дейін оған әсер ететін үйкеліс күші түсірілген күштің жанама құраушысына тең болады және қарама-қарсы жаққа қарай бағытталады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Үйкеліс күші дегеніміз не?
2. Үйкеліс күші қалай пайда болады?
3. Үйкеліс күшінің табиғаты қандай?
4. Тыныштық үйкеліс күші мен сырғанау үйкеліс күшінің арасындағы айырмашылық қандай?
5. Қандай үйкеліс құрғақ үйкеліс деп аталады?
6. Құрғақ үйкелісті зерттеу бойынша Кулон және Амонтон тәжірибелерінің қорытындылары қандай?
7. Домалау үйкеліс күші қай кезде пайда болады?
8. Сырғанау үйкеліс күші қандай факторларға тәуелді?
9. а) Екі дененің жанасатын аудандарын арттырса; ә) денелерді қыздырса; б) жанасатын беттерді тегістеп өндесе, үйкеліс күші қалай өзгереді?
10. Үйкеліс күшінің зияны мен пайдасына мысал келтіріңдер.
11. Сұйықтардағы үйкеліс дегеніміз не және ол қалай пайда болады?
12. Неліктен жанасатын беттерді майлайды?
13. Үйкелісті дәлелдейтін қандай негізгі тәжірибелерді білесіңдер?

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

1. Көлбеу тақтайдың үстінде білеуше тұр. Тақтайдың көлбеулік бұрышы үлкен болмаған жағдайда білеуше қозғалмайды. Ненің әсерінен білеуше қозғалмай тұр?



10.3-сурет

2. Үстелдің үстінде жатқан дәптерді қолыңызбен басып, оны қозғалтыңдар. Дәптер үстелге қатысты қозғалады, бірақ алақанға қатысты тыныштықта болады. Сендер ненің әсерінен дәптерді қозғалттыңдар?

3. Жоғары қарай қозғалып бара жатқан транспортердің үстінде жатқан денелер неге төмен қарай сырғанамайды (10.3-сурет)?

Түсіндіріңдер

1. Салмақтары бірдей екі бала төбешіктен шанамен алдымен бірге, сосын бір-бірлеп сырғанайды. Осы екі жағдайда үйкеліс күші мен үйкеліс коэффициентінің шамалары қалай өзгереді?

2. Массасы 10 г мұз кесегі бос кеңістікте 8 м/с^2 үдеумен құлайтын болса, ауаның кедергі күшін анықтай аламыз ба? Кедергі күшінің шамасын табыңдар.

3. Баулардың шешіліп кетпеуіне, қағылған шегелер мен қабырғадағы суреттердің құламауына қандай күш кедергі жасайды?

4. Таудан сырғанап келе жатқан шаналар ненің әсеріне біртіндеп тоқтайды?

Талдаңдар

Үйкеліс күші қалай өзгереді, егер: а) екі дене жанасатын беттердің ауданын үлкейтсе; ә) денелерді қыздырса; б) жанасатын беттерді тегістесе?

Шығарыңдар

1. Горизонталь бетте жатқан массасы 0,5 кг дененің сырғанау үйкеліс коэффициенті 0,25 тең. Денеге F горизонталь күші әсер етеді. F күшінің шамасы а) 0,5 Н; ә) 5 Н болған кездегі үйкеліс күшін табыңдар.

Жауабы: $F_{\text{үйк1}} = 0,5 \text{ Н}$, $F_{\text{үйк2}} = 1,25 \text{ Н}$

2. Массасы 100 кг жәшікті арқанның көмегімен еденде бірқалыпты қозғалтайық. Арқан еденмен 60° бұрыш құрайды. Жәшік пен еден арасындағы үйкеліс коэффициенті 0,4. Арқанның керілу күшін табыңдар.

Жауабы: 200 Н

■3. Горизонталь тақтада жүк жатыр. Жүк пен тақта арасындағы үйкеліс коэффициенті 0,5. Жүк тақтадан сырғып түсуі үшін жүкті қандай ең кіші үдеумен тарту қажет?

Жауабы: 5 м/с^2

■4. Горизонталь үстел үстінде өзара жіппен байланған массалары 1 кг және 2 кг екі дене орналасқан. Салмағы үлкен денеге горизонталь бағытталған 17 Н күш әсер еткен

кездегі денелердің үдеулерін табындар. Денелердің үстелмен үйкеліс коэффициенттері сәйкесінше 0,2 және 0,3.

Жауабы: 3 м/с^2

■5. Сым арқанның бір бөлігі үстелдің шетінен салбырап тұр. Салбырап тұрған бөлігі оның ұзындығы 46% болған кезде арқан үстелден сырғып түсе бастайды. Үйкеліс коэффициентін табындар.

Жауабы: 0,625

*6. Дойбы тасы көлбеулік бұрышы 30° болатын көлбеу жазықтықпен жоғары қарай қозғалады. Біраз уақыттан кейін ол тоқтап, төмен қарай сырғанады. Түсу уақыты көтерілу уақытынан 1,5 есе артық. Үйкеліс коэффициентін табындар.

Жауабы: 0,22

*7. Массасы 2 кг тақтай тегіс горизонталь үстелдің үстінде жатыр. Тақтайдың үстінде массасы 1 кг болатын білеуше тұр. Тақтай мен білеушінің арасындағы үйкеліс коэффициенті 0,2. Білеушеге тақтайға параллель сыртқы күш әсер етеді. Күштің модулі $F = \beta t$ заңына сәйкес өзгереді ($\beta = 1,5 \text{ Н/с}$). Қанша уақыттан кейін білеуше тақтайдың үстінде сырғанады? Білеуше үдеуінің және тақтайдың уақытқа қатысты тәуелділік графигін тұрғызындар.

Жауабы: 2 с

*8. Желсіз күні жауған жаңбыр тамшысының қандай да бір үдеуі 5 м/с^2 , жылдамдығы 6 м/с. Жерге жақындағанда тамшының жылдамдығы тұрақты. Ауаның кедергі күші тамшы жылдамдығына тура пропорционал деп алып, жылдамдықтың модулін есептендер.

Жауабы: 12 м/с



Рефлексия

1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба. жоқ көмек қажет пе?
2. "Шығармашылық шеберхана" айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?

§ 11. Архимед күші

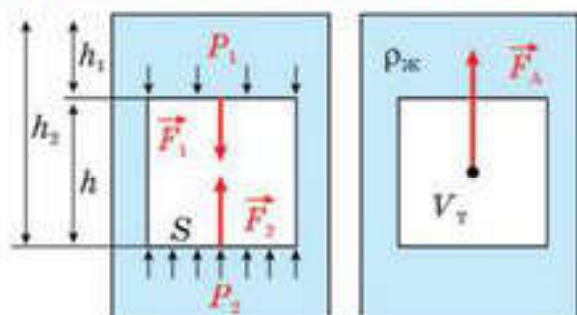


Тірек ұғымдар: Архимед күші, денелердің жүзуі.

Бүгінгі сабақта: ығыстырушы күштің табиғатын және денелердің жүзу шартын түсіндірулі үйренесіңдер.

Суға батырылған денеге бейтаныс күш әсер ететінін білесіңдер: ауыр денелер анағұрлым жеңілдейтін сияқты. Осылайша өзен түбіндегі әдетте құрлықта көтере алмайтын өте ауыр тастарды жеңіл көтеруге және жылжытуға болады; жағалауға шығып қалған кіт орнынан жылжи алмайды, себебі оның салмағы бұлшықет жүйесінің мүмкіндігінен артық болады. Сонымен қатар жеңіл денелерді суда батыруда кедергілер кездеседі: диаметрі жарты метр допты суға батыру өте қиын. Әрине, бұл сұйықтың одан батырылған денеге әсерімен тығыз байланысты екені анық.

Егер болат пластинаны суға салса, онда ол батып кетеді, бірақ егер де одан қорапша жасасақ, оның салмағы өзгермегенмен, ол жүзіп жүреді. Сендер мұны түсіндіре аласыңдар ма?



11.1-сурет

Сұйықтық тарапынан суға батырылған денеге әсер ететін күштің табиғатын түсіну үшін қарапайым мысал қарастырайық. h қабырғалы текшені түтіктегі суға батырамыз (11.1-сурет). Сұйық тарапынан текшенің барлық қырларына қысым күші әсер етеді және олар қарама-қарсы бүйір қырларына әсер ететін F_1 және F_2 күштерінің симметриясының арқасында тең және қарама-қарсы бағытталған. Олар текшені қысуға тырысады, бірақ оның тепе-теңдігіне немесе қозғалысына әсер ете алмайды.

Ал бірақ та жоғары және төменгі беттерге әсер ететін F_1 және F_2 күштері тең емес, өйткені сұйықтағы қысым күші тереңдік артуымен көтеріледі (бұл гидростатикалық қысым $p = \rho gh$).

Олардың нәтижесі күштердің айырмашылығымен айқындалады, яғни ығыстырушы күш:

$$F_{\text{ж}} = F_2 - F_1 = p_2 S - p_1 S = \rho g h_2 S - \rho g h_1 S = \rho g S (h_2 - h_1) = \rho g S h = \rho g V_c.$$

Бұл күш денені жоғарыға итереді, өйткені төменгі беті жоғарысына төмен орналасқан және жоғарыға итеретін күш төменге әсер ететін күшке қарағанда көп. Итеру күшінің шамасы дене ығыстырған сұйықтың салмағына тең:

$$F_{\text{ж}} = \rho_c g V_c. \quad (11.1)$$

Бұл күшті *Архимед күші* деп те атайды, өйткені грек ғалымы Архимед кері ығыстырушы күштің шамасын табатын заңды ашқан.

Демек, тыныштық күйдегі сұйықтыққа батырылған денеге Архимед күші әсер етеді, жоғары бағытталған күш берілген дененің көлеміндегі сұйықтың салмағына тең.

Жүзу шарты. Сұйықтыққа батырылған кез келген денеге Архимед күші әсер етеді. Бірақ сонымен қатар денеге осы күшпен басқа ауырлық күші де әсер етеді. Сұйықтыққа батырылған денелерді бақылай отырып, олардың кейбіреулері сұйықтықта батып-батып, ал кейбіреулері жартылай батып немесе бетінде жүзіп жүретінін байқайсындар.

Әрине, дене күйі, ауырлық күші мен Архимед күшінің қатысына байланысты болатыны анық. 11.2, *a*-суретте су бетінде жүзіп жүрген дене кескінделген. Дене тепе-теңдікте орналасқан (ол тыныштықта), демек,

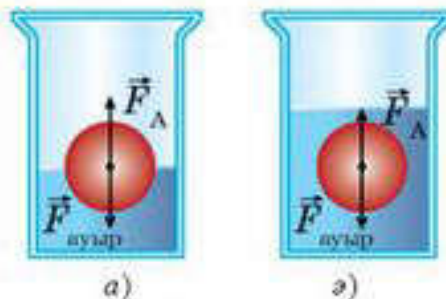
$$F_A = m_c g = F_{\text{ауыр}} \quad (11.2)$$

мұндағы m_c — берілген дене ығыстырған сұйық массасы. 11.2, *ә*-суретте судың ішінде тыныштықта тұрған дене кескінделген. Мұндай денелер қалқып тұрады және ауырлық күші Архимед күшіне тең болады, яғни $F_A = F_{\text{ауыр}}$.

Жүзу кезінде дене әсерінен ығыстырылған сұйықтық көлемі V_c әрқашанда дененің өзінің көлемінен V аз немесе тең болады, ендеше, жүзіп жүрген дене тығыздығы осы дене жүзіп жүрген сұйық тығыздығынан аз немесе әрі кеткенде тең болуы керек.

Жүзіп жүргенде дене тығыздығы өзі жүзіп жүрген сұйық тығыздығынан аз немесе әрі кеткенде тең түсетінін өздерің дәлелдендер.

Сонында айта кететініміз, Архимед заңы ауадағы аэростаттардың күйіндегі өзгерісін сипаттайды (тыныштықта аз жылдамдықпен қозғалғанда).



11.2-сурет



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Неліктен дене ауадағыға караганда сұйық ішінде жеңілірек болады?
2. Ығыстырушы күш деп қандай күшті айтады?
3. Ығыстырушы күшті қалай есептеуге болады?
4. Неліктен ығыстырушы күшті Архимед күші деп атайды?
5. Архимед күшінің табиғаты қандай?
6. Архимед заңын тұжырымдаңдар.
7. Денелердің жүзу шартын тұжырымдаңдар.
8. Қалқып тұр деп қандай күйді айтады?
9. Архимед заңы салмақсыздық жағдайында орындала ма?
10. Архимед заңы Айда, Марста орындала ма?

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Су құйылған стақанға жұмыртқаны салған кезде қандай құбылысты байқауға болады? Жұмыртқаны тұзды суға салған кезде ше? Неліктен?

Тәжірибе жасаңдар

Массалары бірдей екі ермексаздың біреуіне салынған металл кесегінің тығыздығын тәжірибе арқылы анықтаңдар. Металл кесегін ермексаздан алуға болмайды. Тәжірибеге су құйылған стақан және әртүрлі салмақтағы гирлер жиынтығы бар таразыны қолданыңдар. Жұмыс жүргізу әдісін, есептеу нәтижелері мен қателіктерін тұжырымдаңдар.

Түсіндіріңдер

1. Сұйыққа батырылған дененің салмағы неге өзгереді? Салмақтың өзгеруіне қандай факторлар әсер етеді?
2. Әуе шарын жоғары көтерген сайын Архимед күші қалай өзгереді?
3. Стақандағы тұзды суда таза судың мұз кесегі қалқып жүр. Сұйықтың температурасы тұрақты. Мұз ерігеннен кейінгі судың деңгейі қалай өзгереді?
4. Стақандағы таза суда осындай судың мұз кесегі қалқып жүр. Судың температурасы тұрақты. Мұз ерігеннен кейінгі судың деңгейі қалай өзгереді?

Талдаңдар

Суға батып бара жатқан денеге Архимед күші әсер ете ме? Әсер ететін болса, онда дене неге батады?

Шығарыңдар

1. Судың ыдыс түбіне түсіретін қысым күші бүйір қабырғаларына түсіретін қысым күшінен 3 есе артық, онда ыдысқа қандай биіктікке дейін су құю қажет?

$$\text{Жауабы: } h = \frac{a}{12}$$

2. Кішкене шойын шардың салмағы ауада 4,9 Н, ал суда 3,9 Н. Бұл шар тұтас па, әлде ортасы қуыс па? Шойынның тығыздығы 32 г/см^3 . Егер қуыс болса, онда қуыстың көлемін табыңдар.

$$\text{Жауабы: } 32 \text{ см}^3$$

3. Әсер ететін Архимед күші адамның ауырлық күшіне тең болуы үшін әуе шарының көлемі қандай болуы қажет? Адамның массасы 70 кг, ауаның тығыздығы $1,29 \text{ кг/м}^3$.

$$\text{Жауабы: } =54 \text{ м}^3$$

Рефлексия

1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба, жоқ көмек қажет пе?
2. "Шығармашылық шеберхана" айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?

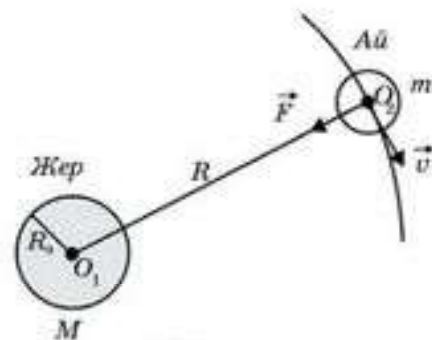
§ 12. Бүкіләлемдік тартылыс күші. Ауырлық күші



Тірек ұғымдар: бүкіләлемдік тартылыс күші, ауырлық күші, баллистикалық қозғалыс

Бүгінгі сабақта: Бүкіләлемдік тартылыс заңын есеп шығаруға қолдануды, материалдық нүктенің гравитациялық өрісі керінеуінің арақашықтықтан тәуелділік графинің түсіндіруді үйренесіңдер.

Бүкіләлемдік тартылыс заңын И.Ньютон 1665 жылы Айдың Жерді айнала қозғалысының астрономиялық бақылаулары негізінде ашты (12.1-сурет). Ньютонның данышпандылығы мынада еді: Жер бетіне жуық маңайда “алмаға” әсер ететін және оған $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$ үдеу беретін күш Айға да әсер етіп, оған центрге тартқыш $a = \omega^2 R$ үдеу беріп, оны Жерге “құлауға” мәжбүр ететінін (Ньютонның басына құлап түскен алма жайлы аңыз негізсіз емес) түсінді.



12.1-сурет

g_0 және a -ны өзара салыстыру арқылы Жер центрінен қашықтаған сайын *еркін түсу үдеуінің* мәні қандай заң бойынша әлсірейтінін анықтаймыз. Жердің радиусы $R_0 = 6\,371 \text{ км}$, Айға дейінгі қашықтық $R = 384\,400 \text{ км}$, Айдың Жерді айналу периоды $T = 27,3$ тәулік. Сонда $a = \omega^2 R$, мұндағы $\omega = \frac{2\pi}{T}$, осыдан $a = \frac{4\pi^2}{T^2} R$. R және T мәндерін қойсақ, онда $a = 0,002725 \text{ м/с}^2$, ал $\frac{g_0}{a} = 3\,600$. Сонымен қатар $\frac{R}{R_0} = 60$.

$$\frac{g_0}{a} \text{ мен } \frac{R}{R_0} \text{ қатынастарын салыстырсақ, } \frac{g_0}{a} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \text{ шығады, осыдан}$$

$$a = \frac{g_0 R_0^2}{R^2} \text{ немесе } a \sim \frac{\text{const}}{R^2},$$

демек, *центрге тартқыш үдеу Жердің центріне дейінгі қашықтықтың квадратына кері пропорционал кемиді*. Сонымен қатар Жер мен біздің “алманың” арасындағы өзара әсерлесу күші өзара әсерлесетін массаларға тура пропорционал, яғни

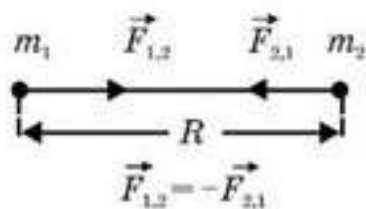
$$F \sim Mm. \quad (12.1)$$

Үдеу қорытқы күшке тура пропорционал болатындықтан, $a \sim F$ (Ньютонның II заңы) және $F \sim \frac{\text{const}}{R^2}$, ал (12.1) теңдеуін ескерсек, онда

$$F \sim \frac{Mm}{R^2}.$$

Тартылыс күші Күн мен ғаламшарлардың арасында ғана емес, кез келген денелердің аралығында әсер етеді. Бірақ бұл күшті табу қиына соқты, себебі ол өте аз шама (Жерге тартылатын денелердің күшінен де аз). Тек 1798 жылы ағылшын физигі және химигі Генри Кавендиш (1731—1810) екі дененің гравитациялық өзара әсерлесуін зертхана жағдайында өлшеді. Кейін оны гравитациялық тұрақты (G) деп атады. Гравитациялық тұрақтының физикалық мағынасы: бұл тұрақты бір-бірінен бірлік қашықтықта орналасқан бірлік массалы денелердің өзара қандай күшпен әсерлесетінін көрсетеді. Осы күнгі есептеулер бойынша ол $G = (6,673 \pm 0,003) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, сонда $|\vec{F}| = G \frac{Mm}{R^2}$ немесе жалпы жағдайда

$$|\vec{F}| = G \frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad (12.2)$$



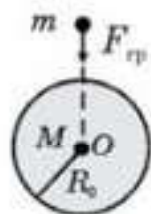
12.2-сурет

Екі нүктелік денелер арасындағы өзара әсерлесу күші олардың массаларының көбейтіндісіне тура пропорционал, ал арақашықтығының квадратына кері пропорционал (12.2-сурет). Денелерненің көмегімен өзара әсерлеседі деген сұраққа Ньютон: “...білмеймін, бал ашпаймын”, — деп жауап берген екен. Ол гравитациялық өзара әсер-

лесу күші табиғатының ең бір терең сырлы, ғажайып екенін жақсы түсінді. Гравитациялық күштердің табиғаттағы басқа күштерден (электромагниттік, ядролық, әлсіз өзара әсерлесу күштері) айырмашылығы сол, бұл күштерден жасырынып, қорғана алмайсың, ол барлық жерден өтіп кетеді.

Гравитациялық және инертті массалардың өзара теңдігі жөнінде мәселені тұңғыш рет қойған да осы Ньютон болды. Шындығында да,

Ньютоның $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ екінші заңына m инертті масса кіреді, оған \vec{F} күштің әсер етуі салдарынан дененің жылдамдығы өзгереді, яғни $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ үдеуі пайда болады, неғұрлым дененің инерттілік қасиеті үлкен болса, үдеу соғұрлым аз.



12.3-сурет

$|\vec{F}| = G \frac{Mm}{R^2}$ Бүкіләлемдік тартылыс заңындағы денелердің M және m массаларының өздері күш көздері болып табылады. Ньютоның екінші заңы және Бүкіләлемдік тартылыс заңын қолданып, Жердегі еркін түсу үдеуінің мәнін

$$|\vec{a}| = \frac{G \frac{Mm_{\text{тp}}}{R_0^2}}{m_{\text{тп}}} = G \frac{M}{R_0^2} = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Мұнда $m_{гр}$ және $m_{ин}$ массаларды өзара қысқарттық. Тәжірибе көрсеткендей, ауырлық күші барлық денелерге олардың массаларына тәуелсіз үдеу береді. Заманауи тәжірибелердің нәтижесінде салыстырмалылық қатені 10^{-2} дәлдікпен анықтауға мүмкіндік берді және $m_{гр} = m_{ин}$ екенін дәлелдеді.

Эйнштейн өзінің жалпы салыстырмалылық теориясында (ЖСТ) немесе тартылыс теориясында $m_{гр} = m_{ин}$ теңестігінің постулаты ретінде алды. Жалпы салыстырмалылық теориясында күш түсінігі атауымен жоқ, онда барлығы да массалар шоғырының (жұлдыздар, галактикалар, “қара құрдымдар” және т.б.) төңірегінде кеңістіктің “майысуына”, яғни “қисайған” кеңістіктің геометриясына (евклидтік емес кеңістіктік геометрия) тіреледі. Осы күнге дейін гравитациялық күштер табиғатын түсіндік деп айта алмаймыз.

Мектеп деңгейінде Бүкіләлемдік тартылыс заңын көптеген құбылыстарды түсіндіруге негіз болатын, ғылыми дәлелденген тәжірибелік дерек деп қабылдау керек. Оның көмегімен Нептун ғаламшары ашылды, ғарыш аппараттарының қозғалыс траекториялары есептеледі, сонымен қатар Күннің және Айдың тұтылу уақыттарын, серіктері бар ғаламшарлардың массаларын, тіптен бізге жақын орналасқан ғаламшарлардың, жұлдыздардың массаларын анықтай аламыз.

Гравитациялық өрістің екі сипаттамасы бар:

1. Күштік сипаттамасы — $g = \frac{F}{m}$ гравитациялық өрістің кернеулігі .

Ол бірлік массалы материялық нүктеге өріс тарапынан әсер ететін күш арқылы анықталады.

2. Энергетикалық сипаттамасы — $\phi = \frac{W}{m}$ гравитациялық өрістің

потенциалы . Ол берілген өрістегі дененің бірлік массасының потенциалдық энергиясымен немесе берілген өрістегі бірлік массаның шексіздікке орын ауыстыру кезінде атқаратын жұмыспен анықталады.

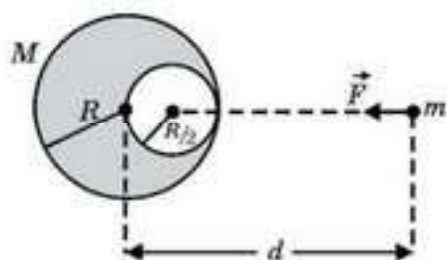
Гравитациялық өрістің кернеулігі өріс потенциалымен байланысты $g = -grad \phi$, яғни гравитациялық өріс кернеулігі өріс потенциалының градиенті болып табылады. Минус таңбасы g кернеулік векторы өріс потенциалының кемуіне қарай бағытталғанын көрсетеді.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Бүкіләлемдік тартылыс заңы қалай тұжырымдалады?
2. Гравитациялық тұрақтының физикалық мағынасы қандай?
3. Айдың Жерді айнала қозғалысын бақылай отырып, Бүкіләлемдік тартылыс заңының дұрыстығын қалай дәлелдеуге болады?

Есеп шығару үлгілері



12.4-сурет

1-есеп. Массасы m кішкентай шар мен массасы M және ішінде сфералық қуысы бар үлкен шардың F өзара тартылыс күшін табындар (12.4-сурет).

Шешуі. $d \approx R$, демек, M денені нүктелік және біртекті деп санауға болмайды (себебі сфералық қуыс кесіп алынған).

Алдымен шарды бүтін деп алсақ, ол массасы m денені $|\vec{F}_1| = G \frac{Mm}{d^2}$ күшпен

тартатынын анықтаймыз, бірақ күштің пайда болуына мұндай қуыстың еш қатысы жоқ, ойша ол қуыс біртекті затпен толтырылған деп санаймыз. Оның массасы $M' = \rho \frac{4}{3} \pi \left(\frac{R}{2}\right)^3$ және ол массасы m денені

$|\vec{F}_2| = G \frac{M'm}{\left(d - \frac{R}{2}\right)^2}$ күшпен тартады деп есептейміз. F_1 -ден F_2 -ні шегереміз,

себебі бұл күш шындығында жоқ. Біздің жағдайымыз үшін ол күш бар және күштер бір түзудің бойымен бағытталады деп есептейміз.

Сондықтан $\vec{F} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2$.

$$F = G \frac{Mm}{d^2} - G \frac{M'm}{\left(d - \frac{R}{2}\right)^2}.$$

Келесі M және M' массаларының қатынасын анықтайық.

$M = \rho \frac{4}{3} \pi R^3$, $M' = \rho \frac{4}{3} \pi \frac{R^3}{8}$ болса, онда $\frac{M}{M'} = 8$. Осыдан

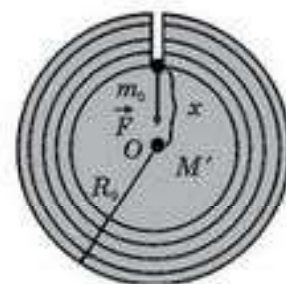
$$F = G \frac{Mm}{d^2} - G \frac{\frac{Mm}{8}}{\left(d - \frac{R}{2}\right)^2},$$

$$F = GMm \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{8 \left(d - \frac{R}{2}\right)^2} \right) = GMm \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{2(2d - R)^2} \right).$$

2-есеп. Жерді біртекті шар деп санап, Жердің центріне дейін жететін радиал шахтадағы еркін түсу үдеуінің қалай өзгеретінін табындар.

Шешуі. m_0 нүктелік массаны шахтада біртекті шардың центрінен x қашықтықта орналастырамыз. Біртекті шарды жұқа сфералық қа-

бықшаларға бөлеміз (12.5-сурет). Сонда алдыңғы есептің шешіміне сай, жоғарырақ жатқан қабықшаларды алып тастауға болады, олардың m_0 массаға гравитациялық әсері жок. m_0 массаны тек радиусы x сферадағы M' масса ғана тартады. Шардың барлық массасы M , оның тығыздығы $\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R_0^3}$, онда



12.5-сурет

$M' = \rho \frac{4}{3}\pi x^3$. Сонда m_0 массаға әсер ететін күш

$$|\vec{F}| = G \frac{M' m_0}{x^2} \text{ немесе } |\vec{F}| = G \rho \frac{4}{3}\pi x^3 \frac{m_0}{x^2},$$

осыдан $|\vec{F}| = \frac{4}{3} G \pi \rho m_0 x$, яғни тереңдік артқанда күш сызықтық заң бойынша кемиді. Осыған орай еркін түсу үдеуі тереңдіктің артуымен сызықтық түрде азайып, шардың центрінде нөлге айналады, яғни

$$|\vec{a}| = \frac{4}{3} G \pi \rho x.$$

Радиал шахтаның ішіндегі денеге әсер ететін ($|\vec{F}| = \frac{4}{3} G \pi \rho m_0 x$) күштің серпімділік күшіне ($F = kx$) ұқсастығына назар аударыңдар, мұндағы қатаңдық коэффициенті $k = \frac{4}{3} G \pi \rho m_0$. Сөйтіп, диаметралды шахтаға түсірілген дене периоды $T = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{k}}$ немесе $T = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}}$ болатын гармониялық тербелістер жасайды. Алынған формулаға Жердің тығыздығын

$$\left(\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R_0^3} \right) \text{ қойсақ, } T = 2\pi \sqrt{\frac{R_0}{g}}, \text{ мұндағы } g = \frac{GM}{R_0^2}.$$

Жер бетіне жуық жерде дөңгелек орбита бойымен айналып жүрген Жер серігінің айналу периоды шахтада ($H \ll R_0$) тербеліп тұрған дененің периодындай болады.

Жердегі бүкіләлемдік тартылыс күшін ауырлық күші деп атайды:

$$F_{\text{тп}} = \frac{GMm}{R_0^2} = mg,$$

мұндағы g — Жердегі еркін түсу үдеуі $g = \frac{GM}{R_0^2} = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

Неліктен еркін түсу үдеуінің Айдағы және Жердегі мәндері әртүрлі? Айырмашылығы қанша есе екенін есептеңдер.

Талдаңдар

Массасы 100 кг адам мен Жердің гравитациялық өзара әсері кезіндегі алатын үдеулерін салыстырыңдар. Есептеулер жүргізіндер.

Шығарыңдар

1. Жердің бірінші жасанды серігінің бір тәуліктегі айналым санын есептеңдер. Жасанды серік орбитасының радиусы 7340 км. *Жауабы: 14*
2. Қандай да бір ғаламшарлардың экваторында адамның салмағы полюстегіге қарағанда үш есе кем. Ғаламшарлардың өз осінен айналу периоды 55 мин. Ғаламшарды біртекті шар деп есептеп, тығыздығын табыңдар. *Жауабы: 19450 кг/м³*
3. Жердің бетінде денеге 72 Н бүкіләлемдік тартылыс күші әсер етеді. Бұл денеге тереңдігі $R_x/4$ радиал шахтада әсер ететін ауырлық күші неге тең? Жерді біртекті шар деп есептеңдер. *Жауабы: 54 Н*
4. Шолпанның орташа тығыздығы 5,2 г/см³. Шолпанның радиусы 6100 км. Шолпанның бетіндегі еркін түсу үдеуі неге тең? *Жауабы: 8,85 м/с²*
5. Жер бетінен қандай қашықтықта ғарыш кемесінің тартылу күші Жер бетіндегіге қарағанда 100 есе кем? *Жауабы: $H=9R_x$*
6. Жердің массасы мен орташа тығыздығын есептеңдер. Жердің радиусы 6400 км. *Жауабы: $6 \cdot 10^{24}$ кг; ≈ 5467 кг/м³*
7. Жасанды серіктің ең кіші айналу периоды 4 с болатын ақ ергежейлі жұлдызының тығыздығын анықтаңдар. *Жауабы: $8,8 \cdot 10^9$ кг/м³*
8. Жердің центрінен қандай қашықтықта ғарыш кемесінің Жерге тартылыс күші оның Айға тартылу күшінен екі есе үлкен? Айдың массасы Жердің массасынан 81 есе кіші. *Жауабы: 333 000 км*

Рефлексия

1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба, жоқ көмек қажет пе?
2. "Шығармашылық шеберхана" айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?

§ 13. Дененің салмағы. Салмақсыздық және асқын салмақ



Тірек ұғымдар: дененің салмағы, реакция күші, салмақсыздық, асқын салмақ.

Бүгінгі сабақта: дененің салмағы, салмақсыздық пен асқын салмақ ұғымдарының табиғатымен танысасындар.

Салмақ — бұл дененің тірекке немесе аспаға әсер ететін күші. Салмақ денеге емес, тірекке түсіріледі. Денеге оның тірекпен өзара әсерлесуінен туындайтын тіректің реакция күші түсіріледі. Ньютонның үшінші заңына сәйкес, ол сан мәні бойынша дененің салмағына тең. Егер дене аспаға ілініп қойылса, онда сан мәні бойынша дененің салмағына тең серпімділік күші пайда болады. *Жіп таратынан денеге әсер ететін күш жіптің керілу күші деп аталады.*

Тіректің реакция күші, жіптің керілу күші, дененің салмағы — электромагниттік табиғаты бар күштер.

Инерциялық санақ жүйесінде тыныштық калпын сақтаған дененің P салмағы денеге әсер ететін ауырлық күшіне тең. Бұл денелердің тепе-теңдік шартынан және Ньютонның үшінші заңынан туындайды: $N = mg$, ал $N = P$, демек, $P = mg$, демек, салмақ дененің массасы мен берілген нүктедегі еркін түсу үдеуіне пропорционал.

Еркін түсу үдеуі алдыңғы тарауда атап өткеніміздей, Жер бетінен (немесе басқа ғаламшардың бетінен) биіктігіне, ғаламшардың массасы мен өлшеміне, сондай-ақ Жердің (ғаламшардың) өз осінен айналуы салдарынан өлшеу нүктесінің географиялық координаталарына байланысты болады (13.1-сурет). Еркін түсу үдеуіне ықпал ететін басқа факторға өлшеу нүктесінің аймағындағы Жер бетінің құрылымы мен Жер қойнауының ерекшеліктерінен туындайтын гравитациялық ауытқулар жатады.

Дене — тірек (немесе аспа) жүйесі инерциалдық санақ жүйесіне қатысты a үдеумен қозғалған кезде дененің салмағы артады немесе азаяды:

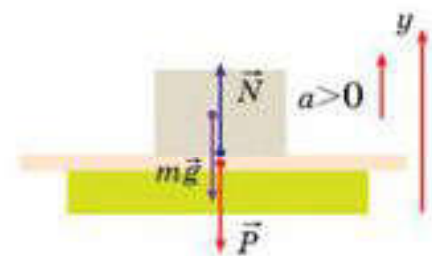
$$P = m(g \pm a). \quad (13.1)$$

Егер дене жоғары қарай үдемелі қозғалса, дене асқын салмақ күйіне ұшырайды.

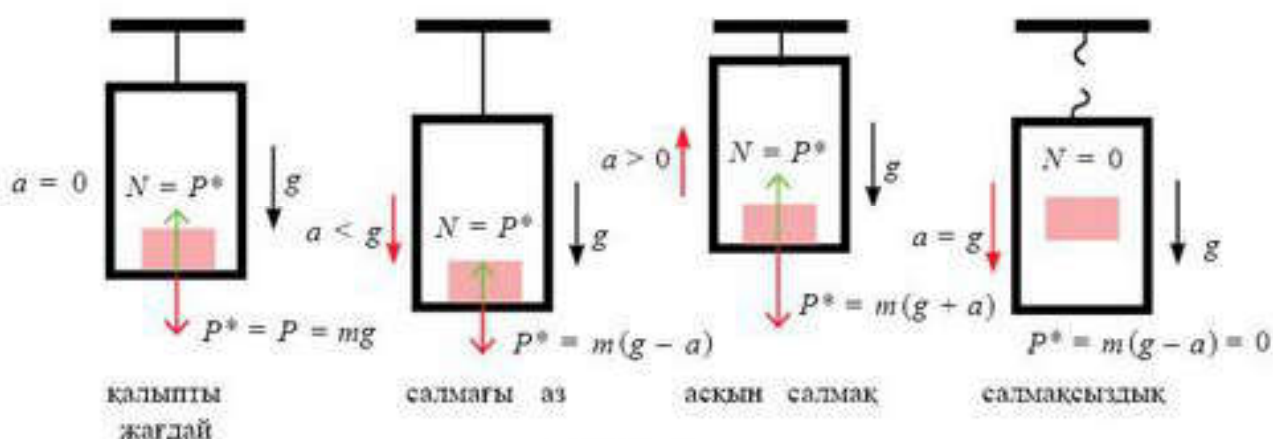
(13.1) формуланы дәлелдейміз. Тіреуде орналасқан және де жоғары a үдеумен



13.1-сурет



13.2-сурет



13.3-сурет

қозғалған денеге екі күш әсер етеді: ауырлық күші және тіреудің реакция күші (13.2-сурет).

Ньютонның екінші заңын қолданамыз:

$$Oy: N - mg = ma.$$

Ньютонның үшінші заңы бойынша $N = P$. Онда тіреуде орналасқан және де жоғары қарай үдемелі қозғалған дененің салмағы

$$P = mg + ma = m(g + a).$$

13.3-суретте тіреуде орналасқан дененің қозғалысының бірнеше түрлері көрсетілген. 13.3-суретті математикалық тұрғыдан түсіндіріңдер.

Жердің өз осінен айналуы нәтижесінде салмақ ендіктерде азаяды: экватордағы салмақ полюстегіге қарағанда шамамен 0,3% аз.

Дененің салмағы болмайтын күйі салмақсыздық деп аталады және дене өзіне тартатын объектіден алыстағанда немесе еркін құлағанда, яғни $g = a$ болғанда салмақсыздық күйін кешеді.

Салмақ пен массаның әртүрлі ұғымдар екеніне назар аударыңдар! Салмақ — дененің горизонталь тірекке немесе вертикаль аспаға әсер ететін күші. Масса күштік факторға жатпайды; масса дененің инерттілігінің өлшемі не болмаса оның гравитациялық қасиетін көрсетеді. Мысалы, салмақсыздық жағдайында дененің салмағы нөлге тең, ал әр дененің өз массасы болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Дененің салмағы дегенді қалай түсінесіңдер?
2. Тіректің реакция күші, жіптің керілу күші және дененің салмағы қалай пайда болатынын түсіндіріңдер.
3. Тіректің реакция күшінің, жіптің керілу күшінің және дененің салмағының табиғаты қандай?
4. Асқын салмақ деп дененің қандай күйін айтады?
5. Салмақсыздық деп дененің қандай күйін айтады?

Есеп шығару үлгілері

Динамикадан есеп шығару кезінде төмендегі алгоритмді қолданған қолайлы.

1. Есептің шартын оқып шығып, онда сипатталған физикалық процесті көз алдарына елестетіндер.
2. Есеп шартында берілген қозғалыстың кинематикалық сипаттамаларын (бастапқы және соңғы координаталар, жылдамдық, үдеу және т.б.) көрсетіп, сұлбасын немесе суретін салындар.
3. Денеге әсер етуші барлық күштерді көрсетіндер, мұнда дене қанша денемен әсерлессе, оған сонша күш түсірілетінін ескеру қажет.
4. Алдымен әр дене үшін динамиканың негізгі заңын векторлық түрде жазындар (Ньютонның екінші заңы), содан кейін олардың координаталар осіндегі проекцияларын жазындар.
5. Алынған теңдеулердің саны белгісіз шамалардың санына сәйкес болуы тиіс. Ондай болмаған жағдайда есеп шартын талдау арқылы қосымша кинематикалық теңдеу жазу керек.
6. Алынған теңдеулерді жалпы түрде шешіндер. Алынған жалпы жауапты өлшем бірліктеріне және шекаралық шарттарына қатысты талдаңдар.
7. Сандық мәндерін қойып, ізделінді шаманың сандық мәнін алындар және алынған нәтижені бағалаңдар.

1-есеп. Қозғалмайтын жеңіл блок арқылы салмақсыз созылмайтын жіп тасталып, жіптің ұштарына массалары m болатын екі жүк ілінген. Он жақтағы жүктің үстіне массасы m_0 жүктеме салынған (13.4-сурет).

1) Жүйенің қандай үдеумен қозғалатынын; 2) жүктеменің жүкті қандай күшпен сығатынын; 3) блок ілінген ілмектің керілу күшін; 4) жіптің керілу күшін табу керек. Үйкеліс ескерілмейді.

Берілгені:	
$m_1 = m_2 = m$	
m_0	
$ \vec{a} $ — ?	$ \vec{N} $ — ?
$ \vec{F}_x $ — ?	$ \vec{T} $ — ?

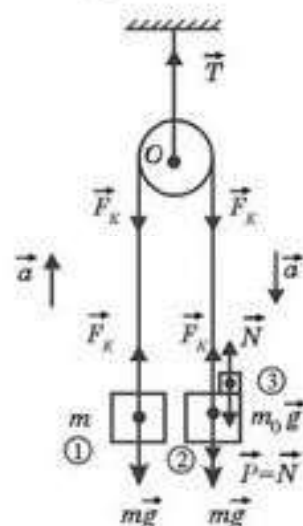
Шешуі. Жүктерге түсірілген барлық күштерді Ньютонның үшінші заңын ескере отырып қарастырамыз (оның ішінде блокқа да). Блоктың салмағы ескерілмегендіктен үйкеліс жоқ және жіп те салмақсыз әрі созылмайды, сондықтан жіптің керілу күші оның барлық нүктелерінде бірдей деп алынады. Үдеудің бағыты анықталған. Әрбір дене үшін Ньютонның үшінші заңын векторлық түрде жазамыз:

(1) сол жақта

(2) оң жақта

(3) жүктеме

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_x + m\vec{g} &= m\vec{a}, \\ \vec{F}_x + m\vec{g} + \vec{P} &= m\vec{a}, \\ \vec{N} + m_0\vec{g} &= m_0\vec{a}. \end{aligned} \right\}$$



13.4-сурет

Ньютона үшінші заңына сәйкес $|\vec{P}| = |\vec{N}|$.

Барлық жүктер үшін үдеудің модулі бірдей екенін ескереміз. Егер скаляр түрде жазсақ, жоғарыдағы жүйе

$$F_x - mg = ma, \quad (1)$$

$$mg + N - F_x = ma, \quad (2)$$

$$m_0 g - N = m_0 a \quad (3)$$

түріне келеді. Бұл жүйені теңдеуді мүшелеп қосу арқылы шығарған ыңғайлы. Сонда $m_0 g = (2m + m_0)a$, осыдан $a = \frac{m_0}{2m + m_0} g$.

F_x , N күштерінің қысқарып кеткеніне назар аударындар, себебі олар жүйенің үдеуіне әсер етпейтін ішкі күштер.

Үдеудің мәнін (3) теңдеуге қойып, тіреудің N реакция күшін табамыз:

$$N = m_0(g - a); N = m_0 \left(g - \frac{m_0 g}{2m + m_0} \right); N = \frac{2mm_0 g}{2m + m_0}$$

Үдеудің мәнін (1) теңдеуге қойып, жіптің F_x керілу күшін табамыз:

$$F_x = m(g + a); F_x = m \left(g + \frac{m_0 g}{2m + m_0} \right); F_x = \frac{2m(m + m_0)}{2m + m_0} g.$$

Блок қозғалмайтын болғандықтан, Ньютона бірінші заңына сәйкес, блокқа түсірілген қорытқы күш нөлге тең, яғни $T - 2F_x = 0$ немесе $T = 2F_x$; $T = \frac{4m(m + m_0)}{2m + m_0} g$.

Мына жағдайларға назар аударындар: егер блок айналмайтындай бекітілген болса, онда $T_0 = (2m + m_0)g$, яғни керілу күші блокқа ілінген барлық жүктердің ауырлық күшіне тең. Жүктер үдемелі қозғалғанда T керілу күші T_0 -ден кіші. Сондықтан a артқан сайын $(T_0 - T)$ күштердің айырымы да артады.

Осы айырымның мәнін ΔT тауып, оның m және m_0 массаларының қатынасына тәуелділігін талдаңдар.

Тағы бір көңіл бөлетін жайт: Аристотель, Галилей, Ньютон логикаларына сүйеніп, Ньютон заңдарының көмегімен жоғарыдағы есепті оңай шешуге болады. Шындығында, жүйенің үдеуі оны тудыратын себепке (яғни, қорытқы күшке) тура пропорционал болса, онда $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$. Есептің шығарылуынан көріп отырғанымыздай, ауырлық күшінің (жүктеменің) әсерінен үдеу пайда болады, ішкі күштердің бұған қатысы жоқ, жіп созылмайды. Сондықтан үдеудің өрнегін бірден жазуға болады:

$$a = \frac{m_0}{2m + m_0} g$$

яғни m_0g қозғалыс себебін қозғалған жүйенің барлық массасына бөлеміз. Егер қозғалысқа кедергі жасайтын сыртқы күштердің әсері бар болса, онда дене алатын үдеуді былай анықтаймыз:

$$a = \frac{\text{қозғалыс себебінен кері әсерді шегеру}}{\text{жүйенің жалпы массасы}}$$

2-есеп. Есепті күрделендірейік. 13.5-суретте көрсетілген жүктердің a_1 және a_2 үдеулерін және жіптің F_x керілу күшін табу керек. Блоктардың және жіптің массаларын ескермей, үйкеліс жоқ және жіп созылмайды деп есептейміз.

Берілгені:

$$m_1, m_2$$

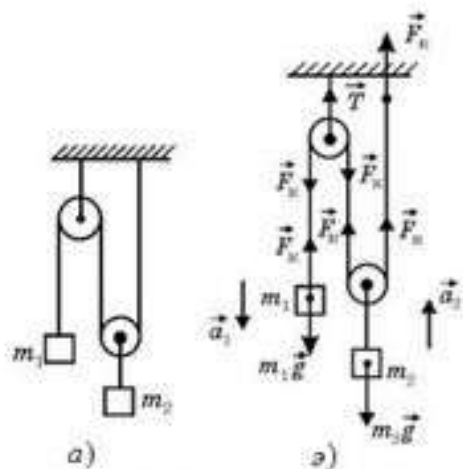
$$|\vec{a}_1| - ? \quad |\vec{a}_2| - ?$$

$$|\vec{F}_x| - ?$$

Шешуі. Жүктердің қозғалыс үдеулерінің бағытын көрсете алмаймыз, бірақ үйкеліс жоқ болғандықтан, олардың бағытын таңдағанымыз бойынша аламыз, бұдан үдеудің модулі өзгермейді. Әрбір дене үшін Ньютонның екінші заңының теңдеуін жазамыз:

$$\begin{cases} m_1g - F_x = m_1a_1, \\ 2F_x - m_2g = m_2a_2. \end{cases}$$

Теңдеулер саны екеу, ал белгісіздер саны үшеу. Үшінші теңдеуді кинематикалық дәйектеу арқылы табамыз. Егер сол жақ жүкті (13.5, а-сурет) l қашықтыққа түсірсек (m_1 жүкпен бірге), онда оң жақтағы жүк осы уақыт аралығында тек $\frac{l}{2}$ шамасына ғана көтеріледі. Демек, бірінші жүк үшін $l = \frac{a_1t^2}{2}$ болса, онда екінші жүк үшін $\frac{l}{2} = \frac{a_2t^2}{2}$. Осы теңдеулерден $a_1 = 2a_2$. Үшінші жетпей тұрған теңдеу, міне, осы. Енді



13.5-сурет

$$\begin{cases} m_1g - F_x = m_1a_1, \\ 2F_x - m_2g = m_2a_2, \\ a_1 = 2a_2 \end{cases}$$

теңдеулер жүйесін шеше отырып, a_1, a_2 және F_x шамаларын табамыз :

$$a_1 = \frac{2(2m_1 - m_2)}{4m_1 + m_2}; \quad a_2 = \frac{2m_1 - m_2}{4m_1 + m_2}; \quad F_x = \frac{3m_1m_2}{4m_1 + m_2}g.$$

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

Неліктен дененің салмағы өзгеруі мүмкін, ал массасы өзгермейді?

Талдаңдар

Ғарыш кемесінің Жерден көтерілген кездегі үдеуі $2g$ болса, ғарышкердің салмағы неге тең?

Шығарыңдар

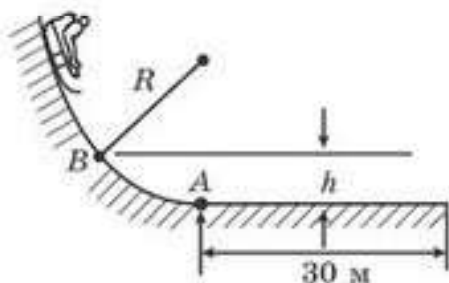
1. Массасы 12 кг дененің Жер бетіндегі 60° ендіктегі дененің салмағын анықтаңдар.
Жауабы: 117,84 Н

2. Ғаламшардың орташа тығыздығы неге тең, егер оның салмағы экваторында серіппелі таразы көрсеткіші полюсіне қарағанда 20% аз көрсетеді. Ғаламшардың тәуліктік ұзақтығы 6 сағ.

Жауабы: 1500 кг/м^3

3. Массасы 52 кг болатын бала $0,8 \text{ м/с}^2$ үдеумен түсіп келе жатқан лифтте тұр. Баланың салмағы неге тең? $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Жауабы: 468 Н



13.6-сурет

4. Радиусы 4 м болатын доға тәрізді төбенің жалғасы горизонталь жазықтыққа ауысады. Төбенің беті тегіс, ал горизонталь жазықтықтың беті, кедір-бұдыр, оның үйкеліс коэффициенті 0,1. Массасы 40 кг бала шанамен төбеден сырғанап түсіп, төбенің етегінде 30 м сырғанап барып тоқтайды. А нүктесінде баланың салмағы қандай? Қандай h биіктікте бала екі есе асқын салмаққа ие болады (13.6-сурет)?

Жауабы: $P_A = 1 \text{ кН}$; $h = 2 \text{ м}$

5. Көлбеулігі 30° болатын жол бетімен автомобиль жоғары қарай $0,5 \text{ м/с}^2$ үдеумен көтерілу үшін жол мен шиналардың арасындағы минимал үйкеліс коэффициенті қандай болуы тиіс?

Жауабы: 0,06

■6. Көкжиекпен 30° бұрыш жасайтын көлбеу жазықтық бойымен төменнен жоғары қарай кішірек денені сырғанатып жібереді. Дененің жазықтықпен үйкеліс коэффициенті 0,2. Дененің көтерілу t_1 уақытының оның қайтадан бастапқы нүктеге сырғанап түсуіне кететін t_2 уақытқа қатынасы неге тең?

Жауабы: 0,7

■7. Адам бір-біріне байланған екі шананы көкжиекке 30° бұрыш жасай бағытталған күшпен тартып келеді. Шаналар бірқалыпты қозғалады деп есептеп, осы күшті табыңдар. Шаналардың әрқайсысының массасы 40 кг. Үйкеліс коэффициенті 0,3 тең.

Жауабы: 330 Н

8. Шайбаны имек таяқпен соққаннан кейін 5 с өткен соң ол соққы орнынан 20 м қашықтыққа барып тоқтады. Шайбаның массасы 100 г. Шайба мен мұз арасындағы үйкеліс күшін анықтаңдар.

Жауабы: 160 мН

9. Массасы 80 кг жүкті көлбеулігі 30° жазықтықпен бірқалыпты көтеру үшін оған жазықтық бойымен бағытталған 600 Н күш түсіру қажет. Егер жүкті жібере салса, онда ол қандай үдеумен төмен қарай сырғанады?

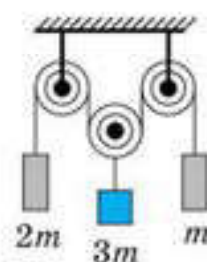
Жауабы: 2,5 Н

10. Суқоймасынан оған батып кеткен көлемі 2 м^3 және массасы 7 т болатын мүсінді сым арқанның көмегімен баяу көтереді. Сым арқанның қатандығы 2,5 МН/м. Арқанның созылуын анықтаңдар.

Жауабы: 3,6 мм

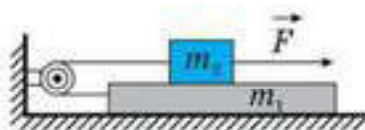
11. Берілген жүйедегі жүктердің үдеулерін анықтаңдар (13.7-сурет). Жіп пен блокты идеал деп есептеңдер.

Жауабы: $a_{2m} = 2,94 \text{ м/с}^2$ төмен;
 $a_{3m} = 0,59 \text{ м/с}^2$ төмен; $a_m = 4,12 \text{ м/с}^2$ жоғары



13.7-сурет

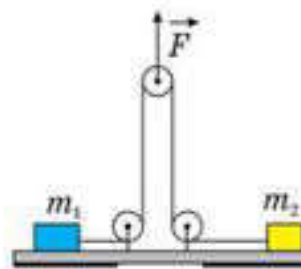
12. Горизонталь үстелде жатқан массасы $m_1 = 2 \text{ кг}$ білеушенің үстіне массасы $m_2 = 1 \text{ кг}$ білеуше орналас-тырылған (13.8-сурет). Екі білеуше де осьтері қозғалмайтын блок арқылы асыра тасталған салмақсыз созылмайтын жіппен жалғастырылған. Жоғары жағындағы білеуше 5 м/с^2 үдеумен қозғалуы үшін оған горизонталь бағытта қандай F әсер етуі қажет? Білеушелердің арасындағы үйкеліс коэффициенті 0,5. Төменгі білеушенің үстел бетімен үйкелісі, блоктағы үйкеліс ескерілмейді.



13.8-сурет

Жауабы: 25 Н

13. Жүйедегі жүктердің массалары $m_1 = 1 \text{ кг}$ және $m_2 = 2 \text{ кг}$ (13.9-сурет). Жіп пен блок салмақсыз, блок осьтеріндегі кедергі ескерілмейді. Жүк пен жазықтық арасындағы үйкеліс коэффициенті сәйкесінше 0,5 және 0,3. Жоғары жағындағы блоктың осіне жоғары қарай бағытталған $F = 12 \text{ Н}$ күш әсер ете бастайды. F күшінің әсер ете бастауынан 0,4 с өткен кезде жүктер арасындағы арақашықтық қаншаға азаяды? Егер күш $F = 9 \text{ Н}$ болса, жауап қалай өзгереді?



13.9-сурет

Жауабы: а) 8 см; ә) өзгермейді



Рефлексия

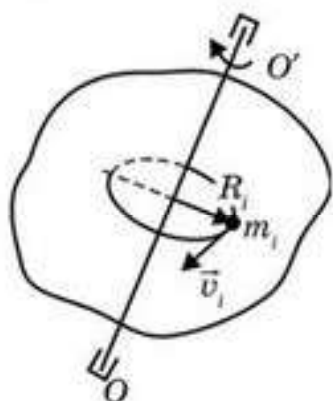
1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба, жоқ көмек қажет пе?
2. "Шығармашылық шеберхана" айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?

§ 14. Абсолют қатты дененің инерция моменті



Тірек ұғымдар: айналмалы қозғалыс энергиясы, дененің инерция моменті, Гюйгенс—Штейнер теоремасы, айналмалы қозғалыс үшін Ньютонның екінші заңы.

Бүгінгі сабақта: айналмалы қозғалыс энергиясын анықтап, абсолют қатты дененің инерция моменттерін есептеу үшін Гюйгенс—Штейнер теоремасын қолдануды үйренесіңдер.



14.1-сурет

Бекітілген OO' осінен айналатын дененің кинетикалық энергиясы болады (14.1-сурет). Ілгерілемелі қозғалыстың бәрімізге таныс $W_k = \frac{mv^2}{2}$

түріндегі кинетикалық энергиясының формуласы айналмалы қозғалыстың кинетикалық энергиясын есептеуге қолайсыз. Шындығында, денеден бөліп алынған әрбір m_i материялық нүктенің v_i сызықтық (жанама) жылдамдықтары түрліше және олар қозғалатын шеңберлердің (R_i) радиустары да әртүрлі. Сондықтан айналып тұрған дененің

толық кинетикалық энергиясын есептеп шығару үшін барлық m_i нүктелерінің ілгерілемелі қозғалысының кинетикалық энергияларын қосымыз керек:

$$W_{\text{аітп}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2}. \quad (14.1)$$

Айналмалы қозғалатын барлық нүктелердің $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ бұрыштық жылдамдықтары бірдей болғандықтан мәселе көп жеңілдейді, v_i сызықтық жылдамдықтарды бұрыштық жылдамдықтармен алмастырамыз: $v_i = \omega R_i$.

v_i -ді (14.1) теңдеуіне қойсақ,

$$W_{\text{аітп}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \omega^2 R_i^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^n m_i R_i^2 \text{ немесе}$$

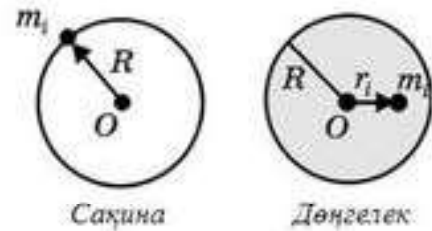
$$W_{\text{аітп}} = \frac{\omega^2}{2} (m_1 R_1^2 + m_2 R_2^2 + \dots + m_n R_n^2). \quad (14.2)$$

Жақша ішіндегі қосынды нені білдіреді?

1. Бұл қосынды скаляр шама.

2. Бұл қосынды дене массасының айналу осіне қатысты таралуына тәуелді, яғни масса айналу осінен неғұрлым қашығырақ болса, соғұрлым қосынды үлкен болады. Шынында, осы қосынды радиустары мен массалары бірдей жұқа сақина мен тұтас дөңгелектің қайсысы үшін үлкен

екенін айту қиын емес. Әрине, сақинанікі үлкен себебі оның барлық m_i нүктелері барынша үлкен $r_i = R$ қашықтықта жатыр (14.2-сурет). Бұл қосынды **дененің инерция моменті** деп аталады және ол берілген дене үшін нақты шама болып табылады. Инерция моменті J әрпімен белгіленеді. Осыны ескерсек, (14.2) формуласы мына түрге келеді:



14.2-сурет

$$W_{\text{аін}} = \frac{J\omega^2}{2} \quad (14.3)$$

(14.3) өрнегі ілгерілемелі қозғалыстың кинетикалық энергиясының өрнегіне ұқсас және айналмалы қозғалыстың кинетикалық энергиясын есептеуге мүмкіндік береді. Осы формуладан бірдей бұрыштық жылдамдықпен айналатын сақина мен дөңгелектің кинетикалық энергиялары әртүрлі болатынын көріп отырмыз. Сақина $\Delta\omega$ бұрыштық жылдамдықтың кез келген өзгерісі үшін тұтас дөңгелекке карағанда анағұрлым инертті, себебі оның инерция моменті үлкен. Демек, айналатын дененің инерттік қасиеті тек оның массасына ғана емес, массаның айналу осіне қатысты көлем бойынша таралуына да тәуелді.

Геометриялық дұрыс пішінді денелердің инерция моменттері төменде келтіріліп отыр (олар кез келген анықтамалық оқулықтарда келтіріледі).

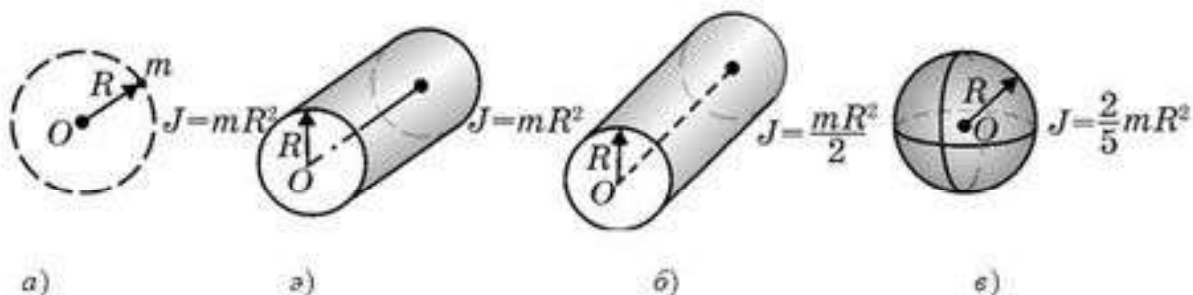
Кейбір денелердің массалар центрі арқылы өтетін айналу осіне қатысты есептелген **инерция моменттерінің формуласы** :

1. Радиусы R шеңбер бойымен айналатын материялық нүктенің инерция моменті (14.3, а-сурет): $J = mR^2$.

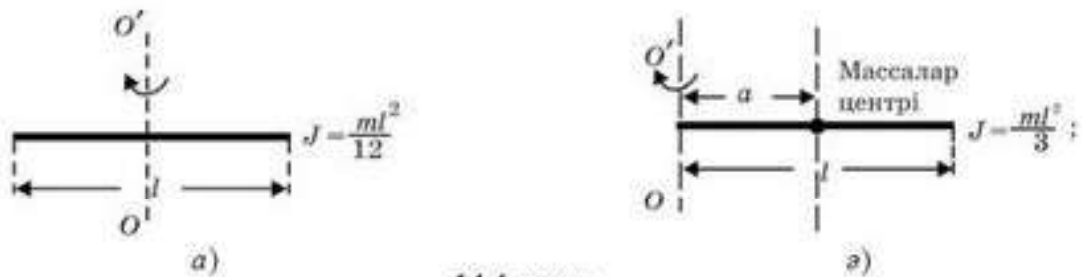
2. Жұқа сақинаның (күрсаудың), жұқа цилиндрдің инерция моменті (14.3, ә-сурет): $J = mR^2$.

3. Тұтас дөңгелектің (цилиндр) инерция моменті (14.3, б-сурет): $J = \frac{mR^2}{2}$.

4. Тұтас шардың инерция моменті (14.3, в-сурет): $J = \frac{2}{5} mR^2$.



14.3-сурет



14.4-сурет

5. Жіңішке шыбықтың ортасынан және оған перпендикуляр өтетін оське қатысты инерция моменті (14.4, а-сурет): $J = \frac{1}{12} ml^2$.

6. Жіңішке шыбықтың шеті арқылы өтетін перпендикуляр оське қатысты анықталған инерция моменті (14.4, б-сурет): $J = \frac{1}{3} ml^2$.

6-мысалдағы айналу осі массалар центрі арқылы өтпейтініне көңіл аударыңдар. Бұл жағдайда инерция моментін табу үшін *Гюйгенс — Штейнер теоремасын* пайдаланамыз. Ауырлық центрі арқылы өтпейтін кез келген оське қатысты дененің инерция моменті осы дененің ауырлық центрі арқылы өтетін осіне қатысты инерция моментін дене массасы мен осы осьтер арасындағы арақашықтық квадратының көбейтіндісіне қосқанға тең.

Дәлелдеу. Айналмалы қозғалыстың толық энергиясы 6-мысал үшін массалар центрі (м.ц.) және OO' осі арқылы өтетін осьті айнала қозғалыс кезіндегі энергияның қосындысынан шығады:

$$W_{\text{аітн}} = \frac{J_0 \omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2}, \quad (14.4)$$

мұндағы m — массалар центріндегі жіңішке шыбықтың массасы, J — массалар центрі арқылы өтетін оське қатысты инерция моменті.

Айналмалы екі қозғалыстың бұрыштық жылдамдықтары бірдей, демек, $W_{\text{аітн}} = \frac{J_0 \omega^2}{2} + \frac{m}{2} \omega^2 a^2$ немесе $W_{\text{аітн}} = (J_0 + ma^2) \frac{\omega^2}{2}$, мұндағы a — OO'

осінен массалар центріне (біздің жағдайымызда $\frac{l}{2}$) дейінгі қашықтық.

Соңғы өрнектен массалар центрінен өтпейтін дененің оське қатысты инерция моменті

$$J' = J_0 + ma^2 \quad (14.5)$$

екенін аламыз. Осы теңдеу *Гюйгенс—Штейнер теоремасын* береді.

$a = \frac{l}{2}$ болғандықтан,

$$J' = J_0 + m \frac{l^2}{4} = \frac{ml^2}{12} + \frac{ml^2}{4} = \frac{ml^2}{3}.$$

Назар аударыңдар! а) OO' осі мен массалар центрі арқылы өтетін ось өзара параллель болуы керек; ә) айналу осі массалар центрі арқылы өтсе ($a = 0$), онда инерция моменті (оған сәйкес кинетикалық энергия да) минимал мәнге ие болады.

$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ немесе $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$ түрінде жазылған Ньютонның екінші заңын

дене бекітілген осьтен қайсыбір $\vec{\epsilon}$ бұрыштық үдеумен айналатын қозғалысқа қолдану ыңғайсыз. Мысалы, массасы m , радиусы R болатын тұтас цилиндр түріндегі блок беріліп, ол арқылы созылмайтын жіп оралып, оның бір ұшына массасы m_0 жүк бекітілген болсын (14.5-сурет). Массасы m_0 жүк белгілі бір a үдеумен ілгерілемелі қозғалыс жасап, ал массасы m блок кейбір ϵ бұрыштық үдеумен айналады. Егер жіп блокқа қатысты сырғанамайтын болса, онда сызықтық a үдеу мен бұрыштық ϵ үдеу $a = \epsilon R$ қатынасымен байланысады.

Дөңгелектің қайсыбір Δm_i нүктесі үшін Ньютонның екінші заңы: $F_{xi} = \Delta m_i a_i$, мұндағы a_i — дискінің айналу осінен R_i қашықтықта орналасқан i нүктенің сызықтық (жанама) үдеуі. $a = \epsilon R$ теңдігін ескере отырып, соңғы теңдікті былай жазамыз: $F_{xi} = \Delta m_i \epsilon R_i$.

Осы теңдеудің екі жағын R_i көбейтсек, $F_{xi} R_i = \Delta m_i \epsilon R_i^2$ аламыз, мұндағы $F_{xi} R_i$ көбейтіндісі — Δm_i нүктесіне түсірілген күш моменті, ал $\Delta m_i R_i^2$ — массасы Δm_i болатын материялық нүктенің инерция моменті. Теңдеудің екі жағының да қосындысын тауып, мынадай өрнек аламыз:

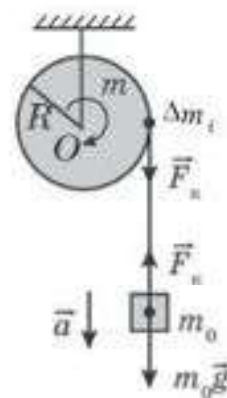
$$\sum_{i=1}^{\infty} F_{xi} R_i = \sum_{i=1}^{\infty} \Delta m_i \epsilon R_i^2. \quad (14.6)$$

$\sum_{i=1}^{\infty} F_{xi} R_i$ қосындысы айналмалы қозғалыстағы денеге түсірілген барлық күштердің қорытқы моменті, ал $\sum_{i=1}^{\infty} \Delta m_i \cdot R_i^2$ тұтас дененің инерция моменті болып табылады. Сонда (14.6) өрнегі

$$\vec{M} = J\vec{\epsilon} \text{ немесе } \vec{\epsilon} = \frac{\vec{M}}{J}. \quad (14.7)$$

Бұл айналмалы қозғалыстағы дене үшін жазылған Ньютонның екінші заңы. Ол былай оқылады: айналмалы қозғалыстағы дененің бұрыштық үдеуі денеге түсірілген күштердің қорытқы моментіне тура пропорционал, ал дененің инерция моментіне кері пропорционал болады.

$\vec{\epsilon}$ және \vec{M} векторларының бағыттары бұранда ережесімен анықталады. Біздің жағдайымызда олар бізден әрі бағытталған (14.5-сурет).



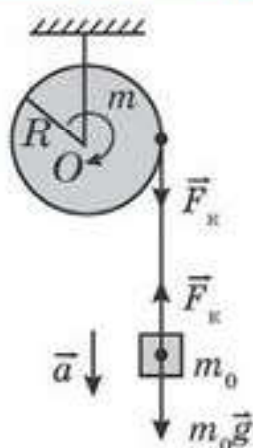
14.5-сурет



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Бекітілген осьті айналған дененің кинетикалық энергиясы бола ма?
2. Штейнер теоремасы қалай айтылады?
3. Дененің инерция моменті қандай параметрлерге тәуелді?
4. Айналмалы қозғалыс үшін Ньютонның екінші заңы қалай айтылады?
5. Ілгерілемелі қозғалыс пен айналмалы қозғалыстар үшін Ньютонның екінші заңының арасында ұқсастық бар ма? Қандай?

Есеп шығару үлгілері



14.6-сурет

1-есеп. Тұтас цилиндр түріндегі массасы m және радиусы R блокқа жіп оралып, оның бір ұшына массасы m_0 жүк ілінген. Жүктің сызықтық үдеуін табындар. Блоктың осінде үйкеліс жоқ, жіп созылмайды (14.6-сурет).

Шешуі. Қозғалысқа екі дене қатысады: массасы m_0 жүк $|\vec{a}|$ үдеумен ілгерілемелі қозғалады және блок ϵ бұрыштық үдеумен айналады. Әрбір дене үшін Ньютонның екінші заңын жазамыз:

$$\begin{cases} m_0 g - F_k = m_0 a; \\ F_k R = J \epsilon. \end{cases}$$

Жіп сырғанамайтын болса, онда $a = \epsilon R$. Осыны ескерсек, жоғарыдағы теңдеулер мына түрге келеді:

$$\begin{cases} m_0 g - F_k = m_0 a; \\ F_k R = J \frac{a}{R}. \end{cases}$$

Жүйенің екінші теңдеуінен $F_k = J \frac{a}{R^2}$ шығады, оны бірінші теңдеуге қойып түрлендіреміз: $m_0 g - J \frac{a}{R^2} = m_0 a$, $a = \frac{m_0 g}{\frac{J}{R^2} + m_0}$. $J = \frac{m R^2}{2}$ екенін

ескеріп, іздеп отырған үдеуді табамыз: $a = \frac{2 m_0}{m + 2 m_0} g$.

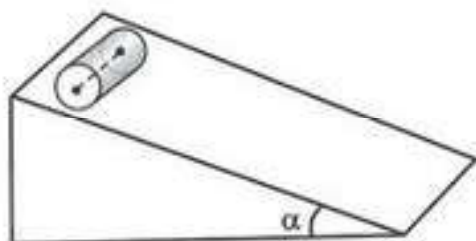
2-есеп. Массасы m және радиусы R тұтас цилиндр көлбеу жазықтан домалап келеді. Жазықтықтың көлбеулік бұрышы α . Үйкелісті ескермей, цилиндрдің сызықтық үдеуін табындар.

Шешуі. Цилиндр екі түрлі қозғалысқа түседі (14.7, 14.8-суреттерде цилиндрдің қимасы көрсетілген):

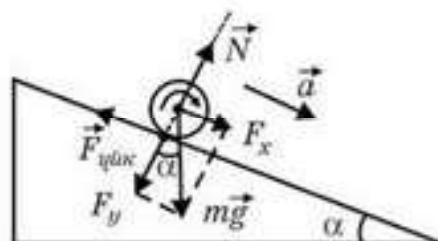
а)

$$a = \frac{F_x - F_{\text{үйк}}}{m} \tag{1}$$

үдеуімен ілгерілемелі және



14.7-сурет



14.8-сурет

ә)

$$\varepsilon = \frac{F_{\text{тан}} R}{J} \quad (2)$$

бұрыштың үдеуімен айналымы козғалады, мұндағы $F_{\text{тан}} R$ — тыныштық үйкеліс күшінің цилиндрдің центрі арқылы өтетін айналу осіне қатысты анықталған моменті. \vec{N} тіректің реакция күші мен $m\vec{g}$ ауырлық күші айналымы моментті тудырмайды. (2) теңдеуден

$F_{\text{тан}} = \frac{J\varepsilon}{R}$ тауып, оны (1) теңдеуге қойып және $a = \varepsilon R$, $F_x = mg \sin \alpha$

екенін ескерсек, $a = \frac{mgsin\alpha - \frac{Ja}{R^2}}{m}$ немесе $a = \frac{mgsin\alpha}{m + \frac{Ja}{R^2}}$, мұндағы

$$J = \frac{mR^2}{2}, \text{ сонда } a = \frac{2}{3} g \sin \alpha.$$

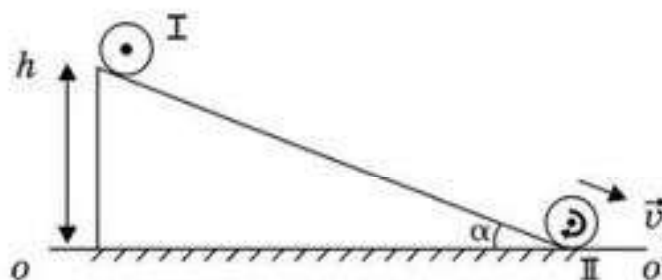
Шайбаның көлбеу жазықтықпен үйкеліссіз сырғанауы кезіндегі үдеуі $a = g \sin \alpha$. Біздің жағдайымызда үдеу $a = \frac{2}{3} g \sin \alpha$ кем. Бұл түсінікті де, себебі дөңгелектің потенциалдық энергиясының бір бөлігі айналымы козғалыстың кинетикалық энергиясына айналады. Келесі бөлігі ілгерілемелі козғалыстың кинетикалық энергиясына айналады. Енді осы шаманы анықтайық.

Тұтас цилиндр көлбеулік бұрышы α болатын көлбеу жазықтықпен домалап келе жатыр дейік (14.9-сурет).

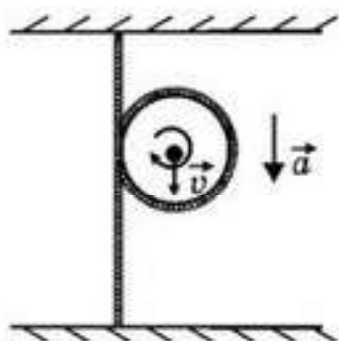
Энергияның сақталу заңын пайдаланайық. Нөлдік деңгей ретінде алынып отырған $|OO'|$ деңгейге қатысты $mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}$, ал $v = \omega R$

болғандықтан, $W_{\text{к. тан}} = \frac{\frac{mR^2}{2} \cdot v^2}{2R^2} = \frac{mv^2}{4}$, сонда $mgh = \frac{mv^2}{4} + \frac{mv^2}{4} = \frac{3}{4} mv^2$.

Олай болса, $\frac{W_{\text{к. тан}}}{mgh} = \frac{\frac{mv^2}{4}}{\frac{3}{4} mv^2}$, яғни $\frac{W_{\text{к. тан}}}{mgh} = \frac{1}{3}$ немесе $W_{\text{к. тан}} = \frac{1}{3} mgh$.



14.9-сурет



14.10-сурет

Энергияның $\frac{2}{3}$ бөлігі ілгерілемелі қозғалыстың кинетикалық энергиясына, ал $\frac{1}{3}$ бөлігі айналмалы қозғалыстың кинетикалық энергиясына айналады екен. Міне, сондықтан да тұтас цилиндрдің үдеуі $a = \frac{2}{3}g \sin \alpha$ болып шықты. *Ілгерілемелі үдеу шамасына айнымалы қозғалыстың емес, ілгерілемелі қозғалыстың өспелі кинетикалық энергиясы әсер ететіні белгілі (14.9-сурет). Енді төмендегі есепті шығарып көрейік.*

3-есеп. Біртекті ауыр арқан салмақсыз дөңгелекті айналып, екі ұшынан бір вертикаль бойында бекітілген (14.10-сурет). Дөңгелекті босататын болсақ, ол қандай үдеумен қозғалар еді?

Шешуі. Энергияның сақталу заңы бойынша

$$mg \Delta h = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \text{ мұндағы } J = mR^2, \omega = \frac{v}{R}, \text{ онда } mg \Delta h = \frac{mv^2}{2} + \frac{mR^2 v^2}{2R^2} \text{ немесе } mg \Delta h = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2}, \text{ демек, толық энергияның}$$

жартысы айналмалы қозғалысқа, ал екінші жартысы ілгерілемелі қозғалысқа жұмсалады. Демек, $a = \frac{g}{2}$.

4-есеп. Диаметрі 6 см тең шарик 70 см арақашықтыққа дейін домалап, 2 с уақыттан кейін тоқтайды. Домалау үйкеліс коэффициентін тұрақты деп есептеп, табындар.

Шешуі: Айналмалы қозғалыстың негізгі тендеуі: $M = \epsilon J$, мұндағы $J = 0,4 mr^2$ — шардың инерция моменті. Тангенциал үдеудің бұрыштық үдеумен байланысты: $a_t = \epsilon r$.

Демек, $M = 0,4 mr^2 \frac{a_t}{r} = 0,4 amr$. Үйкеліс күшінің моменті $M = F_{\text{үйк}} r$, яғни $F_{\text{үйк}} = M$. Сонда, $M = \mu mgr$ тең. $\mu = 0,4 \frac{a}{g}$.

$s = \frac{at^2}{2}; a = \frac{2s}{t^2} = \frac{1,4}{4} = 0,35 \text{ м/с}^2$. Сан мәндерін қойып, домалау үйкеліс коэффициентінің мәні $\mu = 0,014$ тең.

Жауабы: 0,014



Үй шеберханасы

Талдаңдар

Анықтамалық ақпараттарды пайдалана отырып, Жердің өз осін айналуының инерция моментін анықтаңдар.
Жауабы: $9,6 \cdot 10^{37} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Шығарыңдар

1. Айналу осінен 20 см қашықтықта орналасқан массасы 300 г материялық нүктенің инерция моментін анықтаңдар.
Жауабы: $12 \text{ г} \cdot \text{м}^2$

2. Ұзындығы 90 см және массасы 300 г біртекті сырықтың екі ұшына массалары 100 г және 200 г жүктер ілінген. Осы жүйенің инерция моментін табыңдар, егер айналу осі сырыққа перпендикуляр және а) бірінші жүк арқылы; ә) бірінші жүктен 30 см қашықтықта орналасқан нүкте арқылы өтеді.

Жауабы: а) $0,243 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; ә) $108 \text{ г} \cdot \text{м}^2$; б) $81 \text{ г} \cdot \text{м}^2$

3. Айналу осі пластинаның бір қыры арқылы өтеді, ал екінші қырының ұзындығы 20 см тең. Массасы 900 г біртекті тікбұрышты пластинканың инерция моментін анықтаңдар.

Жауабы: $12 \text{ г} \cdot \text{м}^2$

4. Радиусы 20 см және массасы 1 кг дискінің инерция моментін есептеңдер. Айналу осі дискіге перпендикуляр және а) дискінің центрі; ә) дискінің радиусының ортасы арқылы өтеді.

Жауабы: а) $20 \text{ г} \cdot \text{м}^2$; ә) $30 \text{ г} \cdot \text{м}^2$

5. Инерция моменті $63,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ маховик $31,4 \text{ рад/с}$ бұрыштық жылдамдықпен айналады. Егер ол 20 с соң тоқтаса, маховиктің күш моментін анықтаңдар.

Жауабы: $100 \text{ Н} \cdot \text{м}$

6. Массасы 50 кг, формасы 50 см диск тәріздес дөңгелектің жиегіне 100 Н жанама күш түсірілген. а) Дөңгелектің бұрыштық үдеуін; ә) күш әсер еткеннен соң қанша уақытта дөңгелектің айналу жиілігі 6000 айн/мин болатынын табыңдар.

Жауабы: а) 8 рад/с^2 ; ә) $78,5 \text{ с}$

7. Массасы 400 г жылжымайтын блок арқылы өткізілген жіптің екі жағына массалары 100 г және 140 г жүктер ілінген. Жүктер қандай үдеумен қозғалады? Блоктың үйкелісі ескерілмейді.

Жауабы: $0,91 \text{ м/с}^2$

8. Массасы 100 г және радиусы 5 см цилиндр білік минутына 480 айналым жасап айналады. Білікке оны 10 с соң тоқтататын колодка жабыстырылған. Білік пен колодка арасындағы үйкеліс күші 40 Н болса, үйкеліс коэффициентін есептеңдер.

Жауабы: 0,3

Рефлексия

1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба, жоқ көмек қажет пе?
2. "Шығармашылық шеберхана" айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?

§ 15. Күш импульсі. Импульс моментінің сақталу заңы. Айналмалы қозғалыс динамикасының негізгі теңдеуі



Тірек ұғымдар: импульс моменті, айналмалы қозғалыс динамикасының негізгі теңдеуі.

Бүгінгі сабақта: есеп шығару кезінде импульс арқылы жазылған Ньютонның екінші заңын қолдануды үйренесіңдер.

$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$ импульс арқылы өрнектелген Ньютонның екінші заңын айналмалы қозғалысқа қолдану қолайсыз. Сондықтан оны айналмалы қозғалыс үшін Ньютонның екінші заңын $\vec{M} = J \cdot \vec{\epsilon}$ пайдаланып қайта жазамыз. $\vec{\epsilon} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t}$ екенін ескеріп, $\vec{M} = J \cdot \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t}$ аламыз. Ендеше,

$$\vec{M}\Delta t = J\Delta\vec{\omega} \text{ немесе } \vec{M}\Delta t = \Delta(J\vec{\omega}). \quad (15.1)$$

$J\vec{\omega}$ көбейтіндісі *дененің импульс моменті* деп аталады және \vec{L} әрпімен белгіленеді:

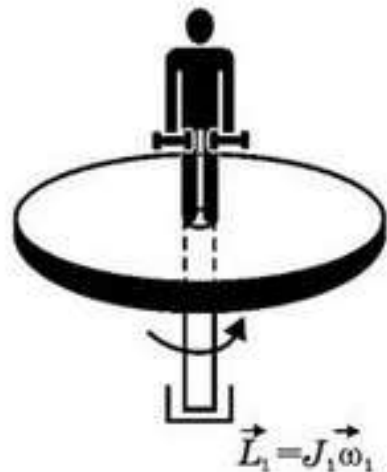
$$\vec{L} = J\vec{\omega}. \quad (15.2)$$

Сонда (15.1) өрнек мына түрге келеді:

$$\vec{M}\Delta t = \Delta\vec{L}. \quad (15.3)$$

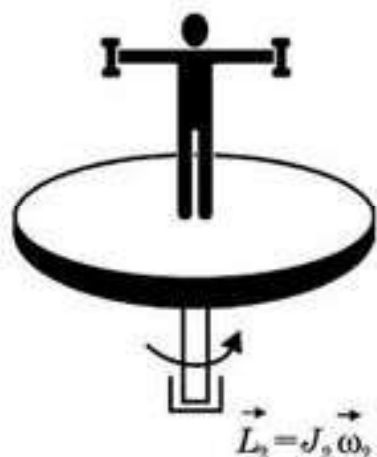
$\vec{M}\Delta t$ көбейтіндісі сыртқы күштердің *қорытқы импульс моменті* деп аталады, яғни (15.3) теңдеу айналмалы қозғалыс үшін импульс арқылы жазылған Ньютонның екінші заңы: денелер жүйесіне түсірілген барлық сыртқы күштердің қорытқы импульс моменті жүйенің импульс моментінің өзгерісіне тең. Егер жүйе тұйықталған, яғни сыртқы күштердің қорытқы моменті нөлге тең болса, онда (15.2) теңдеуден $\Delta\vec{L} = 0$ немесе $\vec{L} = J\vec{\omega} = \text{const}$. Бұл — *импульс моментінің сақталу заңы*: тұйық жүйедегі импульс моменттерінің векторлық қосындысы тұрақты шама (сақталады).

Осы заңға мысалдар келтірейік.

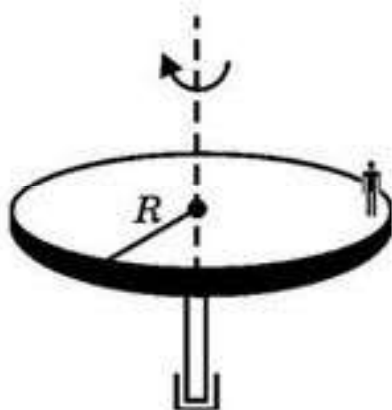


15.1-сурет

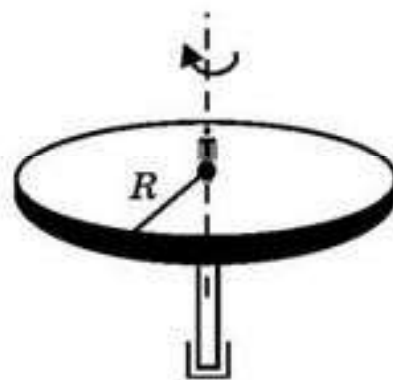
1-мысал. Жуковский орындығында (жеңіл айналатын дөңгелек орындық) екі қолына гантель ұстаған адам тұр. Оны ω_1 бұрыштық жылдамдықпен айналдырамыз. Орындық—гантель—адамнан тұратын денелер жүйесінің инерция моменті J_1 , яғни жүйенің импульс моменті $\vec{L}_1 = J_1\vec{\omega}_1$ (15.1-сурет). Адам екі жаққа қолын созса (15.2-сурет), инерция моменті J_2 мәнге дейін артады да, импульс моментінің сақталу заңының өрнегі бойынша $\vec{L}_1 = \vec{L}_2$, $J_1\vec{\omega}_1 = J_2\vec{\omega}_2$, яғни бұрыштық $|\vec{\omega}_2|$ жылдамдық



15.2-сурет



15.3-сурет



15.4-сурет

кемді. Қолын түсірген кезде бұрыштық жылдамдық артып, бұрынғы $|\vec{\omega}_1|$ мәнін қабылдайды.

2-мысал. Бала ω_1 бұрыштық жылдамдықпен айналып тұрған, радиусы $R = 2$ м дөңгелек платформаның шетінде тұр. Баланың массасы m_1 , платформаның массасы m_2 . Ол платформаның центріне өтеді. Баланы мипериялық нүкте деп алып, оның ω_2 бұрыштық жылдамдығын табу керек.

Шешуі. Жүйенің инерция моменті бірінші жағдайда (15.3-сурет)

$$J_1 = m_1 R^2 + \frac{m_2}{2} R^2, \text{ екінші жағдайда (15.4-сурет) } J_2 = \frac{m_2 R^2}{2} \cdot J_1 \omega_1 = J_2 \omega_2$$

болғандықтан, $\omega_2 = \frac{J_1}{J_2} \omega_1, \omega_2 = \frac{m_1 R^2 + \frac{m_2 R^2}{2}}{\frac{m_2 R^2}{2}} \omega_1$ немесе $\omega_2 = \left(\frac{2m_1}{m_2} + 1 \right) \omega_1$.

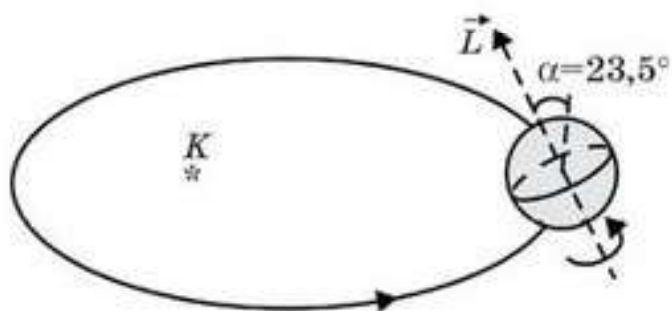
Жүйенің кинетикалық энергиясы қалай өзгереді? $\frac{m_1}{m_2} = 1$ болса, онда $\omega_2 = 3\omega_1$, бұрыштық жылдамдық 3 есе артады :

$$W_1 = \frac{J_1 \omega_1^2}{2}; W_2 = \frac{J_2 \omega_2^2}{2}; \frac{W_2}{W_1} = \frac{J_2 \omega_2^2}{J_1 \omega_1^2} = \frac{m R^2 \cdot 9}{3m R^2}; \text{ яғни } \frac{W_2}{W_1} = 3, \text{ айнал-}$$

малы қозғалыстың кинетикалық энергиясы да 3 есе артады. Ненің есебінен? Берілген жүйе тұйық. Ілгерілемелі қозғалыс динамикасында *ішкі күштер* $|\vec{a}|$ сызықтық үдеуінің шамасына әсер етпесе, онда айналмалы қозғалыс динамикасында ішкі күштердің жұмысы шешуші мәнге ие болады. Керісінше инерцияның центрден тепкіш күші гантельді лақтырады, сондықтан айналмалы қозғалыстың кинетикалық энергиясы азаяды, егер гантельді денеге жинаса, онда жұмыс жасауға тура келеді. Ол жұмысты энергияның сақталу заңын $A = \Delta W_k$ пайдаланып та есептеуге болады. Айналмалы қозғалыс динамикасында ішкі күштердің қорытқы жұмысы түрлі нәтижелер беруі



15.5-сурет



15.6-сурет

мүмкін (3-мысал). Егер сыртқы күштердің импульс моменті нөлге тең болса, онда дененің импульс моменті \vec{L} шамасы және бағыты бойынша тұрақты болып қалады, оның үлкен практикалық мәні бар.

3-мысал. Дөңгелекті ешқандай кедергісіз айналуға мүмкіндік беретін және осін өзіне қатысты кез келген бағытта бұруға болатын (кеңістіктің x, y, z осьтеріне қатысты) етіп тіреуішке орнатуға болады. Мұндай құрал *гироскоп* деп аталады (15.5-сурет). Подшипниктердегі кедергіні ескермесек, онда гироскоптың дөңгелегіне ешқандай күш моменттері түсірілмеген деуге болады. Ал бұл құрал қалай қозғалса да, айналу осі өзінің кеңістіктегі алғашқы бағытын сақтап қалады деген ұғымды білдіреді.

Гироскоптар белгілі бір бағытты қатаң ұстап отыру керек болатын кезде қолданылады. Мысалы, зымыран траекторияның белсенді ұшу бөлігінде айнала алады, сүңгуір қайық теңіз ағынына қарай бұрылуы мүмкін. Ұшақтың автопилоты да осындай принциппен жұмыс істейді. Қарудағы бұранда ойықшалар снарядтың (октың) тез айналуына мүмкіндік береді де, олардың нысанаға қарай қозғалысы орнықтырақ болады және т.б.

Жер $\vec{L} = J_0 \vec{\omega}$ импульс моменті бар аса зор гироскоп болып табылады, мұндағы $J = \frac{2}{5} mR^2$ және $\omega = \frac{2\pi}{T}$, мұндағы m, R — сәйкесінше Жердің массасы мен радиусы, T — айналу периоды (тәулік). Жер—Күн жүйесін жеткілікті түрде тұйықталған деп қарастыруға болады, сондықтан \vec{L} вектордың кеңістіктегі бағыты алыстағы жұлдыздарға қатысты өзгеріссіз қалады және үнемі Темірқазыққа қарай “бағытталады”. Міне, сондықтан да жыл мезгілдері ауысып отырады (15.6-сурет).

Ілгерілемелі және айналмалы қозғалыс кезіндегі физикалық шамалардың сипаттамалары 15.1-кестеде берілген.

Ілгерілемелі қозғалыс		Айналымды қозғалыс		
Орын ауыстыру	\vec{s}	$s = \phi R$	Бұрыштық орын ауыстыру	ϕ
Сызықтық жылдамдық	$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$	$v = \omega R$	Бұрыштық жылдамдық	$\omega = \frac{\phi}{t}$
Тангенциалды үдеу	$\vec{a}_t = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$	$a_t = \epsilon R$	Бұрыштық үдеу	$\epsilon = \frac{\omega - \omega_0}{t}$
Масса	m	$J = mR^2$	Инерция моменті	$J = mR^2$
Күш	\vec{F}	$M = Fd$	Күш моменті	M
Дененің импульсі	$\vec{p} = m\vec{v}$		Импульс моменті	$L = J\omega$
Ньютонын екінші заңы	$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$		Ньютонын екінші заңы	$\epsilon = \frac{M}{J}$
Импульстік түрдегі Ньютонын екінші заңы	$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$		Импульстік түрдегі Ньютонын екінші заңы	$\vec{M}\Delta t = \Delta\vec{L}$
Кинетикалық энергия	$W_k = \frac{mv^2}{2}$		Кинетикалық энергия	$W_k = \frac{J\omega^2}{2}$



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Дене импульсінің моменті деп қандай шаманы айтады?
2. Айналып тұрған платформаның шетіне ауыр дене қойғанда оның бұрыштық жылдамдығы қалай өзгереді?
3. Жүйенің ішкі күштерінің жұмысы ілгерілемелі қозғалыста оның кинетикалық энергиясын өзгертпейді, ал айналымды қозғалыста бұл күштердің жұмысы айналыстағы дененің энергиясын өзгертеді. Неліктен?
4. Жер өзінің Күнді айналу қозғалысында неліктен айналу осінің көлбеулігін өзгертпей сақтайды?
5. Гироскоп дегеніміз не?
6. Жер өзінің Күнді айналу қозғалысында неліктен айналу осінің көлбеулігін өзгертпей сақтайды?

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Гироскоптың айналу осін сақтап қалу эффектісін бақылаңдар. Осы құбылысты түсіндіріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

1. Кез келген пластикалық бөтелкенің тығынында екі тесік жасап, ол арқылы екі жіпті өткізу керек. Тығынды жіпке параллель өтетін осьпен айналдырып, жіпті орайды. Жіпті тартып, тығынның айналуын бақылаңдар. Процесті түсіндіріңдер.

2. Тік ұстаған сұқ саусақта баскетбол добын айналдырыңдар. Неге саусақта айналып тұрған допты ұстау оңай, ал қозғалмайтын доп құлап қалады?

Шығарыңдар

1. Массасы 50 г материялық нүктенің одан 20 см қашықтықтағы оське қатысты инерция моментін табыңдар.

Жауабы: $2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

2. Инерция моменті $63,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ маховик тұрақты $31,4 \text{ рад/с}$ бұрыштық жылдамдықпен айналады. Маховикті 20 секундтан кейін тоқтататын тежеуші моментті табыңдар.

Жауабы: $100 \text{ Н} \cdot \text{м}$

3. Массасы 100 кг, радиусы 5 см білік 8 Гц жиілікпен айналады. Біліктің (валдың) цилиндрлік бетін 40 Н күшпен басатын тежеуші қалыптың әсерінен білік тоқтайды. Қалып пен білік арасындағы үйкеліс коэффициенті 0,3-ке тең болса, білік қанша уақытта тоқтайды?

Жауабы: 10 с

4. Горизонталь дөңгелек тәріздес радиусы 1 м платформа оның центрі арқылы өтетін вертикаль осьтің маңайында 6 айн/мин жиілікпен айналады. Платформаның шетінде массасы 80 кг адам тұр. Егер адам оның центріне өтсе, платформа қандай жиілікпен айналады? Платформаның инерция моменті $120 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, ал адамның инерция моментін материялық нүктенің инерция моменті ретінде алыңдар.

Жауабы: 10 айн/мин

5. Массасы 2 кг диск горизонталь жазықтықта 4 м/с жылдамдықпен сырғанамай домалап келеді. Оның кинетикалық энергиясын табыңдар.

Жауабы: 24 Дж

Рефлексия

1. Өткен материалдың барлығы түсінікті ме? Түсінбеген материалды өздігіңнен меңгере аласың ба, жоқ көмек қажет пе?
2. "Шығармашылық шеберхана" айдарындағы тапсырмаларды орындағанда қиындықтар туындады ма?
3. Параграфтағы қай материал сендерге қызық болды?
4. Игерген материал сендерді ойлап табуға, зерттеуге қызығушылықтарыңды оятты ма?



ЕҢ МАҢЫЗДЫЛАР

2

тараудың ең маңыздысы

Динамика — механикалық қозғалысты, оны тудыратын себептерді ескеріп зерттейтін механиканың бөлімі. Динамика бөлімінің негізгі ұғымдарына *масса* мен *күш* жатады.

Классикалық механиканың негізін Ньютон ашқан үш заң құрайды.

I заң: еркін дене бірқалыпты және түзусызықты қозғалатын немесе тыныштық күйін сақтайтын санақ жүйелері болады.

II заң: дененің алатын үдеуінің шамасы оған әсер етуші қорытқы күштің шамасына тура пропорционал және дене массасына кері пропорционал, ал үдеу векторы қорытқы күшпен бағыттас: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

III заң: күш өзара әсер кезінде туындайды және олардың тегі бірдей; олар қос-қостан пайда болады, осы күштердің модульдері тең; олар бір түзудің бойымен, қарама-қарсы бағытта әсерлеседі: $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

Күштер табиғатына қарай *гравитациялық*, *электромагниттік*, *әлсіз* және *күшті* болып бөлінеді.

Бүкіләлемдік тартылыс заңы екі нүктелік массалардың бір-біріне тартылу күшін анықтауға мүмкіндік береді: $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$. Бүкіләлемдік тартылыс күшін *ауырлық күші* деп атайды, ол Жердің денеге әсер ету күші — $F_a = mg$, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — Жердегі еркін түсу үдеуі.

Серпімділік күші — табиғаты гравитациялық күштер. Оның шамасын Гук заңына сүйеніп анықтайды: $F_c = -kx$.

Үйкеліс күші — табиғаты электромагниттік күштер. Оның шамасын Кулон—Амонтон заңына сүйеніп табады: $F_{\text{үйк}} = \mu N$.

Архимед күші — бұл да табиғаты электромагниттік күштер. Архимед заңының көмегімен оның шамасын анықтайды: $F_A = \rho g V$. Бұл күш сұйықтағы және газдағы денелерді ығыстырушы күш.

Айналмалы қозғалыс кезінде келесі заңдар орындалады:

<p>Айналмалы қозғалыстың энергиясы:</p> $W_k = \frac{J\omega^2}{2}$	<p>Гюйгенс—Штейнер теоремасы:</p> $J = J_0 + ma^2$
<p>Айналмалы қозғалыс үшін Ньютонның екінші заңы: $\epsilon = \frac{M}{J}$</p>	<p>Айналмалы қозғалыстың импульстік түрдегі Ньютонның екінші заңы: $M\Delta r = \Delta L$</p>
<p>Импульс моментінің сақталу заңы: $J\omega = \text{const}$</p>	

3-тарау. СТАТИКА

§ 16. Денелердің тепе-теңдігі. Күш моменті.
Тепе-теңдік шарттары

Тірек ұғымдар: статика, денелердің тепе-теңдігі, күш моменті, күш нүні, массалар центрі, массалар центрі жүйесі (Ц-жүйе), ауырлық центрі.

Бүгінгі сабақта: статиканың негізгі түсініктерімен танысасыздар: тепе-теңдік күйлерін, денелердің массалар центрін және ауырлық центрін анықтауды үйренесіздер.

Қатты денелерге әртүрлі күштер әсер еткенде олардың тепе-теңдікте болу шартын зерттейтін механиканың бөлімі статика деп аталады.

Тепе-теңдік деп дененің тыныштық күйін түсінеміз. Осымен байланысты статиканың негізгі міндеті — денелерге күштер әсер еткеніне карамастан қандай шарт орындалғанда оның тепе-теңдікте болатынын анықтау. Тепе-теңдік шартын білу практикалық тұрғыдан әртүрлі құралдарды, машина механизмдерін, құрылыстардың құрылымдарын дұрыс есептей білу үшін қажет.

Статикада дене *абсолют қатты*, яғни деформацияланбайтын дене ретінде қарастырылады. Әрине, бұл бір тұрғыдан тым қатаң болжам. Шындығында, кез келген дене деформацияланады, бірақ деформациялану шамасы дененің өлшемдерімен салыстырғанда әлдеқайда аз, сондықтан бұл деформацияны ескермесе де болады.

Дененің тепе-теңдік (статикалық) күйі оның динамикалық күйінің үдеу және жылдамдық нөлге тең болатын дербес жағдайына сәйкес келеді. Сондықтан денелердің тепе-теңдік шарты динамиканың ітерілемелі және айналмалы қозғалыс теңдеулерінің, яғни Ньютон заңдарының салдары түрлерінде алынады.

Ньютонның екінші заңына сәйкес

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (16.1)$$

мұндағы $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$ — денеге әсер ететін барлық күштердің векторлық қосындысы. Егер бұл қосынды нөлге тең болса, яғни

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = 0, \quad (16.2)$$

онда (16.1) теңдеуінің салдары ретінде үдеу нөлге тең болады. Демек, $\vec{a} = 0$ және бастапқы жылдамдық нөлге тең болған жағдайда ($\vec{v}_0 = 0$) берілген санақ жүйесінде дене қозғалмайды, ол тепе-теңдік күйінде болады. Сонымен, *денелердің тепе-теңдігінің бірінші шарты* (16.2) теңдеуінде *сипатталады*, яғни денеге әсер ететін барлық күштердің векторлық қосындысы нөлге тең.

Бұл (16.2) теңдеу шарты денелердің тепе-теңдігінің жеткілікті емес, қажетті шарты ғана болып табылады, себебі қатты дене тек ілгерілемелі ғана емес, айналмалы қозғалысқа да қатысуы мүмкін.

Тепе-теңдіктің екінші шарты қатты денелердің айналмалы қозғалысының негізгі теңдеуінен алынады:

$$M = J\varepsilon, \quad (16.3)$$

мұндағы J — инерция моменті, $M = M_1 + M_2 + M_3 + \dots$ — денеге әсер ететін барлық күш моменттерінің алгебралық қосындысы. Егер ол нөлге тең болса, онда

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + \dots = 0. \quad (16.4)$$

(16.3) теңдеуінің салдары ретінде бұрыштық үдеу нөлге тең, демек, $\varepsilon = 0$ және бастапқы бұрыштық жылдамдық нөлге тең болған ($\omega = 0$) жағдайда дене айналмай тепе-теңдікте болады. Денеге әсер ететін барлық моменттердің нөлге тең болуы денелердің тепе-теңдігінің екінші шарты болып табылады. Бұл жағдайда денені сағат тілінің айналу бағытымен айналдыратын момент оң, ал сағат тілінің айналу бағытына қарсы айналдыратын момент теріс деп есептеледі.

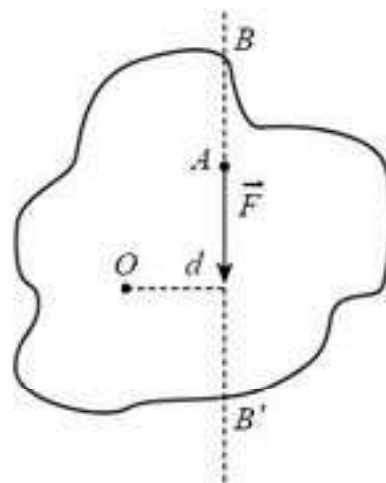
Күш моменті деп F күш модулінің d иінге көбейтіндісіне тең болатын шаманы айтады:

$$M = Fd. \quad (16.5)$$

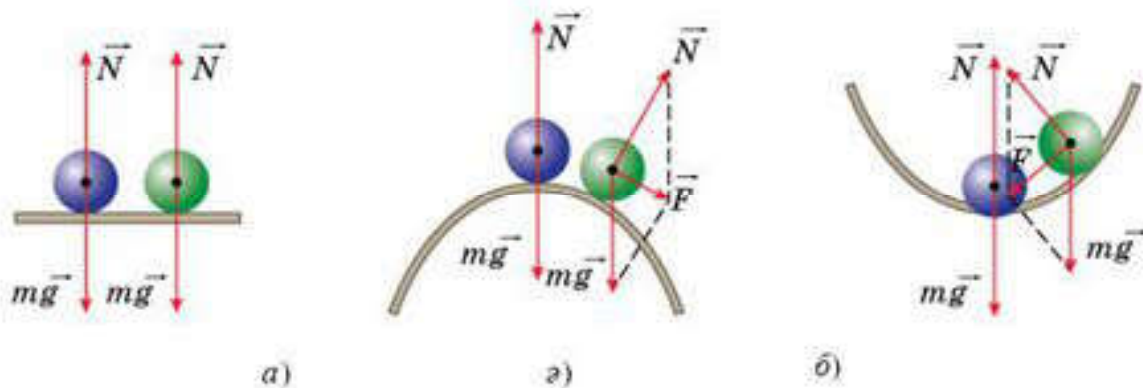
Иін — ол күштің әсер ету сызығынан айналу осіне дейінгі ең аз арақашықтық. Мысалы, 16.1-суретте O — айналу осі, A — күштің әсер ету нүктесі, ал BB' — күштің әсер ету сызығы. Денелердің тепе-теңдігін қарастырған кезде күштің әсер ету нүктесін оның әсер ету сызығының бойымен өзгертуге болады.

Сонымен, қатты денелердің тепе-теңдікте болуының қажетті және жеткілікті шарттары мыналар: денеге әсер ететін барлық күштердің векторлық қосындысы және күш моменттерінің алгебралық қосындысы бастапқы v_0 сызықтық және ω_0 бұрыштық жылдамдық нөлге тең болған жағдайда нөлге тең болуы керек.

Денелерге әсер ететін барлық күштердің өзара теңгерілетін жағдайы оның тепе-теңдік жағдайына сәйкес келеді. Мұндай тепе-теңдік орнықты, орнықсыз және бейтарап болуы мүмкін. Егер дене тепе-теңдік шартынан ауытқыған кезде оған әсер ететін күштер оны қайтадан тепе-теңдік қалпына алып келетін болса, онда тепе-теңдік *орнықты тепе-теңдік болғаны* (16.2, а-сурет). Ал денені тепе-



16.1-сурет



16.2-сурет

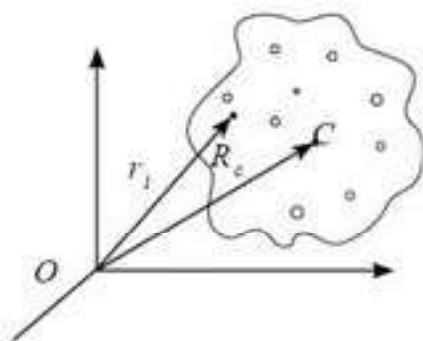
теңдіктен ауытқығанда әсер ететін күштер оны одан әрі тепе-теңдік қалпынан алысқа алып кетсе, тепе-теңдік *орнықсыз* болғаны (16.2, а-сурет). Дене тепе-теңдік қалпынан ауытқығанда ол жаңа орында бәрібір тепе-теңдік күйде болса, онда ол *бейтарап* тепе-теңдік болғаны (16.2, б-сурет).

Әртүрлі денелердің орнықтылығын зерттегенде массалар центрі және ауырлық центрі ұғымы маңызды рөл атқарады. Массалар центрі мен ауырлық центрі көп жағдайда бір-біріне сәйкес келгенмен, жалпы бір ұғым болып табылмайды.

Массалар центрі — дененің немесе денелер жүйесінің қозғалысын бүтін дене ретінде сипаттайтын геометриялық нүкте. Оның орны массалары $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ болатын n бөліктен тұратын дене үшін мынадай радиус вектормен анықталады:

$$\vec{R}_c = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_3 \vec{r}_3 + \dots + m_n \vec{r}_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (16.3)$$

мұндағы \vec{r}_i — i -бөліктің радиус векторы (16.3-сурет). Массалар центрі түсінігі қатты денелердің қозғалысын қарастырғанда кеңінен қолданылады. Қатты дененің қозғалысын оның массалар центрінің қозғалысы мен сол массалар центріне қатысты айналмалы қозғалыстың



16.3-сурет

суперпозициясы ретінде қарастыруға болады. Қатты дененің массалар центрі массасы осы дененің массасына тең, бірақ өлшемі өте аз, материялық нүкте қалай қозғалса, ол да сол бағытта қозғалады. Осы нүктенің қозғалысын сипаттау үшін Ньютон заңдарын қолдануға болады. Көп жағдайда тұйық жүйенің қозғалысын массалар центрімен байланысқан санақ жүйесінде қарастыру ыңғайлы. Мұндай жүйені *массалар центрі жүйесі* (Ц-жүйе) деп

атайды. Бұл жүйеде толық импульс әрқашан нөлге тең болғандықтан, дененің қозғалыс теңдеуі қарапайым түрге келтіруге болады. Симметриялы дененің массалар центрі оның геометриялық центрінде болады. Кейбір пішіні күрделі дененің массалар центрі оның сыртында орналасуы мүмкін.

Қайықтың тепе-теңдігі онда отырған адам тұрса қалай өзгереді? Түсіндіріңдер.

Механикалық жүйенің *ауырлық центрі* деп оған әсер ететін ауырлық күшінің қосынды моменті нөлге тең болатын нүктені айтады. Басқаша айтқанда, ауырлық центрі — ол ауырлық күші әсер ететін нүкте. Ауырлық центрі ұғымы тек ауырлық күші өрісіндегі денелер үшін ғана қолданылады. Жердің маңында ауырлық күшінің өрісі біртекті болғандықтан, ауырлық центрі массалар центрімен дәл келеді.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Тепе-теңдік деп нені түсінесіңдер?
2. Қандай жағдайда дене тепе-теңдікте болады?
3. Тепе-теңдіктің қандай түрлерін білесіңдер?
4. Тепе-теңдік барынша орнықты болу үшін не істеу керек?
5. Массалар центрі мен ауырлық центрінің айырмашылығы неде?
6. Егер дененің массалар центріне күшпен әсер етсек, ол дене қалай қозғалады?

Есеп шығару үлгілері

Денелердің тепе-теңдігін және массалар центрін анықтауға арналған есептердің мысалдарын қарастырайық. Статика туралы есептерді шешу әдетте (16.2) және (16.4) теңдеулерінің негізінде дененің тепе-теңдік шартын жазуды қажет етеді. Ең дұрысы — (16.2) теңдеуін координаталар осьтеріндегі проекциялар үшін жазу. Ал (16.4) теңдеуін жазғанда айналу осін сәтті таңдап алу маңызды. Оны таңдағанда күш індері оңай анықталуы және күш моментінің қосындысындағы құраушыларының саны ең аз болатындай етіп алған жөн.

1-есеп. Саты кабырғаға сүйеп қойылған. α_{\min} бұрыштың қандай ең аз мәнінде ол сырғып кетпейді? Саты мен кабырғаның және саты мен еденнің арасындағы үйкеліс күштерінің коэффициенттері сәйкес μ_1 және μ_2 .

Шешуі. Сызба-сурет жасаймыз және OX және OY осьтерін 16.4-суретте көрсетілгендей етіп таңдап аламыз. Сатыға мына күштер әсер етеді: ауырлық күші $m\vec{g}$, кабырға тарапынан \vec{N}_1 , ал еден тарапынан \vec{N}_2 нормаль реакция күштері және үйкеліс күштері $\vec{F}_{\text{үйк}1}$ және $\vec{F}_{\text{үйк}2}$. Онда саты тепе-теңдігінің (16.2) теңдеуімен анықталатын бірінші шарты мына түрде жазылады:

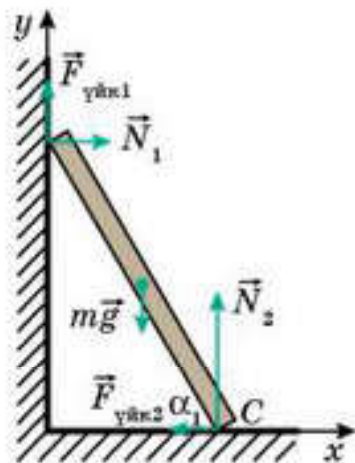
$$m\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{F}_{\text{үйк}1} + \vec{F}_{\text{үйк}2} = 0. \quad (1)$$

Айналу осі ретінде C нүктесін таңдап аламыз, онда (16.4) теңдеуімен анықталған тепе-теңдіктің екінші шарты — күш моменттердің таңбасын ескере отырып мына түрде жазуға болады:

$$N_1 l \sin \alpha + F_{\text{үйк}1} l \cos \alpha - mg \frac{l}{2} \cos \alpha = 0, \quad (2)$$

мұндағы l — сатының ұзындығы. (2) теңдеуден мынаны аламыз:

$$\text{tg } \alpha = \frac{\frac{mg}{2} - F_{\text{үйк}1}}{N_1}.$$



16.4-сурет

Бұл өрнектегі \vec{N}_1 және $\vec{F}_{\text{үйк}1}$ шамаларын ауырлық күші арқылы өрнектейміз. Ол үшін (1) теңдеуін координаталар осьтеріне қатысты жазамыз.

$$OX \text{ осіне проекциясы: } N_1 - F_{\text{үйк}2} = 0,$$

$$OY \text{ осіне проекциясы: } N_2 + F_{\text{үйк}1} - mg = 0.$$

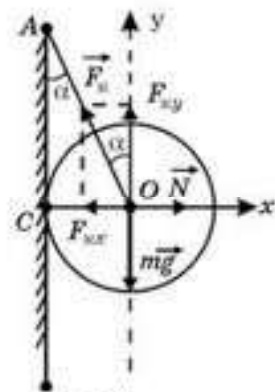
Есептің шарты бойынша α_{\min} минимал бұрышты табуды сұрайды, сондықтан үйкеліс күштерінің максимал мәндерін аламыз, яғни

$$F_{\text{үйк}1} = \mu_1 N_1 \text{ және } F_{\text{үйк}2} = \mu_2 N_2.$$

Онда $N_1 = \frac{\mu_2 ml}{1 + \mu_1 \mu_2}$ және бұрыш үшін соңғы нәти-

жені мына түрде аламыз: $\text{tg } \alpha_{\text{min}} = \frac{1 - \mu_1 \mu_2}{2 \mu_2}$.

Осы есепті айналу осі ретінде O нүктесін таңдай отырып та шығарындар. Алынған нәтиже жөнінде қорытынды жасаңдар. Қай жағдайда есепті шығару оңай болды?



16.5-сурет

2-есеп. Ұзындығы l жіпке радиусы R шар бекітілген. Жіптің екінші ұшы вертикаль қабырғаға бекітілген (16.5-сурет). Шар мен қабырға арасында үйкеліс жоқ. 1) Жіппен қабырғаның арасындағы α бұрышты; 2) жіптің F_x керілу күшін; 3) қабырғаның N реакция күшін табу керек.

Шешуі. Шар мен қабырғаның арасында үйкеліс жоқ болғандықтан, жіптің созындығы шардың O центрі арқылы өтуі тиіс (AO сызығы). Шарға түсірілген күштерді (\vec{F}_x , $m\vec{g}$, \vec{N}) бір O нүктесіне жинақтаймыз (күштерді қатты денедегі әсер ету түзуі бойымен көшіруге болады, бұдан күш әсері өзгермейді). Шар қозғалмайды, яғни ($\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$). \vec{F}_x күшін F_{xx} және F_{xy} құраушыларына жіктеп, Ньютонның бірінші заңын осьтер бойынша жазамыз:

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0, N - F_{xx} = 0 \text{ немесе } N = F_{xx}; \\ \sum F_y = 0; F_{xy} - mg = 0, \text{ немесе } F_{xy} = mg. \end{aligned}$$

$DOCA$ үшбұрышынан α бұрышын анықтаймыз:

$$\sin \alpha = \frac{R}{R + l}.$$

Онда $F_{xx} = F_x \sin \alpha$, $F_{xy} = F_x \cos \alpha$, осыдан

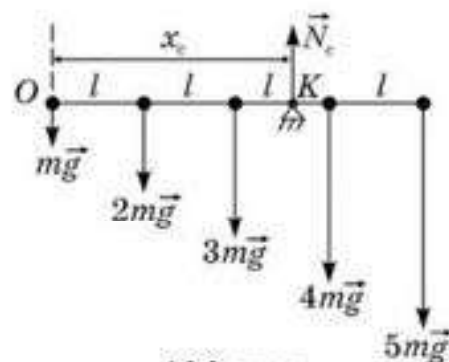
$$F_x \cdot \sin \alpha = N, F_x \cdot \cos \alpha = mg$$

тендеулер жүйесіндегі бірінші тендеуді екінші тендеуге бөліп,

$\text{tg } \alpha = \frac{N}{mg}$ табамыз. Осыдан $N = mg \text{ tg } \alpha$ және $F_x = \frac{mg}{\cos \alpha}$, $N = mg \frac{R}{\sqrt{l(2R + l)}}$

және $F_x = mg \frac{R + l}{\sqrt{l(2R + l)}}$.

3-есеп. Массалары сәйкес m , $2m$, $3m$, $4m$ және $5m$ болатын бес шардың ауырлық центрлері бір-бірінен l қашықтықта болатындай етіп салмақсыз шыбыққа бекітілген. Осы жүйенің ауырлық центрін табындар (16.6-сурет).



16.6-сурет

Шешуі. Ауырлық центрінің шыбықтың сол жақ шетінде орналасқан O нүктесіне қатысты табамыз. Біз ауырлық центрінің қайда екенін білмейміз (оң жақ шетіне жақын орналасу керек деген ойдың келуі анық). Ауырлық центрі K нүктесінде болсын делік, яғни осы нүктеге призманы қойсақ, онда шыбық тепе-теңдікте болады. Күш моменттері теңдеуін O нүктесіне қатысты жазамыз:

$$2mg \cdot l + 3mg \cdot 2l + 4mg \cdot 3l + 5mg \cdot 4l = N_c x_c.$$

Теңдіктің сол жағында шыбыққа сағат тілі бағытында әсер ететін күш моменттері, оң жағында шыбыққа сағат тіліне қарсы бағытта әсер ететін тірек реакция күшінің моменті алынған. Шыбық вертикаль бағытта қозғалмайтындықтан,

$$N_c = mg + 2mg + 3mg + 4mg + 5mg.$$

Осыдан $x_c = \frac{2mg \cdot l + 3mg \cdot 2l + 4mg \cdot 3l + 5mg \cdot 4l}{mg + 2mg + 3mg + 4mg + 5mg}$ немесе $x_c = \frac{8}{3}l$.

Бұл есепті басқа жалпы жағдай үшін де шығаруға болады. Таңдап алынған O нүктесіне қатысты координаталары x_1, x_2, \dots, x_n болатын массалары m_1, m_2, \dots, m_n жүйенің ауырлық центрінің орны жалпы түрде

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \dots + m_n x_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}$$
 теңдеуімен анықталады.

O нүктесіне қатысты мынаны аламыз:

$$x_c = \frac{2ml + 3m2l + 4m3l + 5m4l}{m + 2m + 3m + 4m + 5m} = \frac{40ml}{15m} = \frac{8}{3}l.$$



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

1. Үстел бетіндегі кішкене шардың қозғалысын бақылаңдар. Шардың бұл күйі орнықты ма?
2. 16.7-суреттегі құламайтын ойыншықтың қимылын бақылаңдар және оның неге құламайтынын түсіндіріңдер.



16.7-сурет

Тәжірибе жасаңдар

1. Бөлмедегі есіктің әр бөлігіне күш түсіру арқылы ашып көріңдер. Қандай жағдайда есік оңай ашылады? Тәжірибе нәтижесін түсіндіріңдер.
2. Кәдімгі тауықтың жұмыртқасын (16.8-сурет) пайдалана отырып құламайтын ойыншық дайындаңдар. Ол үшін қандай материалдар керек. Осы ойыншықты қолданып бірнеше тәжірибе жасаңдар.
3. Сенің қолыңда қалың қағаздан жасалған жазық фигура бар. Осы фигураның ауырлық центрін қалай анықтауға болады?



16.8-сурет

Түсіндіріңдер

1. Цирк әртісі арқанның үстімен жүрген кезде неліктен қолына ауыр сырық ұстайды?
2. Не себепті велосипедті алдыңғы емес, артқы дөңгелегімен тежеу ыңғайлы?

Зерттеңдер

1. Көлбеу жазықтықтағы тікбұрышты параллелепипедтің орнықтылығын зерттеңдер. Параллелепипедтің қандай күйі орнықты? Түсіндіріңдер.
2. Сенің қолыңда ұзын білік бар. Оны горизонталь жағдайда ұстап тұру үшін қай бөлігінен ұстаған ыңғайлы: ортасынан ба, жоқ әлде бір ұшынан ба?

Талдаңдар

1. Жіпке ілінген шардың тепе-теңдігі орнықты бола ма?
2. Балшық жолда тығылып қалған автомобильді орнынан қозғалту үшін мынадай амал жасайды: оны алыстағы ағашқа ұзын арқанмен қатты тартып байлайды. Содан кейін арқанды ортасынан оған перпендикуляр бағытта тартып, автомобильді оңай қозғауға болады. Неге?

Ойлап табыңдар

Дұрыс емес пішінді пластинаның ауырлық центрін анықтау тәсілін ұсыныңдар.

Шығарыңдар

1. Ұзындығы 90 см иіктіректің ұштарына 8 Н және 40 Н күштер әсер етеді. Иіктірек тепе-теңдікте деп алып, тірек нүктесінің орнын анықтаңдар.

Жауабы: 8 Н күш әсер ететін ұшынан 75 см қашықтықта

2. Сырықтың бір ұшына салмағы 120 Н жүк ілінген. Жүктен сырық ұзындығының $1/5$ бөлігінде қашықтықта тірек қойылған. Сырық тепе-теңдікте деп есептеп, оның салмағын табыңдар.

Жауабы: 55 Н

*3. Массасы M темір шыбық екі бөлігі өзара 90° бұрыш жасайтындай етіп ортасынан иіліп, бір ұшы топсаға ілінген. Тепе-теңдік орнында сырықтың вертикальмен жасайтын α бұрышын табыңдар.

Жауабы: 18°

*4. Қорғасын шардың ішінен бір жағынан оның қабырғасымен жанасатын, екінші жағынан оның центрі арқылы өтетін сфералық қуыс жасалған. Шар массасы M , радиусы R . Осы шардың ауырлық центрінің орнын анықтаңдар.

Жауабы: $\frac{R}{14}$

5. Егер күшті 5 есе арттырып, иінді 2 есе кемітсе, күш моменті қанша есе өзгереді?

Жауабы: 2,5 есе артады

*6. Дененің массасын иіндері тең емес иіктіректі таразының бір жағында өлшегенде 300 г, ал екінші жағына салып өлшегенде 340 г көрсетті. Дененің нақты массасын анықтаңдар.

Жауабы: 320 г

7. Ұзындығы $l = 50$ см, салмағы $P = 10$ Н сырықтың екі ұшына $P_1 = 10$ Н және $P_2 = 30$ Н гиртасы ілінген. Сырық тепе-теңдікте болу үшін тірек нүктесін қай жерге орналастыру қажет?

Жауабы: 12,5 см арақашықтыққа

8. Екі адам ұзындығы $l = 2$ м, массасы $m_1 = 10$ кг болатын құбырды горизонталь көтеріп келеді. Бірінші адамнан $d = 0,5$ м арақашықта массасы $m_2 = 100$ кг жүк құбырға ілінген. Екі адамның иығына құбыр қандай күш түсіретінін есептеңдер.

Жауабы: біріншіге 800 Н, екіншіге 300 Н

Рефлексия

1. Осы параграфта келтірілген қандай анықтама сендер үшін түсініксіз болып қалды?
2. Берілген материалдарды сендер қандай деңгейде игердіңдер?
3. Тақырыпты тағы қосымша түсіндіру қажет пе?
4. "Есеп шығару үлгілеріндегі" есептер сендерге түсінікті ме?
5. Тақырыпты игеруде "Шығарамшылық шеберхана" тапсырмаларының көмегі болды ма?



Әртүрлі күштердің әсерінен қатты денелер тепе-теңдігінің шарттарын зерттейтін механиканың бөлімі *статика* деп аталады.

Статикада дене абсолютті қатты, яғни деформацияға ұшырамайтын дене ретінде қарастырылады.

Дене тепе-теңдікте болуы үшін мынадай екі шарт орындалуы тиіс.

Бірінші шарт : денеге әсер ететін барлық күштердің тең әсерлі күші нөлге тең болғанда дене тепе-теңдікте болады. Математикалық тұрғыдан бұл шарт мына түрде жазылады:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = 0.$$

Екінші шарт : денеге әсер ететін барлық күш моменттерінің алгебралық қосындысы нөлге тең болғанда дене тепе-теңдікте болады. Математикалық тұрғыдан бұл шарт мына түрде жазылады:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + \dots = 0.$$

Онда денені сағат тілінің қозғалу бағытымен айналдыратын күш моменті оң, ал сағат тіліне қарама-қарсы бағытта айналдыратын күш моменті теріс деп есептеледі.

Күш моменті деп F күшінің модулінің d иініне көбейтіндісіне тең шаманы айтады: $M = Fd$.

Иін — күштің әсер ету сызығынан айналу осіне дейінгі ең аз арақашықтық. Тепе-теңдік орнықты, орнықсыз және бейтарап болуы мүмкін. Егер денені тепе-теңдік қалпынан кез келген ауытқыту кезінде әсер ететін күштер оны қайтадан тепе-теңдік қалпына алып келуге тырысса, онда ондай тепе-теңдік *орнықты* деп аталады. Ал егер денені тепе-теңдік қалпынан кез келген ауытқыту кезінде әсер ететін күштер оны бұл қалыптан одан әрі алып кетіп, оған бастапқы қалыпқа қайта оралуға мүмкіндік бермесе, онда ондай тепе-теңдік *орнықсыз* деп аталады. Егер денені тепе-теңдік қалпынан кез келген ауытқыту кезінде жаңа күйде әсер ететін күштер бәрі бірін-бірі теңгеріп тұрса, ондай тепе-теңдік *бейтарап* деп аталады.

Массалар центрі дегеніміз дененің немесе денелер жүйесінің қозғалысын бір бүтін дене тәрізді сипаттауға мүмкіндік беретін геометриялық нүкте болып табылады. Массалары $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ болатын n бөліктен тұратын дененің массалар центрінің орнын анықтайтын радиус-вектор мына өрнекпен анықталады :

$$\vec{R}_c = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_3 \vec{r}_3 + \dots + m_n \vec{r}_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i}.$$

Механикалық жүйенің *ауырлық центрі* деп оған қатысты жүйеге әсер ететін барлық ауырлық күштерінің қосынды моменті нөлге тең болатын нүктені айтады. Басқаша айтқанда, ауырлық центрі дегеніміз — ауырлық күшінің әсер ететін нүктесі.

4-тарау. САҚТАЛУ ЗАҢДАРЫ

§ 17. Дене импульсі және күш импульсі. Импульстің сақталу заңы



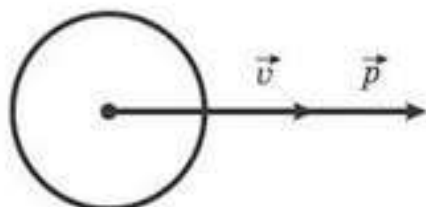
Тірек ұғымдар: дене импульсі, күш импульсі, импульстің сақталу заңы.

Бүгінгі сабақта: дененің импульсі және күш импульсімен, импульстік түрдегі Ньютонның екінші заңымен және сақталу заңдарымен танысасыздар.

Денелер арасындағы өзара әсер өріс арқылы жүзеге асады. Бұл өзара әсердің берілу уақыты шекті дегенді білдіреді. Дегенмен күштің әсері төрт факторға, яғни күштің модуліне, оның бағытына, түсу нүктесіне және түсу уақытына тәуелді. Есеп шығарғанда күштің әсер ету уақытын ескеру қажет болған кезде Ньютонның екінші заңын басқаша жазуға болады. Соны қорытып шығарайық.

$\vec{F} = m\vec{a}$, ал үдеу $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$ болғандықтан, мына өрнекті аламыз: $\vec{F} = m \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$. Денеге қатысты шамаларды тендеудің бір бөлігіне, ал сыртқы әсерді келесі бөлігіне жинайық:

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \quad (17.1)$$



17.1-сурет

Осы өрнектегі $\vec{F}\Delta t$ шамасы *күш импульсі* деп, ал дене массасының оның жылдамдығына көбейтіндісі *дене импульсі* деп аталады (17.1-сурет).

(17.1) өрнек импульстік түрдегі Ньютонның екінші заңы деген атқа ие болады. Ол былай тұжырымдалады: **денеге әсер ететін қорытқы күштің импульсі дене импульсінің өзгерісіне тең.**

Заңның жазылуы:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta(m\vec{v}) \quad (17.2)$$

немесе

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}, \quad (17.3)$$

мұндағы $\vec{p} = m\vec{v}$ — дене импульсі.

Бұдан, *егер күштің әсер ету уақыты бірдей болса, онда дене импульсі берілген күштің әсерінен кез келген массадағы денелерде бірдей өзгеретінін көреміз.*

Жылдамдық сияқты дене импульсі де санақ жүйесін таңдап алуға байланысты болады. Ал дене қозғалысының үдеуі барлық инерциялық санақ жүйелерінде бірдей. Олай болса, күш дене импульсінің өзгерісі де

санак жүйесін таңдап алуға байланысты емес. *Кез келген инерциялық санақ жүйесінде дене импульсінің өзгерісі бірдей.* Бұл дене қозғалысына берілген көптеген есептерді шешуде маңызды.

Импульс түріндегі Ньютонның екінші заңынан, егер денеге әсер ететін барлық сыртқы күштердің тең әсерлі күші нөлге тең болса ($\vec{F} = 0$), дененің импульсі өзгермейді $\Delta\vec{p} = 0$. Ал бұл сыртқы күштер болмағанда жүйедегі барлық денелердің импульсінің өзгермейтінін білдіреді. Денелердің тұйық жүйесінде импульстің сақталу заңы дұрыс: денелердің тұйық жүйесінде осы жүйедегі барлық денелер импульстерінің векторлық қосындысы уақыт өтуімен өзгермейді :

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3 + \dots + m_n\vec{v}_n = \text{const.} \quad (17.4)$$

Тұйық жүйе деп сыртқы күштермен (денелермен) әсерлеспейтін физикалық денелердің жиынтығын айтамыз.

Импульс түріндегі Ньютонның екінші заңын массалары өзгертін денелер қозғалысын сипаттау кезінде қолдану ыңғайлы. Дене импульсінің ХБ жүйесіндегі өлшем бірлігі: $[\vec{p}] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$. Күш импульсінің өлшем бірлігі — ньютон-секунд (Н · с).

Импульстің сақталу заңы мына жағдайларда орындалады :

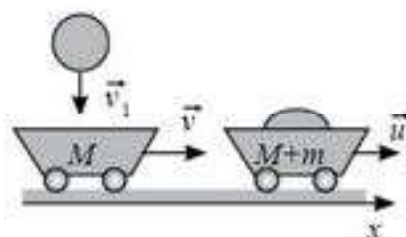
- а) сыртқы күштердің геометриялық қосындысы нөлге тең: $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$;
- ә) сыртқы күштерге тең әсерлі күштің қайсыбір бағыттағы проекциясы нөлге тең. Егер $\sum_{i=1}^n \vec{F}_{ix} = 0$ болса, онда осы бағыт бойынша жүйенің импульсі сақталады ;

б) өзара әсер ету уақыты аз (оқтың атылуы, жарылыс, соққы және т.с.с.).

Импульстің сақталу заңының көмегімен, денеге әсер етуші күштің мәнін білмей-ақ, олардың жылдамдықтарын есептеп шығаруға болады. Импульстің сақталу заңы жалпыға бірдей заң болып табылады: оны нақты өлшемдегі денелерге де, ғарыштық денелерге де, элементар бөлшектерге де қолдануға болады.

Импульстің сақталу заңының қолданылуын қарастырайық. Біріншіден, импульстің сақталу заңы тек тұйық жүйеде орындалатынын естен шығармауымыз керек. Екіншіден, импульс векторлық шама болғандықтан, есеп шығару кезінде импульстің бағытын ескеру қажет.

Мысалы, v жылдамдықпен қозғалатын массасы M арбаға массасы m болатын тас вертикаль келіп түскен болсын (17.2-сурет). Онда арба қандай u жылдамдықпен қозғалады? Импульстің сақталу заңын қолданып



17.2-сурет

шығарайық. Горизонталь Ox осін арба қозғалысының бағытымен бағыттаймыз. Тас түскенге дейінгі және тас түскеннен кейінгі арбаның жылдамдық векторларын көрсетіп, импульстің сақталу заңының Ox осіндегі проекциясын жазамыз: $Mv = (M + m)u$. Бұдан $u = \frac{Mv}{M + m}$.

Егер қарама-қарсы бағытта қозғалатын арбаның үстіне көкжиекке 60° бұрыш жасай тас түссе, онда осы мысалдың жауабы қалай өзгереді? Импульстің сақталу заңына сәйкес:

$$Mv - mv_1 \cos 60^\circ = (M + m)u.$$

Демек, арбаның жылдамдығы мынаған тең:

$$u = \frac{Mv - mv_1 \cos 60^\circ}{M + m}.$$

Тас көкжиекке 60° бұрыш жасап, арбамен бағыттас бағытта түссе, онда арбаның жылдамдығы мынаған тең:

$$u = \frac{Mv + mv_1 \cos 60^\circ}{M + m}.$$



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. а) Дене біркалыпты және түзусызқты қозғалса; ә) дене біркалыпты және қисықсызқты қозғалса; б) дене тенүдемелі және түзусызқты қозғалса; в) дене тенүдемелі және қисықсызқты қозғалса, дене импульсі өзгере ме?
2. Дене жылдамдығының өзгерісі қандай шамаға тәуелді болады? Дене импульсінің өзгерісі ше?
3. Өртүрлі инерциялы санақ жүйелерінде дене импульсі бірдей мәнге ие бола ма? Дене импульсінің өзгерісі ше?
4. Дене импульсінің өзгерісімен күш импульсі қалай байланысқан?
5. Велосипедші жылдамдығын бауу тежегенде оның импульсінің өзгеріс векторы қалай бағытталады?
6. Дене v жылдамдықпен вертикаль жоғары лақтырылды. а) Максимал биіктікке көтерілу уақыты ішінде; ә) қозғалыс уақыты ішінде дене импульсінің өзгерісі қандай болады?
7. Ішкі күштер денелер жүйесінің импульсін өзгерте ала ма? Жүйе денелерінің импульсін ше?
8. Егер жарылғанға дейін граната тыныштықта болса, жарылған гранатаның жарықшақтары бір бағытта ұшуы мүмкін бе?



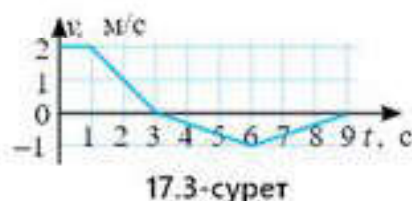
Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

1. Неліктен ауыр қайықтан жағаға түсу оңай, ал одан әлдеқайда жеңіл үрленген қайықтан түскенде суға құлап кетуі мүмкін?
2. Бірқалыпты қозғалатын платформаға орнатылған қарудан қозғалысына қарама-қарсы бағытта оқ атылған. Платформа қозғалысының жылдамдығының шамасы мен бағыты қалай өзгереді?

Зерттеңдер

Массасы 2 кг дененің түзу сызықты қозғалысы кезіндегі $v(t)$ тәуелділік графигі берілген (17.3-сурет). Қандай уақыт аралығында дененің импульсі өзгермейді? Қандай бөлікте импульстің модулі артады, ал қандай бөлікте кемиді? 9 с кезіндегі импульстің өзгерісін табыңдар.



Талдаңдар

1. Кішкентай қайықты үлкен кемеге арқанмен тартады. Неліктен кеме қайыққа қарай қозғалмайды?
2. Неліктен қайық меңгерігін (руль) ұстап тұрған адам ескекшілердің қимыл бағытына қарай денесін қозғайды?
3. Екі бірдей арба бір-біріне қарсы өзара тең жылдамдықпен қозғалады. Соқтығысқаннан кейін арбалар тоқтайды. Бұл импульстің сақталу заңына қарама-қайшы келмей ме?
4. Скейтбордқа бала а) үстінен; ә) қозғалысына қарсы бағытта секіріп мінген жағдайда жылдамдығы қалай өзгереді?

Шығарыңдар

1. Бірінші жағдайда дөңгелек қозғалмайтын осьтен айналады. Екінші жағдайда дөңгелек горизонталь жазықтықта 5 м/с жылдамдықпен сырғанамай дөңгелейді. Бірінші және екінші жағдайда дөңгелектің импульсі қандай? Дөңгелек массасы 2 кг.
Жауабы: 0; 10 кг · м/с
2. Тыныштықта тұрған массасы 100 т кемеге массасы 10 кг снаряд горизонталь ұшып келіп соғылғаннан кейін 0,1 м/с жылдамдық алады. Кемеге соғылуын серпімсіз деп алып, снарядтың соғылғанға дейінгі жылдамдығын табыңдар.
Жауабы: 1 км/с
3. 5,4 км/сағ жылдамдықпен қозғалып келе жатқан массасы 30 т вагон массасы 20 т қозғалмайтын вагонға бірден ілініседі. Вагондар қандай жылдамдықпен қозғала бастайды?
Жауабы: 0,9 м/с

4. Үстінде құмы бар массасы 1,2 т вагон платформасына қарсы 110 м/с горизонталь жылдамдықпен ұшқан массасы 100 кг снаряд құмға келіп кіреді. Платформаның соқтығысқанға дейінгі жылдамдығы 72 км/сағ болса, соқтығысқаннан кейін қандай жылдамдықпен қозғалады?

Жауабы: 36 км/сағ

5. Массасы 120 кг арба 8 м/с жылдамдықпен қозғалады. Арбадан оның қозғалыс бағытына 30° бұрышпен массасы 80 кг адам секіріп түседі. Соның әсерінен арбаның жылдамдығы 5 м/с дейін азаяды. Адамның секірген кездегі жерге қатысты жылдамдығы қандай болған?

Жауабы: 25 м/с

■6. Массалары 2 кг және 4 кг екі шар тегіс горизонталь бетте сәйкесінше 6 м/с және 4 м/с жылдамдықтармен сырғанады. Шарлардың қозғалыс бағыттарының арасындағы бұрыш 90° . Олардың импульстерінің қосындысы неге тең?

Жауабы: 20 кг · м/с

*7. Массасы m қозғалып келе жатқан шар тыныштықтағы массасы $3m$ шармен соқтығысты. Егер соқтығысқаннан кейін бірінші шар $3v$ және екінші шар v жылдамдықпен 90° бұрышпен екі жаққа ұшып кетті. Соқтығысқанға дейінгі бірінші шардың жылдамдығын анықтаңдар.

Жауабы: $u = 3\sqrt{2}v$

8. Салмағы 5 кг мылтықтан массасы 8 г болатын оқ 600 м/с жылдамдықпен атылды. Мылтықтың серпімді жылдамдығын есептеңдер.

Жауабы: 96 см/с



Рефлексия

1. ... тақырып маған ұнады.
2. ... материал қызық болды.
3. ... тақырып ойландырды.
4. ... ұғымдарды зерттегім келді.
5. Қай материал сендердің қызығушылықтарың оятты?
6. Жаңа ақпарат сендерге болашақта қажет бола ма?
7. Жаңа қандай ақпаратпен таныстыңдар.
8. Қай ақпаратты міндетті түрде есте сақтау керек?
9. Қандай материалды тағы да толықтырып, іздену қажет?

§ 18. Реактивті қозғалыс



Тірек ұғымдар: реактивті қозғалыс, реактивтік қозғалтқыш.

Бүгінгі сабақта: реактивті қозғалыспен танысасыздар.

Реактивті қозғалыс деп денеден оның бөлшектері денемен салыстырғанда қандай да бір жылдамдықпен бөлінген кезде пайда болатын қозғалысты түсінеді.

Бұнда реактивті күш деп аталатын, денені одан бөлінген бөлшектер қозғалысына қарама-қарсы жаққа итеретін күш пайда болады.

Зымыран реактивті қозғалыс жасайды (18.1-сурет). Реактивтік қозғалтқыштың негізгі бөлігі жану камерасы болып табылады. Оның қабырғаларының бірінде саңылау — реактивтік сопло бар, ол отын жанғанда түзілетін газдың шығуына арналған. Газдың жоғары температурасы мен қысымы оның соплодан ағып шығу жылдамдығын анықтайды.

Қозғалтқыш жұмыс істегенге дейін зымыран мен отынның импульсі нөлге тең. Олай болса, қозғалтқышты қосқаннан кейін де зымыран мен одан ағып шығатын газ импульстерінің қосындысы нөлге тең:

$$m \vec{v}_r + M \vec{v}_z = 0,$$

мұндағы m және \vec{v}_r — шығарылатын газдардың сәйкесінше массасы мен жылдамдығы, M және \vec{v}_z — зымыранның массасы мен жылдамдығы.

Оу осіне проекциясы $Mv_z - mv_r = 0$, ал зымыранның жылдамдығы $v_z = \frac{m}{M} v_r$.

Бұл формула зымыранның массасы азғана өзгерген жағдайда дұрыс.

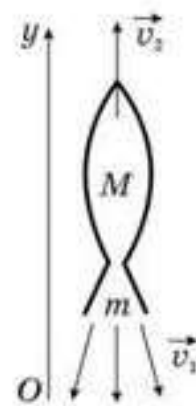
Сәйкесінше айнымалы массалы денеге (бұл жағдайда зымыранға) әсер ететін реактивті тарту күші әрбір секунд сайын бөлініп шыққан бөлшектердің массасына және олардың айнымалы массалы денеге қатысты жылдамдығына тура пропорционал:

$$F = \mu u, \tag{18.1}$$

мұндағы μ — бірлік уақыт ішіндегі жанған отын массасы, u — зымыранға қатысты газдың шығу жылдамдығы.

Бұл теңдеуді және айнымалы массалы дене қозғалысы үшін жазылған басқа да теңдеулерді 1897 жылы П.В. Мещерский енгізген.

Реактивті қозғалыстың басты ерекшелігі: зымыран барлық басқа көлік құралдары сияқты емес, қандай да бір басқа денелермен әсерлеспей-ақ үдеу ала алады, тежеледі, сондай-ақ бұрыла алады.



18.1-сурет



К.Э. Циолковский
(1857—1935)

Реактивті қозғалыстың принципі бойынша сегізаяктар, кальмарлар, тарбақаяктар, медузалар қозғалады.

Реактивті қозғалыс теориясының дамуына К.Э. Циолковский үлкен еңбек сіңірді. Ол айнымалы массалы дененің (зымыранның) біртекті тартылыс өрісінде ұшу теориясын жасады және жердің тартылыс күшін жеңуге қажетті отын қорларын есептеп шығарды. Сұйық реактивтік қозғалтқыш теориясының негіздерін жасап, оны құрастыру элементтерін анықтады, көпсатылы зымырандар теориясын жасады әрі оның параллель (бір мезгілде бірнеше реактивтік қозғалтқыштар жұмыс жасайды) және тізбекті (реактивтік қозғалтқыштар бірінен кейін бірі жұмыс жасайды) нұсқасын ұсынды. К.Э. Циолковский *қатаң ғылыми түрде* сұйық реактивтік қозғалтқыш көмегімен ғарышқа ұшу мүмкіндігін дәлелдеді, ғарыштық аппараттарды Жерге қондырудың арнайы траекторияларын ұсынды, ғарышаралық орбиталды станциялар жасау идеясын айтты, зымыранды автоматты түрде басқару идеясын ұсынды.

К.Э. Циолковскийдің еңбектері заманауи зымыран техникасының дамуы үшін теориялық негіз болып табылады.

Ғарыш саласының дамуына орыс ғалымы И.В. Мещерский үлкен үлес қосты. Ол айнымалы массаның нүкте динамикасының теориялық негіздерін, сонымен қатар зымыранның көтерілу қозғалысын және азростаттың вертикаль қозғалысын зерттеді. Мещерский орталық күштің әсерінен айнымалы массалы дене қозғалысын қарастырды, аспан механикасындағы айнымалы массалы денелердің есептерінің негізін қалады, сонымен қатар комета қозғалысының кейбір мәселелерін зерттеді. Мещерский еңбектерінің негізінде К.Э. Циолковский ғарышқа ұшу мүмкіндігінің негізін қалады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай қозғалыс реактивті деп аталады?
2. Зымырандар ауасыз кеңістікте ұша ала ма? Зымырандар қозғалысына ауасы бар орта қалай әсер етеді?
3. Ғарыш кемесін орбитаға шығарғаннан кейін оның қозғалыс бағытын қалай өзгертуге болады?
4. Неліктен ғарыш зымырандарын көпсатылы етіп жасайды?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Адам қайықтың тұмсығынан артқы бөлігіне қарай жүріп бара жатқанда қайықтың жағдайы қалай өзгеретінін бақылаңдар.

Тәжірибе жасаңдар

Әуе шарын үрлеп, оны байламай, қолдарыңнан босатыңдар. Нені байқадыңдар?

Түсіндіріңдер

1. Ауасыз кеңістіктегі зымыранның жылдамдығы неге тәуелді?

2. Материялық нүкте шеңбер бойымен бір-қалыпты қозғалады. Уақыттың әртүрлі мезетінде нүкте импульсі қалай бағытталған?

3. Э. Распе кітабының кейіпкері Мюнхгаузен барон былай дейді: «Шашымнан ұстап, жоғары қарай бар күшіммен тартып едім, өзімді де, екі аяғыммен қосып ұстаған атымды да батпақтан еш қиындықсыз алып шықтым». Неліктен бұл мүмкін емес екенін түсіндіріңдер.

4. Басаяқты кальмар (каракатица) қалай қозғалатынын түсіндіріңдер (18.2-сурет).



18.2-сурет

Талдаңдар

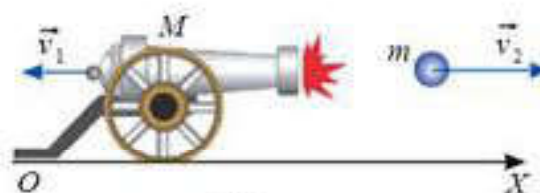
1. Абсолют серпімсіз соққыдан кейін денелер қалай қозғалады?

2. Массасы m ермексаздан жасалған шар дәл сондай тыныштықтағы басқа шарға соғылып, олардың импульстерінің қосындысы $6 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ болады. Соқтығысуға дейін бірінші шардың импульсі неге тең?

Шығарыңдар

1. Массасы 1 т зеңбіректен 400 м/с жылдамдықпен массасы 20 кг оқ атылды. Оқ горизонталь бағытта атылған болса, зеңбіректің кері шегіну жылдамдығын табыңдар (18.3-сурет).

Жауабы: 8 м/с



18.3-сурет

2. Массасы 800 кг зеңбіректен жерге қарағанда 200 м/с бастапқы жылдамдықпен, көкжиекке 60° бұрыш жасай массасы 10 кг оқ атылған. Үйкеліс күшін ескермей, зеңбіректің кері шегіну жылдамдығын табыңдар.

Жауабы: 1,25 м/с

■3. Екі балықшы тыныштықта тұрған қайықта отырып, көлден балық аулайды. Егер балықшылар орындарын ауыстырса, қайық қалай және қаншалықты қозғалады? Қайықтың массасы 280 кг, бірінші балықшының массасы 70 кг, екіншінің массасы 150 кг, балықшылардың арақашықтығы 5 м. Судың кедергісін ескермеңдер.

Жауабы: 38 см

■4. Тоқтап тұрған суда инерция арқылы қозғалатын массасы m буксир массасы M бар жамен соғылып, оны өзімен бірге алға қарай қозғайды. Егер буксирдің жылдамдығы соқтығысқаннан кейін 4 есе кемісе, M/m қатынасын табыңдар.

Жауабы: 3

■5. Зарядымен бірге алғанда массасы 250 г зымыран вертикаль жоғары 125 м биіктікке көтеріледі. Газ лезде жанып кетеді деп есептеп, оның бөліну жылдамдығын табыңдар. Заряд массасы 50 г.

Жауабы: 200 м/с

*6. Массасы 1200 кг екі сатылы зымыраннан оның жылдамдығы 180 м/с жеткен кезде массасы 400 кг екінші бөлігі бөлінді. Осы кезде зымыранның жылдамдығы 200 м/с артты. Зымыранның қалған бөлігі бағытын өзгертпей қандай жылдамдықпен қозғалатынын есептеңдер. Жылдамдықты Жерге қатысты салыстырмалы деп берілген.

Жауабы: 170 м/с



Рефлексия

1. ... тақырып маған ұнады.
2. ... материал қызық болды.
3. ... тақырып ойландырды.
4. ... ұғымдарды зерттегім келді.
5. Қай материал сендердің қызығушылықтарыңды оятты?
6. Жаңа ақпарат сендерге болашақта қажет бола ма?
7. Жаңа қандай ақпаратпен таныстыңдар?
8. Қай ақпаратты міндетті түрде есте сақтау керек?
9. Қандай материалды тағы да толықтырып, іздену қажет?

§ 19. Жұмыс. Энергия. Кинетикалық энергия туралы теорема. Қуат



Тірек ұғымдар: механикалық жұмыс, қуат, кинетикалық энергия.

Бүгінгі сабақта: жұмыс, қуат, энергиямен және кинетикалық энергия туралы теоремамен танысасыздар.

Біздің айналамыздағы денелер кеңістікте белгілі бір қалыпта орналасады. Оның үстіне, денелердің күйін белгілі бір (осы күй үшін өзгермейтін) шамалармен сипаттауға болады, олар: координаталар (x, y, z) , масса (m) , жылдамдық (v) .

Бір күйден екінші күйге өткенде бұл шамалар өзгереді және басқа күйде олар осы күй үшін өзгермейтін мән қабылдайды.

Егер күй параметрлері өзгерсе, онда қандай да бір процесс жүрді делінеді. *Процесс* дегеніміз — жүйенің бір күйден екінші күйге өтуі.

Механикалық жүйенің белгілі бір күйін сипаттау үшін *механикалық энергия* деп аталатын ерекше шама енгізіледі. Оны W немесе E таңбаларымен белгілеу қабылданған. Дененің энергиясы оның массасына, кеңістіктегі орнына және жылдамдығына тәуелді, яғни $W(m, v, x)$. Механикалық энергияны энергияның екі түрінің қосындысы ретінде көрсету ыңғайлы, олардың бірі дененің массасы мен жылдамдығы арқылы (оны кинетикалық энергия деп атайды), ал екіншісі дене массасы мен оның кеңістіктегі орны арқылы (оны потенциалдық энергия деп атайды) анықталады:

$$W(m, v, x) = W(m, v) + W(m, x).$$

Дене бір күйден екінші күйге өткенде механикалық энергияның шамасы өзгередіні белгілі. Дененің бір механикалық күйден екіншіге өту процесінің өзі механикалық жұмыс деп аталатын ерекше шамамен сипатталады. Жұмыстың шамасын механикалық энергияның өзгерісі арқылы өрнектеуге болады:

$$A = W_2 - W_1 = \Delta W. \quad (19.1)$$

Міне, сондықтан да энергия деп дененің немесе денелер жүйесінің жұмыс жасау қабілетін сипаттайтын физикалық шаманы түсінеді.

Жұмыстың физикалық мағынасын талдап көрелік. Егер дене күштің әсерінен қайсыбір қашықтыққа орын ауыстырса, онда күш жұмыс жасады дейді. Күш пен сол күштің әсер ету бағытындағы орын ауыстырудың шамасы неғұрлым үлкен болса, соғұрлым жұмыстың шамасы да үлкен болады. Сондықтан жұмысты күш пен сол күштің әсер ету бағытындағы орын ауыстырудың көбейтіндісі арқылы анықтайды, яғни

$$A = F \cdot s. \quad (19.2)$$

Орын ауыстыру күштің әсер ету бағытына перпендикуляр бағытталса, онда күш дененің бұл бағыттағы орын ауыстыруына ықпал етпейді. Сондықтан бұл жағдайда күш жұмыс жасамайды делінеді. Мысалы, білеушенің горизонталь үстел бойымен орын ауыстыруы кезінде ауырлық күші жұмыс жасамайды. Демек, жұмыстың шамасы күштің шамасы мен орын ауыстырудың шамасына ғана емес, сонымен бірге күш векторы мен орын ауыстыру векторы арасындағы бұрышқа да тәуелді.

Орын ауыстыру мен күш қайсыбір бұрыш жасайтын жалпы жағдай үшін күш жұмысын есептеуге арналған өрнекті табайық (19.1-сурет).

Ол үшін F күшін екі құраушыға жіктейміз: орын ауыстыру бағытымен бағытталған $F_1 = F \cos \alpha$ және орын ауыстыруға перпендикуляр бағытталған $F_2 = F \sin \alpha$. F_2 күштің жұмысы нөлге тең, онда F күштің жұмысы F_1 күштің жұмысына тең және

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha. \quad (19.3)$$

Кез келген тұрақты күштің жұмысын дәл осы формула бойынша есептеп шығарады.

Жұмыстың бірлігі үшін бірлік күштің әсерінен дене бірлік қашықтыққа орын ауыстырған кезде істелетін жұмыс алынады. ХБ жүйесіндегі жұмыстың өлшем бірлігі — джоуль:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}.$$

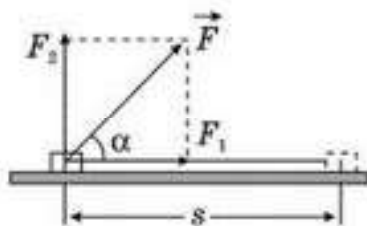
Жұмыс пен энергия арасындағы байланысты тағайындайық. F күштің әсерінен массасы m дене s қашықтыққа орын ауыстыра отырып, өзінің жылдамдығын v_1 -ден v_2 -ге дейін өзгертсін делік (19.2-сурет).

Ньютонның екінші заңына сәйкес күштің әсерінен дене үдеу алады:

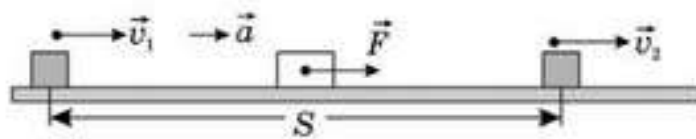
$$a = \frac{F}{m}.$$

Үдеудің мәнін $2as = v_2^2 - v_1^2$ формуласына қоямыз: $2 \frac{F}{m} s = v_2^2 - v_1^2$. Бұдан

$$Fs = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (19.4)$$



19.1-сурет



19.2-сурет

Тендіктің сол жағында бірінші күйден екінші күйге өту процесін сипаттайтын кайсыбір физикалық шама тұр. Бұл шама күштің жұмысы деп аталады:

$$A = Fs. \quad (19.5)$$

Тендіктің оң жағында екі шаманың айырымы тұр, олардың әрқайсысы дененің бастапқы және соңғы күйлерін сипаттайды. Бұл шамалар дененің бастапқы және соңғы күйлердегі массасы мен жылдамдығы арқылы анықталады. Оларды дененің *кинетикалық энергиялары* деп атайды, яғни дененің кинетикалық энергиясын мына формула арқылы есептеп шығаруға болады:

$$W = \frac{mv^2}{2}. \quad (19.6)$$

(19.5) және (19.6) формулаларын ескерсек, (19.4) формула былай жазылады: $A = W_{к2} - W_{к1}$. Бұл кинетикалық энергия туралы теореманың математикалық өрнегі болып табылады: **қорытқы күштің жұмысы әрқашан дененің немесе денелер жүйесінің бастапқы және соңғы күйлердегі кинетикалық энергиясының өзгерісіне тең.**

Кинетикалық энергия салыстырмалы шама болып табылады, өйткені дененің жылдамдығы салыстырмалы шама, ол түрлі санақ жүйелерінде әртүрлі болады.

Орын ауыстыру кезінде күштің шамасы жиі өзгереді. Бұл жағдайда жұмысты күштің орын ауыстыруға тәуелділік графигін пайдаланып есептеп шығару ыңғайлырақ. Мұнда күш жұмысы күш графигімен, абсцисса осімен және абсцисса осіне түсірілген перпендикулярлармен шектелген фигураның ауданына тең. Мысалы, 19.3-сурет бойынша жұмыс трапецияның ауданына тең, яғни

$$A = \frac{F_1 + F_2}{2} s.$$

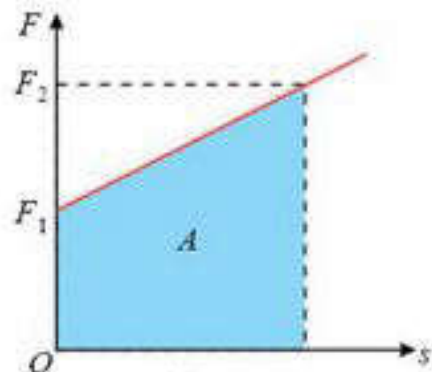
Қандай да бір жұмысты орындау кезінде сол жұмыстың қанша уақытта орындалғанын білу маңызды. Осылайша жұмыс жасайтын құралдардың өнімділігін анықтауға болады.

Жұмыстың орындалу жылдамдығын сипаттайтын шама *қуат* деп аталады:

$$N = \frac{A}{t}. \quad (19.7)$$

Қуаттың бірлігі үшін бірлік уақытта бірлік жұмыс орындалатын қуат алынады. ХБ жүйесіндегі қуаттың өлшем бірлігі — ватт:

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/1 с.}$$



19.3-сурет

Адамдар жұмыс өндіруге қабілетті түрлі құралдар ойлап шығарды. Бұл құралдардың қуаты бірнеше нВт-тан бірнеше МВт аралығында болып келеді.

Машиналар қозғалтқыштарының қуатын сипаттау үшін 1 ат күші (1 а.к.). 1 а.к. = 735 Вт деген ерекше бірлік пайдаланылады. Аттың орташа қуаты 0,5 а.к. тең; адамның ұзақ уақыт дене жұмысын жасағанда орташа қуаты 0,1 а.к. тең; қысқа қашықтыққа жүгіруші (спринтер) старт алғандағы немесе атлеттің штанга көтерген кезіндегі қуаты 2—8 а.к. құрайды.

Машина тарту күшінің әсерінен біркалыпты қозғалған жағдайдағы машина қозғалтқышының өндіретін жұмысын былай есептеп шығаруға болады:

$$N = \frac{Fs}{t} = Fv. \quad (19.8)$$

Осы өрнекті талдау автокөлік қозғалтқышының қуаты өзгеріссіз болған жағдайда тарту күшінің артуы жылдамдықтың кемуіне әкеледі деген қорытынды жасаймыз.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Процесс деп нені түсінесіңдер?
2. Энергия дегеніміз не?
3. Жұмыс деп нені айтамыз?
4. Қайсыбір күштің жасайтын жұмысын қандай формула бойынша есептеп шығаруға болады?
5. Қандай жағдайларда денеге әсер ететін күш жұмыс жасамайды?
6. Қандай энергия кинетикалық энергия деп аталады?
7. Кинетикалық энергия салыстырмалы шама ма, әлде абсолют шама ма? Неліктен?
8. Кинетикалық энергия туралы теореманы тұжырымдаңдар.
9. Айнымалы күштің жұмысын қалай есептеп шығарады?
10. Қуат деп нені түсінеді?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Резеңке допты суға батырып, содан кейін бос жіберіңдер. Нені байқадыңдар? Доптың қозғалысын әртүрлі күштер әсер еткен кездегі жасалатын жұмысына сәйкес түсіндіріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

Алдымен жерде, одан кейін скейтбордтың үстінде тұрып тасты лақтырыңдар. Қандай жағдайда жұмыс жасалады?

Түсіндіріңдер

1. Денеге күш әсер етіп, ол орын ауыстырады. Бірақ бұл күш жұмыс жасамайды. Бұлай болуы мүмкін бе?

2. Адам бір ұшына салмағы адамның салмағына тең жүк байлап, блоктан асыра тасталған арқанмен жоғары көтерілуге қарағанда, төбеге бекітілген арқанмен жоғары көтерілу кезінде аз жұмыс жасайды. Неге? Жұмыстардың арасында қандай айырмашылық бар?

3. Егер автокөлік қозғалтқыштың тұрақты қуатымен тауға көтерілетін болса, онда ол қозғалыс жылдамдығын азайтады. Неліктен?

Талдаңдар

1. Жоғары қозғалатын эскалаторда тұрған жолаушы тұрақты жылдамдықпен жоғары көтерілетін болса, эскалатор қозғалтқышының жұмысының шамасы өзгере ме?

2. Кемелерді жоғары деңгейге көтеру үшін каналдың төменгі бөлігіндегі суды сорғының көмегімен шлюз камерасына сорғызады. Камерада үлкен теплоход немесе кішкене қайық болғанда сорғылар бірдей жұмыс атқарады ма?

Шығарыңдар

1. Ұзындығы 2 м және массасы 1,2 кг тұзу, жіңішке сырық горизонталь бетте орналасқан. а) Сырықты вертикаль көтеруге; ә) сырықты горизонталь күйінде 2 м жоғары көтеруге кететін жұмысты табыңдар.

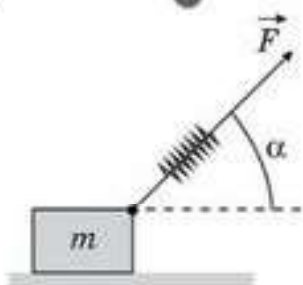
Жауабы: а) 12 Дж; ә) 24 Дж

2. Шананы оның бетімен 30° бұрыш жасайтын арқанмен тартады. Арқанның керілу күші 20 Н. Шананың 5 м орын ауыстыруы кезіндегі керілу күшінің жұмысын анықтаңдар.

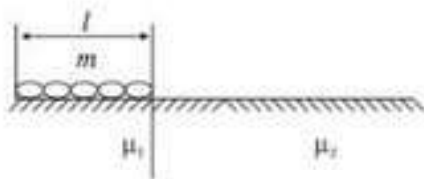
Жауабы: 86,5 Дж

3. Массасы 1,5 т лифт 1 м/с^2 үдеумен жоғары көтеріле бастайды. Көтерілудің алғашқы 2 секундында лифт қозғалтқышы жасайтын жұмысын анықтаңдар.

Жауабы: 33 Дж



19.4-сурет



19.5-сурет

■4. Радиусы 1 м айналып тұрған дискінің бүйір бетіне күші 100 Н тежегіш қалыпты (колодка) жанастырған кезде диск 2,5 айналым жасап тоқтады. Үйкеліс коэффициенті 0,2 болса, үйкеліс күшінің жұмысын табындар.

Жауабы: 314 Дж

*5. Горизонталь жазықтықта жатқан массасы 2 кг денеге қатандығы 100 Н/м серіппе бекітілген. Серіппенің бос ұшына горизонтқа 30° бұрышпен F күші түсірілген (19.4-сурет). Дене мен жазықтық арасындағы үйкеліс коэффициенті 0,5 болса, дене сырғи бастаған кездегі күш жұмысын анықтаңдар.

Жауабы: 0,4 Дж

*6. Массасы m және ұзындығы l тізбекті бір жарты жазықтықтан екіншіге сүйреу үшін қажет жұмыстың шамасын анықтаңдар (19.5-сурет). Тізбектің бірінші жарты жазықтықпен арасындағы үйкеліс коэффициенті — μ_1 , екіншімен — μ_2 .

Жауабы: $A = \frac{1}{2} mgl(\mu_1 + \mu_2)$



Рефлексия

1. ... тақырып маған ұнады.
2. ... материал қызық болды.
3. ... тақырып ойландырды.
4. ... ұғымдарды зерттегім келді.
5. Қай материал сендердің қызығушылықтарыңды оятты?
6. Жаңа ақпарат сендерге болашақта қажет бола ма?
7. Жаңа қандай ақпаратпен таныстыңдар?
8. Қай ақпаратты міндетті түрде есте сақтау керек?
9. Қандай материалды тағы да толықтырып, іздену қажет?

§ 20. Потенциалдық энергия. Энергияның сақталу және айналу заңы



Тірек ұғымдар: потенциалдық энергия, энергияның сақталу заңы.

Бүгінгі сабақта: ауырлық күшнің біртекті өрісіндегі және серпімді күштер өрісіндегі потенциалдық энергиямен, энергияның сақталу заңымен танысасыздар.

Ауырлық күшінің біртекті өрісіндегі потенциалдық энергия. Жер бетіндегі кез келген денеге ауырлық күші әсер етеді. Денені қайсыбір H биіктікке көтеру үшін жұмыс жасау керек (20.1-сурет). Бұл жұмысты F күші жасайды: $A = FH \cos \alpha$.

Бұл күштің жұмысы оң, себебі күш векторы мен орын ауыстыру векторлары бағыттас $\cos \alpha = 1$. Дененің орналасуы өзгерді, демек, оның күйі де өзгерді. Дененің энергиясы өзгерді. Сыртқы күш жұмысының есебінен дененің энергиясы артты. Дене биіктіктен құлағанда оның өзі де жұмыс атқарады. Оған қаданы тоқпақпен ұру немесе шегені балғамен ұрып қағу мысал бола алады.

Дене h_1 биіктіктен h_2 биіктікке түссін делік (20.2-сурет). Денеге әсер ететін ауырлық күші жасайтын жұмыстың шамасы бұл жағдайда мына формула арқылы есептеледі:

$$A = mgH = mg(h_1 - h_2) = mg \Delta h. \quad (20.1)$$

Бұл формуланы былай жазған ыңғайлы:

$$A = -mg(h_2 - h_1) = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (20.2)$$

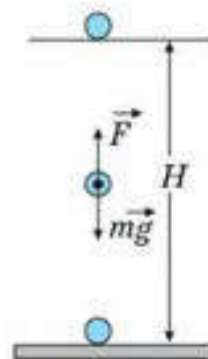
$W_{p1} = mgh_1$ және $W_{p2} = mgh_2$ өрнектері дененің бастапқы және соңғы күйлерін сипаттайды:

$$W_p = mgh \quad (20.3)$$

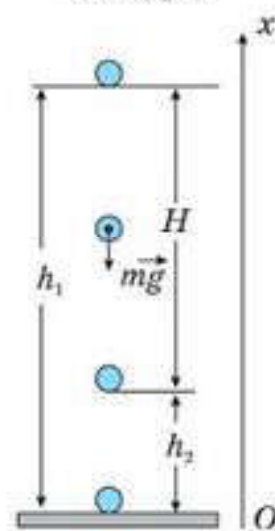
формуласымен анықталатын шама ауырлық күшінің біртекті өрісіндегі потенциалдық энергия деген атқа ие болды. Ауырлық күші өндіретін жұмыс дененің потенциалдық энергиясының кемуіне тең:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -\Delta W_p. \quad (20.4)$$

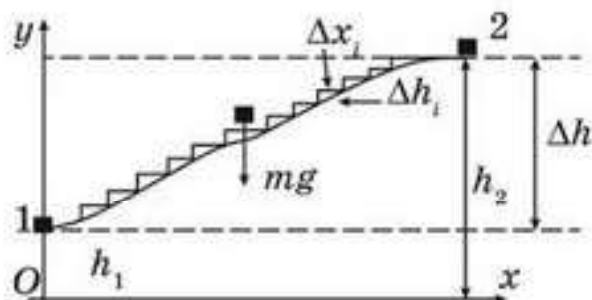
Потенциалдық энергияны есептеу кезінде энергияның нөлдік деңгейін дұрыс таңдау маңызды. Әдетте, ауырлық күшінің біртекті өрісіндегі потенциалдық энергияның нөлдік деңгейі ретінде теңіз деңгейін алады. Сондықтан жерден көтерілген кез келген дененің потенциалдық энергиясы бар. Түсу кезінде дененің потенциалдық энергиясы азаяды, ал дененің жылдамдығы артатындықтан, оның кинетикалық энергиясы да артады.



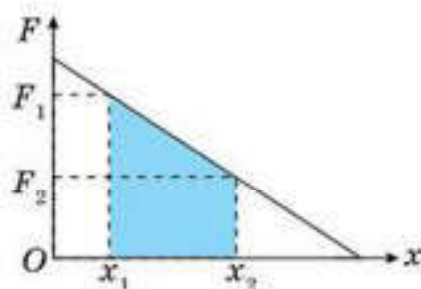
20.1-сурет



20.2-сурет



20.3-сурет



20.4-сурет

Ауырлық күшінің жұмысы дененің гравитациялық өрісіндегі қозғалыс траекториясының түріне тәуелсіз, тек оның кеңістікте алатын бастапқы және соңғы орнына ғана тәуелді. Шынында да, массасы m дененің төбешікке көтерген кезіндегі ауырлық күшінің жұмысы былай анықталады: $A_z = -\Delta W_p = -mg \Delta h$. Төбешікті кішкентай бөліктерге (вертикаль Δh_i және горизонталь Δx_i орын ауыстыруларға) бөлейік (20.3-сурет). Ауырлық күші тек вертикаль бөліктерде Δh жұмыс жасайды (Δx_i бөліктерінде ауырлық күші орын ауыстыруға перпендикуляр, сол себепті ол жұмыс жасамайды). Бұдан $\sum_{i=1}^n mg \Delta h_i = mg \sum_{i=1}^n (h_1 - h_2)$ шамасы ауырлық күшінің жұмысын береді:

$$A = mg(h_1 - h_2).$$

Массасы m денені бедері басқаша болатын, бірақ биіктіктің өзгерісі бірдей төбеге көтерілгенде ауырлық күші дәл сондай жұмыс жасайды. Ендеше, жұмыс траекторияның пішініне тәуелсіз.

Деформацияланған дененің потенциалдық энергиясы. Егер серіппені жнырсақ, онда ол босап созылған кезде денеге жылдамдық береді. Демек, деформацияланған дененің де энергиясы бар. Осы энергияның шамасын анықтайтын формуланы табайық. Ол үшін сығылған серіппе қайта созылған кезде жасалатын жұмысты анықтайық. Серіппе қайта созылған кезде серпімділік күші азаятын болғандықтан, бұл күштің жұмысын графиктің көмегімен есептеген ыңғайлы. 20.4-суретте серпімділік күшінің жұмысы боялған фигураның ауданына тең:

$$A = (x_2 - x_1) \frac{F_1 + F_2}{2} \text{ немесе}$$

$$A = -\frac{k(x_2 + x_1)}{2} (x_2 - x_1) = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right). \quad (20.5)$$

Дененің бастапқы және соңғы күйлерін сипаттайтын $\frac{kx_2^2}{2}$ және $\frac{kx_1^2}{2}$ өрнектері осы күйлердегі серпімді деформацияланған дененің потенциалдық энергиясы деген атқа ие болады. Олай болса, серпімді деформацияланған дененің потенциалдық энергиясын

$$W_p = \frac{kx^2}{2} \quad (20.6)$$

формуласы бойынша есептейді.

(20.4) және (20.5) формулаларынан ауырлық және серпімділік күштерінің жұмысы траекторияның пішініне тәуелді емес, тек бастапқы және соңғы координаталармен анықталатынын көріп отырмыз. Ал тұйық траектория бойынша жұмыс нөлге тең.

Өрістегі басқа күштердің жұмысы деформацияланған дененің потенциалдық энергиясының кемуіне тең:

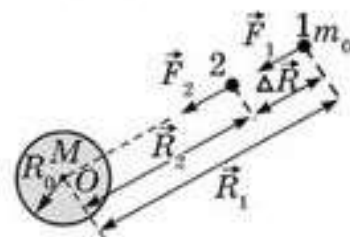
$$A = -(W_{p_2} - W_{p_1}). \quad (20.7)$$

Ауырлық күшінің біртекті емес өрісіндегі потенциалдық энергия. Өртекті гравитациялық өрісте атқарылған жұмысты есептеп шығару қиынырақ. Массасы m_0 дене жер центрінен R_1 қашықтықта болсын

(20.5-сурет) және $|\vec{F}_1| = G \frac{Mm_0}{R_1^2}$ күшінің әсерінен

2-орынға өтсін, онда оған $|\vec{F}_2| = G \frac{Mm_0}{R_2^2}$ күш әсер

етеді. $\Delta R \ll R_1$, $\Delta R \ll R_2$ деп алып, ауырлық күшінің жұмысын табамыз: $\Delta A = F_{срт} \cdot \Delta R$.



20.5-сурет

$|\vec{F}_1| = G \frac{Mm_0}{R_1^2}$ және $|\vec{F}_2| = G \frac{Mm_0}{R_2^2}$ күштерінің арифметикалық ортасын

алуға болмайды, себебі күш сызықтық заңмен өзгермейді. $\Delta R \ll R_1$ және $\Delta R \ll R_2$ болсын, сонда $R_1 \approx R_2$ және $R_{срт}^2 \approx R_1 R_2$, яғни ΔR неғұрлым азырақ болса, заң соғұрлым дәл орындалады. (Оны өздерің дәлелдендер.)

Сонда: $\Delta A = G \frac{Mm_0}{R_{срт}^2} \cdot \Delta R$ немесе $\Delta A = G \frac{Mm_0}{R_1 R_2} \cdot (R_2 - R_1) = \frac{GMm_0}{R_1} - \frac{GMm_0}{R_2}$.

Ауырлық күшінің жұмысы екі мүшенің айырмына тең болып шықты, олардың әрбіреуі 1- және 2-жағдайлардағы дененің потенциалдық энергиялары болып табылады (20.5-сурет):

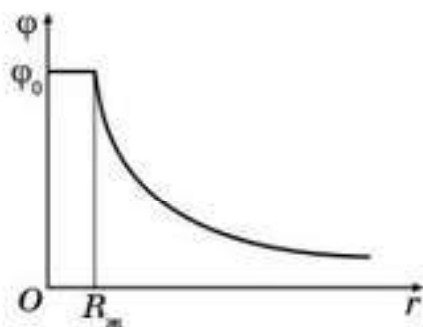
$$\Delta A = G \frac{Mm_0}{R_1} - G \frac{Mm_0}{R_2} \quad (20.8)$$

немесе $\Delta A = -\Delta W_p$

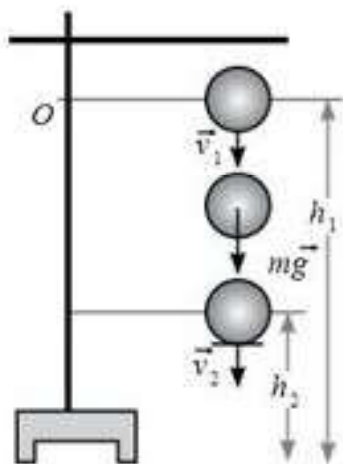
$R_1 \rightarrow \infty$ ұмтылғанда $W_{p_1} = G \frac{Mm_0}{R_1} \rightarrow 0$, себебі шексіздікте M және m_0 массаларының арасындағы өзара әсерлесу нөлге ұмтылады. Ендеше, 2-жағдайда

$$W_{p_2} = -G \frac{Mm_0}{R_2} \quad (20.9)$$

потенциалдық энергия теріс, бұл дұрыс, себебі массасы m_0 денені жер кармап алған, ол енді потенциалдық иіңқырда тұр.



20.6-сурет



20.7-сурет

20.6-суретте Жер центріне дейінгі арақашықтығы мен Жердің гравитациялық өріс потенциалының тәуелділігі берілген. Осы суреттен Жердің гравитациялық потенциалы Жердің центрінен оның бетіне дейін өзгермейді, ал центрден алыстаған сайын азаятынын көруге болады.

(20.8) өрнек біртекті гравитациялық өрісте (20.1) өрнегіне айналады. Шындығында,

$$\Delta A = G \frac{Mm_0}{R^2} \Delta h, \text{ ал } g = G \frac{M}{R^2}, \text{ олай болса}$$

$$\Delta A = m_0 g \Delta h.$$

Біз қарастырған мысалдарда күш жасаған жұмыс дененің траекториясына байланысты емес, ол тек оның бастапқы және соңғы орнына тәуелді. Осындай күштердің жұмысы тұйық жүйеде нөлге тең. Ол күштер консервативті деп аталады. Ауырлық, серпімділік және кұлжық күштер консервативтік күштерге жатады. Үйкеліс күші консервативтік күшке кірмейді. Егер жүйеге консервативтік күштер әсер етсе, онда механикалық энергия сақталады.

Энергияның сақталу және айналу заңы. Тұйық жүйеде энергияның сақталу және айналу заңы дұрыс, ол былай тұжырымдалады: денелердің тұйық жүйесінде механикалық энергия бір денеден екінші денеге, бір түрден екінші түрге ауыса алады, ал тұйық жүйедегі толық механикалық энергия өзгеріссіз қалады:

$$W_{x_1} + W_{p_1} = W_{x_2} + W_{p_2}. \quad (20.10)$$

Дененің құлау процесін қарастыра отырып, энергияның сақталу және айналу заңын оңай дәлелдеуге болады. 20.7-суретті қолданып, кинетикалық энергия мен ауырлық күші жұмысының формуласының көмегімен (20.10) теңдеудің дұрыс екеніне көз жеткізуге болады.

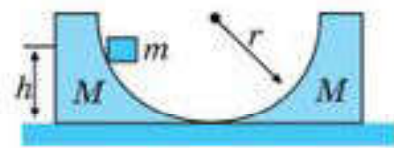


Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай энергия потенциалдық деп аталады? Дененің потенциалдық энергиясын қандай параметрлер анықтайды?
2. Потенциалдық энергияның нөлдік деңгейі қалай таңдалып алынады?
3. Потенциалдық энергия салыстырмалы шама болып табыла ма? Неліктен?
4. Бір ғана серпіше алғашқыда 5 см сығылды, ал содан соң 5 см созылды. Қай жағдайда оның энергиясы көп? Қай жағдайда серпішенің энергиясы оң, ал қай жағдайда теріс?
5. Энергияның сақталу және айналу заңын дәлелдендер.

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Массалары бірдей $M = 2$ кг қозғалмайтын екі сына горизонталь жазықтыққа баяу өтеді және бастапқыда олар 20.8-суретте көрсетілгендей орналасқан. Сол жақтағы сынадан $h = 75$ см биіктіктен массасы $m = 500$ г шайба сырғанап түседі. Оң жақтағы сынаның бойымен қозғала отырып шайба қандай максимал биіктікке көтеріледі? Үйкеліс ескерілмейді.



20.8-сурет

Шешуі. Сыналар—шайба жүйесі тұйықталған. Сол себепті импульс пен энергияның сақталу және айналу заңдарын қолдануға болады.

Бастапқыда шайбаның сол жақтағы сынадан сырғанауын қарастырамыз. Екі кезеңді тандаймыз: бірінші шайбаның сырғи бастауы, ал екіншісі — шайбаның сол жақ сынадан сырғанап түсу кезеңі. Горизонталь бағыт үшін импульстің сақталу заңы дұрыс. Бастапқы кезде сына да, шайба да тыныштықта тұрады. Сондықтан олардың жалпы импульсі нөлге тең. Шайба сынадан сырғанаған уақытта оның импульсі mv_1 , ал сынаның импульсі Mu_1 . Сонда $0 = mv_1 - Mu_1$. Бұдан

$$u_1 = \frac{mv_1}{M}, \quad (1)$$

мұндағы u_1 — шайба сырғанаған кезде сынаның алатын жылдамдығы.

Енді энергияның сақталу және айналу заңын сол жақтағы сынадан шайбаның сырғанап түсу процесіне қолданамыз:

$$mgh = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{Mu_1^2}{2}. \quad (2)$$

(1) формуланы ескеріп, (2) формуланы былай жазамыз:

$$mgh = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{m^2v_1^2}{2M} \text{ немесе } 2gh = v_1^2 \left(1 + \frac{m}{M}\right). \quad (3)$$

Сол жақтағы сынадан шайба сырғанап түскеннен соң ол қозғалысын v_1 жылдамдықпен жалғастырып, оң жақ сынаға көтеріле бастайды және оны қозғалысқа келтіреді. Шайба сынаға көтерілуді тоқтатқан уақытта олардың жылдамдықтары бірдей болып, u_2 тең болады (осы кезеңде шайбаның көтерілу биіктігі максимал). Онда импульстің сақталу заңы бойынша

$$mv_1 = (M + m)u_2. \quad (4)$$

Энергияның сақталу және айналу заңына сәйкес

$$\frac{mv_1^2}{2} = mgh_m + \frac{(M + m)u_2^2}{2}. \quad (5)$$

(4) формуладан шайба жоғары максимал биіктікке көтерілген кезде оң жақ сынаның шайбамен қозғалған кездегі жылдамдығын табамыз:

$v_2 = \frac{mv_1}{(M+m)}$. Жылдамдықтың осы мәнін (5) формулаға қоямыз:

$$\frac{mv_1^2}{2} = mgh_m + \frac{m^2 v_1^2}{2(M+m)} \quad (6)$$

(3) формуладан анықталатын жылдамдық

$$v_1^2 = \frac{m \cdot 2gh}{(M+m)} \quad (7)$$

Осы мәнді (6) формулаға қойып, шайбаның оң сынаға көтерілуінің максимал биіктігін табамыз: $h_m = \frac{Mv_1^2}{2g(M+m)}$.

(7) формуланы ескерсек, $h_m = \frac{2ghmM}{2g(M+m)^2}$, яғни $h_m = \frac{hmM}{(M+m)^2}$.

Сан мәндерін қоямыз: $h_m = \frac{0,75 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ кг} \cdot 2 \text{ кг}}{6,25 \text{ кг}^2} = 0,12 \text{ м}$.

Жауабы : $h_m = 0,12 \text{ м}$.

2-есеп. Ұзындығы R жіпке бекітілген массасы M жүк горизонталь күйден төмен құлайды (20.9, а-сурет). Төменгі нүктесінде жүк массасы m денемен серпімсіз соқтығысады. Соққыдан кейінгі жіптің керілуі азаю үшін жүктің массасы қандай болу керек?

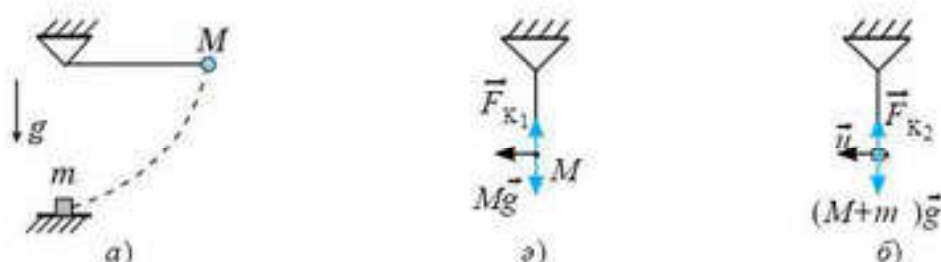
Шешуі. 1) Соқтығысқанға дейінгі жіптің максимал керілуін анықтаймыз. Бұл соқтығысар алдындағы кезеңде бақыланады. Осы кезеңде

$$v = \sqrt{2gR} \quad (1)$$

жылдамдықпен қозғалатын жүкке ауырлық күші мен жіптің керілу күші $F_{к1}$ әсер етеді (20.9, ә-сурет). Ньютонның екінші заңына сәйкес

$$F_{к1} - Mg = M \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

(1) тендеуін ескерсек, $F_{к1} = 3Mg$.



20.9-сурет

2) Денелердің серпімсіз соқтығысуын қарастырамыз. Импульстің сақталу заңына сәйкес $Mv = (M + m)u$. Бұдан

$$u = \frac{M\sqrt{2gR}}{(M + m)}. \quad (3)$$

Соқтығысқаннан кейінгі Ньютонның екінші заңы былай өрнектеледі (20.9, б-сурет):

$$F_{к_2} - (M + m)g = (M + m)\frac{u^2}{R}. \quad (4)$$

(4) формуладан (3) ескеріп, мынаны аламыз:

$$F_{к_2} = \frac{(M + m)^2 + 2M^2}{M + m}g = \frac{3M^2 + 2Mm + m^2}{M + m}g.$$

Егер $F_{к_1} \neq F_{к_2}$ болса, онда жіптің керілу күші азаяды. Ендеше, $3Mg \neq \frac{3M^2 + 2Mm + m^2}{M + m}g$. Бұдан $M \neq m$. Егер $M = m$ болса, онда керілу күші өзгермейді, ал егер $M > m$ болса, онда керілу күші азаяды.

3-есеп. Абжыланның басы тік жоғары v жылдамдықпен көтеріледі. Абжыланның массасы M , ал ұзындығы l . Абжыланның өз қозғалысы кезінде жерді қысатын күшін анықтаңдар.

Шешуі. Абжыланның қозғалысына импульс түріндегі Ньютонның екінші заңын қолданамыз: $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$. Себебі абжыланның басын көтерген кезде оның ауадағы массасы артады. Жыланның барлық ұзындықтағы қалыңдығын бірдей деп есептеп, массаның сызықтық тығыздығын анықтаймыз, ол да тұрақты: $\gamma = \frac{\Delta m}{\Delta l} = \frac{M}{L}$, мұндағы Δm — жылан ұзындығының F күшпен көтерілетін Δl бөлігінің массасы. Онда осы бөлікке берілетін импульс мынаған тең: $p = \Delta mv = \frac{M\Delta l}{L}v$.

Ал бұл бөлікті көтеретін күш мынадай: $F = \frac{M\Delta l}{L\Delta t}v = \frac{M}{L}v^2$.

Жыланның жерге түсіретін қысым күші ауырлық күші мен көтерілу күшінің қосындысына тең: $N = Mg + \frac{M}{L}v^2$.

$$\text{Жауабы : } N = Mg + \frac{M}{L}v^2.$$

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

1. Дойбының екі тасын әйнектің үстіне қойып, біріншісін шерту арқылы екіншісіне соққы беріңдер. Неліктен бірінші дойбы тасы тоқтап, екіншісі жылдамдық алады?
2. Допты бастапқы жылдамдықсыз жерге тастаңдар. Доптың құлау биіктігі мен оның секіру биіктігін салыстырыңдар. Алынған нәтижені түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

1. Неліктен өзенді бойлай қайықпен жүзген кезде қайық өзеннің ортасымен, ал өзенге қарсы жүзгенде жағаға жақын жүзген дұрыс?
2. Жиналған отынның бірінші қабатына қарағанда екінші қабатының потенциалдық энергиясы жоғары. Екінші қабаттағы отын жанған кезде алынған энергия бірінші қабаттағы отынға қарағанда жоғары бола ма?
3. Тасты және теннис добын ағашпен ұрған кезде доп тасқа қарағанда алысқа ұшады. Неліктен?

Зерттеңдер

1. Балықшылар жіңішке серпімді ұшы бар қармақсапты жиі қолданады. Неліктен?
2. Автокөліктің резеңке баллоны, рессорлар, вагон буферлері соққы әсерін әлсіретеді. Неліктен?

Шығарыңдар

■1. Массасы 100 г және ұзындығы 0,8 м тізбектің бір ұшы үстел шетінен төмен қарай салбырап тұр. Тізбектің салбырап тұрған бөлігі ұзындығының 1/4 бөлігіне тең болғанда тізбек үстелден сырғып түсе бастайды. Үстелден сырғып түскен кездегі тізбек импульсін табыңдар.

Жауабы: 0,46 кг · м/с

*2. Массасы 70 кг шаңғышы горизонтқа көлбеулік бұрышы 30° , ал ұзындығы 800 м таудан төмен түсіп келеді. Жарты жолға келгенде ол белгі беретін тапаншадан вертикаль жоғары оқ атады. Массасы 100 г зымыран-оқ тапаншадан 100 м/с жылдамдықпен ұшады. Шаңғышының бастапқы жылдамдығы нөлге тең деп алып, таудан түскендегі жылдамдығын анықтаңдар. Шаңғының қармен үйкелу коэффициенті 0,1.

Жауабы: 80,5 м/с

3. Ұзындықтары бірдей, қатаңдықтары 10 Н/см және 20 Н/см екі серіппе өзара параллель жалғанған. Серіппелерді 2 см созуға кететін жұмысты табыңдар.

Жауабы: 0,6 Дж



20.10-сурет

*4. Тегіс горизонталь жазықтықпен ұзындығы $L = 32$ см тақтай тұрақты жылдамдықпен қозғалады (20.10-сурет). Тақтай әрі қарай кедір-бұдыр бетпен қозғалу үшін оған қандай v_0

минимал жылдамдық беру керек? Тақтай мен кедір-бұдыр жазықтық арасындағы үйкеліс коэффициенті $\mu = 0,2$.

Жауабы: 8,8 м/с

*5. Ұзындығы $l = 80$ см және массасы $m = 2$ кг жіңішке ауыр жіптің ұзындығының бір жартысы кедір-бұдыр үстелдің үстінде жатыр, ал қалған жартысы үстелден салбырап тұр. Горизонталь бағытталған күш жұмсай отырып жіпті үстелдің үстіне сүйреп шығару үшін қандай минимал жұмыс жасау қажет? Жіп үстелдің шетіне орналастырылған кішкентай роликпен үйкеліссіз сырғанап отырады, ал үстел мен жіптің арасындағы үйкеліс коэффициенті $\mu = 0,3$.

Жауабы: 3,8 Дж

6. Массасы 10 т трактор 232 кВт қуат өндіре отырып, 3 м/с жылдамдықпен тауға көтеріледі. Таудың көлбеулік бұрышы 30° болса, үйкеліс коэффициентін анықтаңдар.

Жауабы: 0,31

7. Бастапқы жылдамдықсыз 20 м биіктіктен массасы 1 кг дене құлады. Дененің жерге соғылар мезетінде ауырлық күші қандай қуат өндіреді?

Жауабы: 200 Вт

8. Жердің тартылыс күшін жеңу үшін денеге қажетті жылдамдықты (екінші ғарыштық жылдамдықты) анықтаңдар.

Жауабы: 11,3 км/с



Рефлексия

1. ... тақырып маған ұнады.
2. ... материал қызық болды.
3. ... тақырып ойландырды.
4. ... ұғымдарды зерттегім келді.
5. Қай материал сендердің қызығушылықтарыңды оятты?
6. Жаңа ақпарат сендерге болашақта қажет бола ма?
7. Жаңа қандай ақпаратпен таныстыңдар?
8. Қай ақпаратты міндетті түрде есте сақтау керек?
9. Қандай материалды тағы да толықтырып, іздену қажет?



Дене импульсі, күш импульсі, энергия шамаларын қолдану арқылы есеп шығарған оңай.

Есеп шығарған кезде импульс түріндегі Ньютонның екінші заңы түрін қолданған ыңғайлы: $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$, мұндағы $\vec{F}\Delta t$ — күш импульсі, $\Delta\vec{p}$ — дененің импульсінің өзгерісі.

Дене импульсі деп оның массасы мен жылдамдығының көбейтіндісіне тең шаманы айтады: $\vec{p} = m\vec{v}$.

Тұйық жүйеге кіретін дене импульстерінің геометриялық қосындысының өзгермей сақталуы *импульстің сақталу заңының мәні* болып табылады:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \text{const}.$$

Импульстің сақталу заңының көмегімен *реактивті қозғалыс* — денеден оның бөлшектері қандай да бір жылдамдықпен бөлінген кезде пайда болатын қозғалыс.

Тұйық жүйеде энергияның сақталу және айналу заңы орындалады. денелердің тұйық жүйесінде энергия бір денеден екінші денеге, бір түрден екінші түрге айналады, ал тұйық жүйедегі толық энергияның шамасы өзгеріссіз қалады.

Кинетикалық энергияның формуласы $W_k = \frac{mv^2}{2}$.

Гравитациялық өрісіндегі потенциалдық энергия $W_p = G \frac{m_1 m_2}{R}$.

Серпімділік күші өрісіндегі потенциалдық энергия $W_p = \frac{kx^2}{2}$.

Ауырлық күшінің біртекті өрісіндегі потенциалдық энергиясы $W_p = mgh$.

Дене орын ауыстырған немесе деформация кезінде әсер ететін *күштің жұмысы* мына формула арқылы анықталады:

$$A = F \cdot s \cdot \cos\alpha.$$

Жұмыстың орындалу шапшаңдығын сипаттайтын шаманы *қуат* деп атайды: $N = \frac{A}{t}$.

5-тарау. СҰЙЫҚТАР МЕН ГАЗДАР МЕХАНИКАСЫ

§ 21. Сұйықтағы қысым. Гидростатиканың элементтері



Тірек ұғымдар: гидроаэромеханика, гидроаэростатика, гидроаэродинамика, Паскаль заңы, гидростатикалық қысым, Архимед заңы, барометрлік формула.

Бүгінгі сабақта: гидростатиканың негізгі түсініктерімен, Паскаль және Архимед заңдарының қолданылуымен танысып, гидростатикалық қысымды анықтауды үйренесіңдер.

Алдыңғы тарауларда сендер материялық нүкте мен қатты дене механикасын оқып, механиканың кинематика, статика және динамика сияқты тарауларын игердіңдер. Кинематика денелердің қозғалысын, статикада денелердің тепе-теңдік шарттары, ал динамика қозғалысты, оны тудыратын себептерді зерттейтін механиканың бөлімдері. Механиканың негізін Ньютонның үш заңы құрайды.

Осы тарауда сендер сұйықтар мен газдар механикасымен, яғни олардың тепе-теңдігі және қозғалысымен таныса аласыңдар. Сұйықтар мен газдар механикасының негізінде де Ньютон заңдары жатыр. Алайда оларды сипаттау тәсілі материялық нүкте мен қатты денені сипаттаудан өзгеше. Мұнда сұйықтың және газдың нақты құрылымы ескерілмейді, олар кеністікте үздіксіз таратылатын *тұтас орта* ретінде қарастырылады. Сұйықтар мен газдардың айрықша ерекшелігі газдың аққыштығы ол жанасатын кабаттардың салыстырмалы қозғалысында үйкеліс күштерінің мардымсыз аз болуымен байланысты. Қатты денелерден айырмашылығы, сұйықтар мен газдар өздерінің пішінін сақтамайды, олар өздері құйылған ыдыстың формасын қабылдайды.

Сұйықтар мен газдардың механикалық қасиеттерін, қозғалысын және олардың ішіндегі қатты денелердің қозғалысын зерттейтін физика бөлімі *гидроаэромеханика* деп аталады. Гидроаэромеханика гидроаэростатика және гидроаэродинамика бөлімдерінен тұрады.

Гидроаэростатикада сұйық немесе газдың және оларға батырылған қатты денелердің оларға әсер ететін күштердің салдарынан тепе-теңдікте болу шарттары және заңдылықтары қарастырылады. Ғылым ретінде гидроаэростатиканың қалыптасуында ежелгі грек ғалымы Архимед (б.э.д. III ғасыр), италиялық физик Э. Торричелли (1608—1647), француз физигі Б. Паскаль (1623—1662) сияқты көптеген атақты ғалымдардың еңбегі зор.

Гидроаэродинамика сұйық пен газдардың қозғалыс заңдарын, сондай-ақ олардың салыстырмалы қозғалысы кезінде қатты денелермен өзара әсерлесуін зерттейді. Мысалы, ұшқыш аппараттар, суасты

кайықтары, су көліктерінің қозғалысы, атмосферадағы аспан денелері (мысалы, метеориттер, кометалар), құстар, жәндіктердің ұшуын, балық және теңіз сүтқоректілерінің жүзуін зерттейді. Гидроаэродинамика ілімін қалыптастыруда швейцар физигі Д. Бернулли (1700—1782) баға жетпес рөл атқарды.

Гидродинамика заңдары техника мен өндірісте кенінен қолданылады, олардың көмегімен ұшқыш аппараттарының, корабльдердің, автомобильдердің пішіндерін жаңартса, сұйықтар мен газдар қолданылатын өндірістік үрдістерді (зат беттерін аэрозоль көмегімен қаптау, оптикалық талшықтар жасау т.с.с.) оңтайландырады. Олар ауа мен судың динамикалық қасиеттеріне байланысты табиғат құбылыстарын болжауға және түсіндіруге көмектеседі.

Ғарыш кемесі мен зымыранды жобалау кезінде Жер атмосферасындағы ғарыштық ұшу аппаратының қозғалыс заңдарын білу өте маңызды болып табылады. Жоғары жылдамдықта әуе кемелерінің пішіні мен профилі өте маңызды болып саналады. Осы құбылыстарды зерттеуге Кеңес Одағының физигі С. Королев (1966—1907) үлкен үлес қосты.

Сұйықтар механикасы мен газ механикасының көптеген қатынастары мен заңдары бірдей болып келеді. Сондықтан да бұдан әрі, егер ерекше көрсетілмесе, тек сұйықтағы механика, яғни *гидромеханика* қарастырылатын болады.

Сұйықтағы механикада қысым ұғымы маңызды болып табылады. **Қысым** — ол сан мәні жағынан S бетіне перпендикуляр бағытта әсер ететін F күшінің осы S бетінің ауданына қатынасымен тең анықталатын шама, яғни

$$P = \frac{F}{S}. \quad (21.1)$$

Қысымның өлшем бірлігі — паскаль (Па). 1 Па ол 1 м² беттің үстіне біркелкі таралған 1 Н күшпен жасалған қысымға тең (1 Па = 1 Н/м²).

Гидростатикада сұйық тепе-теңдікке не, яғни оның жекелеген бөліктері бір-біріне немесе олармен жанасатын денелерге қатысты жылжымайды. Мұндай шарт сұйықтың ішінде бөлінген шағын көлемдік элементтің кез келген формасындағы тепе-теңдік кезінде орындалуы керек. Бұл Паскаль заңына әкеледі, ол мына түрде тұжырымдалады: *сұйықтың белгілі бір нүктесіндегі қысым барлық бағытқа бірдей дәрежеде беріледі*.

Сұйықтың тепе-теңдігі кезінде горизонталь бағыттағы қысым әрдайым бірдей, әйтпесе тепе-теңдік болмас еді. Сондықтан да сұйықтың бос беті әрдайым горизонталь болып келеді. Егер сұйық сығылмайтын болса, онда оның тығыздығы қысымға байланысты болмайды. Егер сұйық ауырлық күшінің өрісінде болса, онда сұйық ішіндегі вертикаль бағыттағы қысым әртүрлі деңгейлерде бірдей болмайды.

Егер сұйық бетінің деңгейінде ($h = 0$) қысым p_0 (мысалы, ол атмосфералық қысымға тең) болса, онда қандай да бір h тереңдіктегі p қысым мынаған тең болады:

$$p = p_0 + \rho gh. \quad (21.2)$$

Тереңдікке байланысты қысымның мұндай өзгеруі сұйықтың ауырлық күшінің әсерімен байланысты. Ауырлық әсерінен туындайтын қысым *гидростатикалық қысым* деп аталады. Ол $p = \rho gh$ өрнегімен анықталады, мұндағы h — сұйық бағанының биіктігі, ρ — оның тығыздығы.

Гидростатикалық қысым сұйық құйылған ыдыстың табаны мен қабырғаларына сұйық ішіндегі қатты денеге әсер ететін күштерді анықтауда, сонымен қатар қатынас ыдыстарындағы сұйық бағандарының тепе-теңдік шартын қорытып шығаруда ескеріледі.

Гидростатикалық қысымды ауырлық күшінің өрісіндегі газда түсіреді. Мұның мысалы — атмосфералық қысым. Атмосфералық қысым Жер бетіне жақын орналасқан ауа қабаттарының салмағымен байланысты. Жер бетінде оның шамасы 10^5 Па тең. Ол Жер бетінен алыстаған сайын азаяды.

Атмосфералық қысымның бар екенін алғаш рет итальяндық ғалым Э. Торричелли дәлелдеді.

Тәжірибе жүзінде әрбір 12 м биіктікке көтерілген кезде қысым 1 мм сын.бағ. кемітіні дәлелденеді. Паскальмен өрнектелген қысыммен мм сын.бағ. өрнектелген қысымның арасындағы тәуелділікті естеріңе түсіріңдер.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Гидроэродинамикада қандай құбылыстар зерттеледі?
2. Қысымның физикалық мағынасы қандай?
3. Қай кезде қысым 1 Па тең болады?
4. Қандай қысым гидростатикалық деп аталады? Ол неліктен пайда болады?
5. Паскаль заңы нені тұжырымдайды?
6. Ығыстырушы күштердің пайда болуы себебі неде?
7. Ауа тығыздығы және атмосфералық қысым биіктіктің артуымен байланысты қалай өзгереді?

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Үрленетін сабын көпіршігінің пішінін бақылаңдар. Алғашында ол сопақ пішінге ие болса, біртіндеп дұрыс шар тәрізді пішінді қабылдайды. Неліктен?

Тәжірибе жасаңдар

1. Стақанды алып, оны суға толтырыңдар. Үстін таза қағаз парағымен жабыңдар. Қағаз парағын алақанмен ұстап тұрып, стақанды түбін жоғары қаратып, абайлап аударып қойыңдар да, алақанды баяу алып тастаңдар. Судың ағып кетпегеніне көз жеткізіңдер. Түсіндіріңдер, неге?

2. Сендердің қолдарында мектеп сызғышы, суы бар ыдыс және салмағы 500 гр болатын гіртасы бар. Егер суы бар ыдысқа гіртасы салынса, ыдыстың төменгі жағындағы судың қысымы қалай өзгеретінін анықтаңдар. Тәжірибенің нәтижесін теориялық түрде дәлелдендер.

3. Бөтелкеге су және сұйық май құйыңдар. Бөтелкедегі суды қалай құйып алуға болады? Бірнеше тәжірибе жасап, оны түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

- Неге металл шеге суға батып кетеді, ауыр металдан дайындалған яхта батпайды?
- Паскаль заңы жасанды Жер серігінде жұмыс істейді ме? Ал Архимед күші ше?

Ойлап табыңдар

Ығыстырушы күші осы дене ығыстырып шығарған сұйықтың салмағына тең екенін дәлелдейтін тәжірибе ойлап табыңдар.

Талдаңдар

Үстел теннисін ойнауға арналған шар майысып қалды. Шардың майысқан бөлігін қалай орнына келтіруге болады? Түсіндіріңдер.

Шығарыңдар

1. Тұщы сулы көлдің қысымы қандай тереңдікте қалыпты атмосфералық қысымнан 2,5 есе көп болады?

Жауабы: 15 м

2. Іші қуыс мыс шар судың ішінде жүзіп жүр. Егер оның қуысының көлемі $17,75 \text{ см}^3$ болса, онда шардың массасы неге тең?

Жауабы: 20 г

Рефлексия

- | | |
|----------------------------|------------------------|
| 1. Бүгін менің білгенім... | 4. Менің түсінгенім... |
| 2. Қызықты болғаны... | 5. Менің үйренгенім... |
| 3. Қиын болғаны... | 6. Менің жасағаным... |

§ 22. Үзіліссіздік теңдеуі



Тірек ұғымдар: жылдамдық өрісі, ток сызықтары, ток түтігі, стационарлық ағын, үздіксіздік теңдеуі.

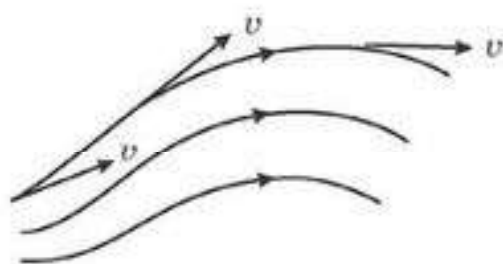
Бүгінгі сабақта: сұйықтың қозғалысын сипаттау әдістерімен танысып, сығылмайтын сұйықтың үзіліссіздік теңдеуін аласыңдар.

Сұйық немесе газ кеңістіктің белгілі бір бөлігін толтырып тұратын үздіксіз орта болып табылады. Мұндай ортаның механикасын зерттегенде олардың жеке элементтерінің болмаса бөліктерінің қозғалысын қарастыру ыңғайсыз. Оның орнына бұл кеңістіктің жеке нүктелерін бақылау, осы нүктеден әртүрлі уақыт мезетінде өтетін сұйық бөліктерінің жылдамдығын және оның бағытын тіркеу ыңғайлы болады. Егер біз мұны белгілі бір уақыт мезетінде кеңістіктің барлық нүктелері үшін жасасак, онда жылдамдық өрісі деп аталатын қозғалыстағы сұйықтың жылдамдықтарының лездік суретін аламыз.

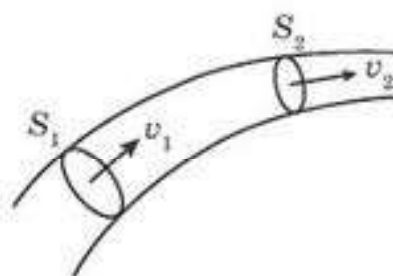
Сұйықтың қозғалысы ағыс деп, ал сұйықтың бөлшектерінің жынтық қозғалысы ағын деп аталады.

Сұйықтардың қозғалысын графиктік жолмен ағын сызықтары арқылы бейнелейді. Ағын сызықтары оның әрбір нүктесіндегі жанама бағыты жағынан сол нүктедегі сұйық жылдамдығына сәйкес болатындай етіп жүргізіледі (22.1-сурет). Ол сызықтардың қоюлығы сол сызықтарға перпендикуляр бет арқылы өтетін сызықтар санымен анықталып, ол жердегі сұйық бөліктерінің жылдамдығын анықтайды. Сызықтар қою жерде жылдамдық жоғары, сызықтар сирек жерде жылдамдық төмен. Осылайша ағын сызықтарының суреті арқылы сұйық қозғалысының кеңістіктің әрбір нүктесіндегі жылдамдығының бағыты мен шамасы жөнінде айтуға болады, яғни сұйықтың қозғалыс күйін анықтай аламыз.

Ағын сызықтарымен шектелген сұйық бөлігі ағын түтігі деп аталады. Егер ағын сызықтарының орналасуы мен түрі өзгермейтін, сонымен қатар әрбір нүктедегі жылдамдықтың мәні уақыт өтуімен байланысты өзгермейтін болса, онда сұйықтың ондай ағыны тұрақталған (стационар) деп аталады.



22.1-сурет



22.2-сурет

Қандай да бір ағын түтікті қарастырайық. Мұндай ойша бөлінген түтіктегі сұйық түтіктің бүйір бетіне өтпей, кәдімгі құбырдағы сұйық сияқты қозғалады. Біз жылдамдық бағытына перпендикуляр ΔS_1 және ΔS_2 екі қималарын таңдап алайық (22.2-сурет). Δt уақыт ішінде S қимасы арқылы $S \cdot \Delta t$ сұйық көлемі өтеді, 1 с ішінде S_1 арқылы өтетін сұйықтың көлемі $S_1 v_1$, мұндағы v_1 — S_1 қимадағы сұйық ағынының жылдамдығы. S_2 қимасы арқылы 1 секундта $S_2 v_2$ сұйықтың көлемі өтеді, мұндағы v_2 — S_2 қимасы арқылы өтетін сұйық ағынының жылдамдығы. Мұнда S қимасының кез келген нүктесінде сұйықтың жылдамдығы бірдей деп есептелінеді. Егер сұйық сығылмайтын болса ($\rho = \text{const}$), онда S_1 қимасы арқылы S_2 қимадағы сияқты бірдей сұйықтың көлемі өтеді, яғни

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{const}. \quad (22.1)$$

Демек, сығылмайтын сұйықтың ағын түтігінің көлденең қимасының ағын жылдамдығына көбейтіндісі осы ағын түтігі үшін тұрақты шама болып табылады. (22.1) өрнегі сығылмайтын сұйықтың *үзіліссіздік теңдеуі* деп аталады.

(22.1) өрнектен түтіктің кең бөлігінде ағын жылдамдығы азаяды, ал жіңішке бөлігінде артатынын көруге болады. Демек, түтіктің жіңішке бөлігінде қысым кең бөлігіне қарағанда көп болады. Қысымның әртүрлі болуы сұйықтың жылдамдығын арттыратын күш тудырады.

Аудандары әртүрлі құбырдағы сұйықтың ағынан қарастырайық. Құбырдың кең бөлігінде сұйықтың жылдамдығы аз болғандықтан, ағын құбырдың қабырғаларына қысым түсіреді. Ал құбырдың жіңішке бөлігінде сұйықтың ағын жылдамдығы үлкен, сондықтан құбырдың ауданына соғылу бұрыштары кіші болады.

Аудандары әртүрлі құбырларда жалғаған кезде біркалыпты ауысу жасайды, себебі қысымдардың айырмашылығы үлкен болса, ол құбырдың түйіскен бөлігін ажыратып жіберуі мүмкін.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Материалдық денелер сұйықтар мен газдардың қозғалысын сипаттау тәсілдерінің айырмашылығы қандай?
2. Ағын сызығы нені білдіреді?
3. Ағын түтігі деген не?
4. Газдың немесе сұйықтың қандай ағыны стационарлық деп аталады?
5. Үзіліссіздік теңдеуінің мағынасы қандай?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Кранды ашып, суды бақылаңдар. Суды азайтқан сайын ағып жатқан судың көлемі кемиді. Неге? Түсіндіріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

2 мл және 10 мл көлемі бар екі медициналық шприцтерді (қауіпсіздік үшін инесіз) алып, оларға су толтырыңдар. Шприцтерді көлденең орналастырып, поршеньді қозғалтып су ағынын алыңдар. Шприцтен су ағынының ұшу алыстығын өлшеңдер. Шприцтердің екеуі үшін бірдей шарттарда және поршеньдердің бірдей жылдамдықтарында тәжірибені қайталап, ағынның ұшу алыстығын салыстырыңдар. Тәжірибені түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

Резеңке құбырдан ағып жатқан ағынның жылдамдығын арттыру үшін, құбырдың ұшын қысу керек. Неліктен?

Шығарыңдар

1. Су көлденең қимасы өзгертін көлденең түтіктен өтеді. Оның кең бөлігінде ағын жылдамдығы 20 см/с. Құбырдың тар бөлігінің диаметрі құбырдың кең бөлігінің диаметрінен 1,5 есе аз болса, құбырдың тар бөлігіндегі ағынның жылдамдығы қандай болады?

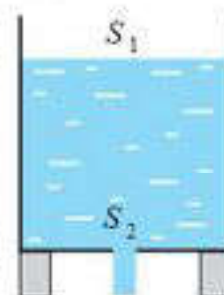
Жауабы: 45 см/с

2. Диаметрі 40 см болатын көлденең газ құбырынан жылдамдығы 50 см/с тең газ өтіп жатыр. Құбырдың жіңішке бөлігіндегі газдың жылдамдығы 1,75 м/с. Құбырдың жіңішке бөлігіндегі диаметрін есептеңдер.

Жауабы: 21 см

3. Биік ыдыстың түбіндегі саңылаудан су ағып жатыр (22.3-сурет). Ыдыстың қимасы S_1 , ағын ауданының қимасы S_2 . Ыдыстағы судың деңгейі қандай үдеумен орын ауыстыратынын табыңдар.

Жауабы: $a = \frac{S_2}{S_1} g$.



22.3-сурет

Рефлексия

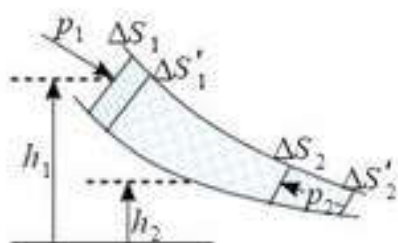
- | | |
|----------------------------|------------------------|
| 1. Бүгін менің білгенім... | 4. Менің түсінгенім... |
| 2. Қызықты болғаны... | 5. Менің үйренгенім... |
| 3. Қиын болғаны... | 6. Менің жасағаным... |

§ 23. Бернулли теңдеуі



Тірек ұғымдар: идеал сұйық, Бернулли теңдеуі.

Бүгінгі сабақта: идеал сығылмайтын сұйық үшін механикалық энергияның сақталу заңынан Бернулли теңдеуін қорытып шығарасындар.



23.1-сурет

Реал сұйықтардың қозғалысының динамикасы күрделі. Кейбір жағдайларда оларды қарастыруды жеңілдету үшін ішкі үйкеліс күштерін ескермесе де болады. Мұндай сұйықты *идеал сұйық* деп атайды. Идеал сұйық қозғалғанда механикалық энергия ішкі энергияға өтпейді де, механикалық энергия сақталады. Идеал, сығылмайтын сұйық үшін механикалық энергияның сақталу заңы *Бернулли теңдеуі* деп аталады.

Ағынның жінішке түтігінде ΔS_1 және ΔS_2 қималарының арасында орналасқан сұйықтың бөлігін қарастырайық. Бұл қималар сәйкес h_1 және h_2 биіктіктерінде орналасқан болсын (23.1-сурет). Сұйықтар қозғалып, Δt уақыт өткенде жана $\Delta S'_1$ және $\Delta S'_2$ қималарының арасында болады. Егер Δt уақыт аралығы өте аз болса, онда ΔS_1 және $\Delta S'_1$ қималарының және олардың биіктіктерінің өзгешеліктерін ескермесе де болады. Тура осы тұжырым ΔS_2 және $\Delta S'_2$ қималары үшін де орындалады.

Енді сұйықтың тандап алынған бөлігінде Δt уақыт аралығында сыртқы күштердің жасаған жұмысын есептейік. Түтікшенің бүйір беттеріне әсер ететін қысым күштері олардың бағыты қозғалыс бағытына перпендикуляр болғандықтан жұмыс жасамайды. Берілген ΔS_1 қимасындағы ρ_1 қысым күшінің жұмысы $\Delta A_1 = F_1 \Delta l_1 = \rho_1 \Delta S_1 v_1 \Delta t$. Сәйкес ΔS_2 қимасы үшін $\Delta A_2 = F_2 \Delta l_2 = \rho_2 \Delta S_2 v_2 \Delta t$, сөйтіп, сыртқы күштердің толық жұмысы $\Delta A = F_1 l_1 - F_2 l_2$ немесе

$$\Delta A = \rho_1 \Delta S_1 v_1 \Delta t - \rho_2 \Delta S_2 v_2 \Delta t. \quad (23.1)$$

Қозғалыс стационар болғандықтан, $\Delta S'_1$ және $\Delta S'_2$ қималарының арасындағы сұйықтың энергиясы өзгермейді. Сұйықтың бұл бөлігі 23.1-суретте екі рет штрихталып көрсетілген. Сондықтан қарастырылып отырған сұйық энергиясының өзгерісі ΔS_2 және $\Delta S'_2$ қималарының арасындағы сұйық бөлігінің энергиясы мен ΔS_1 және $\Delta S'_1$ қималарының арасындағы сұйық бөлігі энергияларының айырмасына тең.

ΔS_2 және $\Delta S'_2$ қималарының арасындағы сұйықтың потенциалдық энергиясы $W_{p_2} = \Delta m_2 g h_2 = \rho \Delta S_2 v_2 \Delta t g h_2$, ал кинетикалық энергиясы $W_{k_2} = \frac{1}{2} \Delta m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta S_2 v_2 \Delta t v_2^2$.

$\Delta S'_1$ және ΔS_1 қималарының арасындағы сұйықтың энергиясы да осыған ұқсас анықталады.

Онда қарастырып отырған ағын түтігінен бөліп алған сұйық бөлігі энергиясының Δt уақыт аралығындағы өзгерісі

$$\Delta W = \rho \Delta S_2 v_2 \Delta t g h_2 + \frac{1}{2} \rho \Delta S_2 v_2 \Delta t v_2^2 - (\rho \Delta S_1 v_1 \Delta t g h_1 + \frac{1}{2} \rho \Delta S_1 v_1 \Delta t v_1^2). \quad (23.2)$$

Екінші жағынан, энергияның сақталу заңының негізінде сыртқы күштердің (23.1) энергиясы жүйе энергиясының (23.2) өзгерісіне тең болады.

Онда $v_1 \Delta S_1 = v_2 \Delta S_2$ үзіліссіздік тендеуін ескере отырып мына өрнекті аламыз:

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2. \quad (23.3)$$

Бұл — *Бернулли теңдеуі*. Ол жеткілікті жіңішке ағын түтігі үшін қорытып шығарылған, сондықтан ол жіңішке түтік ағын сызығына айналатын кезде орындалады. Сондықтан $p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2$ шамасы ағын сызығы бойында өзгермейді. Бернулли теңдеуін *үш қысымның теңдеуі* деп атайды. Себебі бұл теңдеудегі p — статикалық қысым,

$\rho g h$ — гидростатикалық қысым, $\frac{\rho v^2}{2}$ — гидродинамикалық қысым.

Сонымен қатар $\frac{\rho v^2}{2}$ — кинетикалық энергияның тығыздығы, $\rho g h$ — потенциалдық энергияның тығыздығы, ал p — осы қысым күші жасайтын жұмыспен өлшенетін сұйықтың потенциалдық энергиясының тығыздығы болып табылады. Сондықтан Бернулли теңдеуін *үш энергия теңдеуі* деп те атайды.

(23.3) теңдеуді ρg бөлсек, мынаны аламыз:

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{const}, \quad (23.4)$$

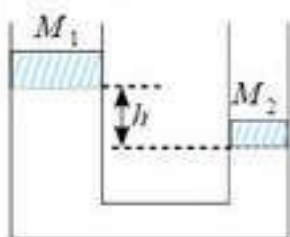
мұндағы h — *геодезиялық* (геометриялық) *биіктік*, яғни берілген қиманың көкжиектен жоғары жатқан бөлігі, $\frac{p}{\rho g}$ — *пьезометрлік биіктік*, яғни өзінің салмағымен p қысым түсіретін сұйық бағанының биіктігі, $\frac{v^2}{2g}$ — *жылдамдықтың биіктігі*, яғни жылдамдығы v тең сұйық бөлшегінің вакуумда көтеріле алатын биіктігі. Сондықтан Бернулли теңдеуін *үш биіктік теңдеуі* деп те атайды.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай сұйықты идеал сұйық деп атайды?
2. Бернулли теңдеуінің физикалық мағынасы қандай?
3. Бернулли теңдеуін неге үш қысым теңдеуі деп атайды? Ол қандай қысымдар?
4. Қай биіктіктерді геодезиялық, пьезометриялық, гидродинамикалық деп атайды?
5. Қандай заңдылықты пайдаланып, Бернулли теңдеуін қорытып шығардық?

Есеп шығару үлгілері



23.2-сурет

поршеньнің үстіне алмастырса, поршеньдердің H биіктіктегі айырымдарын табыңдар.

Шешуі. Поршеньдердің сәйкесінше аудандары S_1 және S_2 , судың тығыздығы ρ болсын. Бастапқы кездегі поршеньдердің тепе-теңдік шартынан

$$\frac{M_1 g}{S_1} + \rho g h = \frac{M_2 g}{S_2}. \quad (1)$$

Жүкті сол жақтағы поршеньге қойған кезде:

$$\frac{(M_1 + m)g}{S_1} = \frac{M_2 g}{S_2}. \quad (2)$$

Жүкті оң жақтағы поршеньге қойған кезде:

$$\frac{M_1 g}{S_1} + \rho g H = \frac{(M_2 + m)g}{S_2}. \quad (3)$$

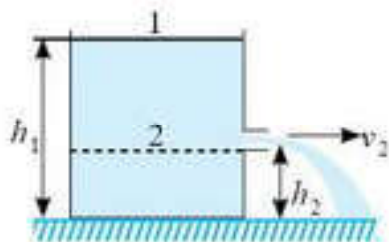
Бірінші және екінші теңдеулерден S_1 және S_2 шамаларын анықтайық:

$$S_1 = \frac{m}{\rho h}, \quad S_2 = \frac{m}{\rho h} \frac{M_2}{M_1 + m}.$$

Осы S_1 және S_2 шамаларын үшінші теңдеуге қойып, есептің жауабын мына түрде аламыз: $H = h \left(1 + \frac{M_1 + m}{M_2} \right)$.

2-есеп. 23.3-суретте көрсетілген ашық ыдыстағы тар санылаудан идеал, сығылмайтын сұйықтың ағып шығу жылдамдығын анықтаңдар.

Шешуі. Бернулли теңдеуін 1 (ыдыстағы сұйықтың бетіндегі) және 2 (су ағатын санылаудағы) нүктелер үшін жазайық:



23.3-сурет

$$p_1 = \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}.$$

Егер сұйық бағанындағы атмосфералық қысымның өзгерісін ескермесек, онда $p_1 = p_2$ болады да, теңдік мына түрде жазылады:

$$\rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}.$$

Саңылаудың көлденең қимасы сұйық бетінің ауданынан әлдеқайда аз болғандықтан, үзіліссіздік теңдеуінің негізінде $v_1 \ll v_2$ болып, теңдеудің сол жағындағы теңдеуді ескермесе де болады, онда

$$gh_1 = gh_2 + \frac{v_2^2}{2},$$

бұдан

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}.$$

Бұл өрнек Торричелли өрнегі деп аталады.

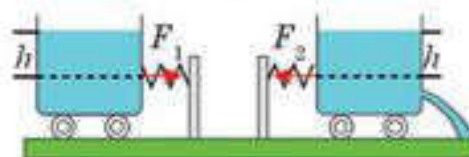
3-есеп. Ұшып келе жатқан ұшақтың қанатының астындағы ауаның қысымы $97,8 \text{ кН/м}^2$, ал қанаттың үстіндегі қысым $96,8 \text{ кН/м}^2$. Қанаттың ауданы 20 м^2 . Көтергіш күшті есептендер.

Шешуі. $F = pS$, мұндағы $p = p_2 - p_1$, яғни

$$F = (p_2 - p_1)S, F = 20 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Жауабы : 20 кН

4-есеп. Сұйық құйылған ыдысқа ауданы S болатын саңылау жасалған. Саңылаудың өлшемі ыдыстың биіктігіне қарағанда кем. Бірінші жағдайда саңылау пластинамен бекітілген. Пластинаға әсер ететін сұйықтың қысым күші F_1 , сұйықтың биіктігі h тең (23.4-сурет). Екінші жағдайда ыдыс арбашада орналасқан және саңылау пластинамен жабылмаған. Ыдыстың ішіндегі сұйықтың биіктігі бірінші жағдайға сәйкес болған кезде ағып жатқан сұйыққа F_2 күш әсер етеді. Осы кезде F_1 мен F_2 күштері бірдей бола ма?



23.4-сурет

Шешуі. Паскаль заңына сәйкес сұйықтың ішіндегі қысым барлық бағытта бірдей әсер етеді, сондықтан бірінші жағдайда күш сұйықтың биіктігі h болатын гидростатикалық қысымға тең: $F_1 = \rho ghS$, мұндағы ρ — сұйықтың тығыздығы.

Екінші жағдайда F_2 күші Ньютонның екінші заңына сүйеніп, сұйықтағы уақыт бірлігіндегі импульстің өзгерісіне тең: $F_2 = \Delta p / \Delta t$. $\Delta p = \Delta mv$, мұндағы Δm — Δt уақыт аралығындағы ағатын сұйықтың массасы, v — саңылаудан ағатын сұйықтың жылдамдығы. $\Delta m = \rho S v \Delta t$ Торричелли формуласынан жылдамдықты табайық: $v = \sqrt{2gh}$, яғни $F_2 = \rho v^2 S = 2\rho ghS$.

Сәйкесінше $F_2 = 2F_1$ болады. Сұйық кішкене саңылаудан аққан кезде ағын сызықтарының тығыздығы артады, Бернулли теңдеуіне сәйкес саңылаудың жанындағы қабырғаларға әсер ететін қысым кемиді. Демек, ағып жатқан сұйықтың реакция күші саңылау ауданына әсер ететін қысымнан көп болады.

Жауабы : F_1 және F_2 күштері тең емес

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Екі литрлік пластик бөтелкеге әртүрлі биіктікте саңылау жасап, оны сумен толтырыңдар. Әртүрлі саңылаулардан ағып шығып жатқан су ағынының жылдамдықтарын бақылаңдар. Қай саңылаудан шығып жатқан су ағыны көбірек?

Түсіндіріңдер

1. Қасыңнан жүрдек поезд өткен кезде ол сені өзіне тартатын сияқты болып сезіледі. Неге екенін түсіндіріңдер.

2. Көлденең қимасы бірте-бірте жіңішкеріп бара жатқан түтікпен су ағып жатыр. Су ішінде ауа көпіршігі бар. Көпіршік түтіктің жіңішке бөлігінен өткенде оның диаметрі қалай өзгереді?

Шығарыңдар

1. Үй жертөлесіндегі жылу жүйесіне су диаметрі 4 см құбырмен, 50 см/с жылдамдықпен және 3 атмосфералық қысыммен келеді. Үйдің 5 м биіктікте орналасқан екінші қабатына диаметрі 2,6 см құбырда судың ағу жылдамдығы және қысымы қандай?

Жауабы: 1,18 м/с, 2,5 Па

2. Поршеніне 30 Н күш әсер ететін, диаметрі 4 см шприцтен атқылайтын су ағынының жылдамдығын анықтаңдар. Су атқылайтын саңылаудың ауданы, шприц поршенінің ауданынан әлдеқайда аз және ауаның кедергісі ескерілмейді.

Жауабы: 6,9 м/с

3. Беті тегіс үстелдің үстінде суы бар ыдыс тұр. Ыдыс бүйірінде, табанына жақын жерде ауданы 5 см^2 тең тар саңылау бар. Егер ыдыстағы судың биіктігі 40 см болса, ыдысты жылжитпай тепе-теңдікте ұстап тұру үшін оған ең аз қандай күшпен әсер ету керек?

Жауабы: 4 Н

4. Ауданы 10 см^2 болатын шприцтің поршеніне тұрақты 12 Н күш әсер етеді. Егер шприцтегі сұйықтың тығыздығы $0,8 \text{ г/см}^3$ болса, ауданы 2 см^2 болатын шприц саңылауынан горизонталь бағытта сұйық қандай жылдамдықпен атқылайды?

Жауабы: 5 м/с

*5. ПЭК 60%-ға тең насос әрбір секунд сайын $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ суды қимасы 25 см^2 болатын құбырмен 20 м биіктікке көтереді. Осы насостың ең аз қуатын есептеңдер.

Жауабы: 3,7 МВт

Рефлексия

- | | |
|----------------------------|------------------------|
| 1. Бүгін менің білгенім... | 4. Менің түсінгенім... |
| 2. Қызықты болғаны... | 5. Менің үйренгенім... |
| 3. Қиын болғаны... | 6. Менің жасағаным... |

§ 24. Тұтқырлық. Сұйықтардың ламинар және турбулентті ағыны



Тірек ұғымдар: тұтқырлық, ламинар ағын, турбулентті ағын, Рейнольдс саны.

Бүгінгі сабақта: сұйықтардағы ішкі үйкеліспен, ламинарлы және турбулентті ағындармен және олардың пайда болу жағдайларымен танысасындар.

Идеал сұйық, яғни ішкі үйкеліссіз сұйық ұғымы абстракция болып табылады. Барлық нақты газдар мен сұйықтарға ішкі үйкеліс тән. Газдар мен сұйықтардың мұндай ішкі үйкелісі *тұтқырлық* деп аталады. Тұтқырлық газ бен сұйықтардың әртүрлі қабаттарының арасында олар бір-біріне қатысты түрлі жылдамдықпен қозғалуының салдарынан пайда болады. Ол күш сол жанасатын беттердің бойымен бағытталған. Бұл күштер жылдамдығы үлкен қабат жылдамдығы аз қабатты үдететіндей, ал жылдамдығы аз қабат жылдамдығы үлкен қабатты баяулататындай болып әсер етеді.

F ішкі үйкеліс күшінің шамасы жанасатын беттердің S ауданына байланысты. Бет неғұрлым үлкен болса, күш те үлкен және қабаттардың салыстырмалы жылдамдығы да артады. Бір қабаттан екінші қабатқа өткенде, неғұрлым тез өзгерсе, күш те соғұрлым үлкен болады.

24.1-суретте бір-бірінен Δx қашықтықта орналасқан v_1 және v_2 жылдамдықтарымен қозғалатын екі қабаттар көрсетілген. Бұл жағдайда бір қабаттан екінші қабатқа өткен кездегі жылдамдықтың өзгеруі $\Delta v = v_2 - v_1$. Ал қабаттан қабатқа өткендегі жылдамдықтың өзгеру шапшаңдығы $\frac{\Delta v}{\Delta x}$. Онда ішкі үйкеліс күші модулі мынадай өрнекпен анықталады:



24.1-сурет

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S, \quad (24.1)$$

мұндағы η — тұтқырлық коэффициенті деп аталады, оның мәні сұйықтың табиғатына байланысты. Тұтқырлықтың өлшем бірлігі — паскаль · секунд (Па · с).

Тұтқырлық неғұрлым көбірек болса, сұйық идеал күйінен соғұрлым ерекшеленіп, ішкі үйкеліс күштері көп болады. Тұтқырлық коэффициенті температураға тәуелді және бұл тәуелділіктің сипаты сұйықтар мен газдар үшін айтарлықтай өзгеше. Сұйықтарда тұтқырлық коэффициенті температураның жоғарылауымен қатты төмендейді. Ал газдар үшін керісінше температура артқанда тұтқырлық та артады. Температураның өзгеруіне қатысты η сипаты сұйықтар мен газдардағы ішкі үйкеліс механизмінің бір-бірінен өзгеше екенін көрсетеді.

Бұдан әрі нақты сұйық (газдың) ағынын қарастырамыз. Сұйық ағынның екі түрі бар. Кейбір жағдайларда сұйық қабаттарға бөлініп, олар араласусыз бір-біріне қатысты сырғанап жылжиды. Бұл ағын *ламинарлық* (қабатты) ағын деп аталады. Егер ламинарлы ағынға бояу тамызса, онда боялған ағын бүкіл ағын бойына бояу сызығы сақталып қалады, өйткені ламинарлы ағындағы сұйық бөлшектер бір қабаттан екіншісіне өтпейді. Ламинарлы ағын стационарлы. Тұтқыр сұйықтың мұндай ағыны көлденең қима және ағын жылдамдығы аса үлкен болмаған жағдайда ғана жүзеге асады.

Ағынның жылдамдығы немесе көлденең қимасы артқан кезде ағынның сипаты айтарлықтай өзгереді. Бұл кезде сұйық қарқынды араласып, ағынның пірімдері пайда болады. Мұндай ағын *турбулентті* деп аталады. Турбулентті ағын болған жағдайда кез келген жерде бөлшектердің жылдамдығы бей-берекет түрде өзгереді — ағын стационарлық емес.

Ағылшын ғалымы Рейнольдс ағынның сипаты мынадай өлшемсіз шамаға байланысты екенін анықтады:

$$R_e = \frac{\rho v l}{\eta}, \quad (24.2)$$

мұндағы ρ — сұйық тығыздығы, v — орташа ағынның жылдамдығы, η — тұтқырлық коэффициенті, ал l — көлденең қиманың өлшемі. Осы (24.2) шамасы *Рейнольдс саны* деп аталады. Төмен Рейнольдс сандарында ($R_e \ll 1000$) ламинарлы ағын байқалады. Ламинарлы ағыннан турбулентті ағынға көшу $1000 \ll R_e \ll 2000$ аймағында кездеседі.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Сұйықтар мен газдардағы ішкі үйкелістің пайда болуы немен байланысты?
2. Тұтқырлық қандай бірлікпен өлшенеді?
3. Қандай ағын ламинарлы деп аталады?
4. Қандай ағын турбулентті деп аталады?
5. Рейнольдс саны қалай анықталады?



Рефлексия

- | | |
|----------------------------|------------------------|
| 1. Бүгін менің білгенім... | 4. Менің түсінгенім... |
| 2. Қызықты болғаны... | 5. Менің үйренгенім... |
| 3. Қиын болғаны... | 6. Менің жасағаным... |

§ 25. Денелердің сұйықтар мен газдардағы қозғалысы. Маңдай кедергі және көтергіш күш. Стокс формуласы



Тірек ұғымдар: маңдай кедергі, көтергіш күш, шекаралық қабат, Магнус әсері, Стокс формуласы.

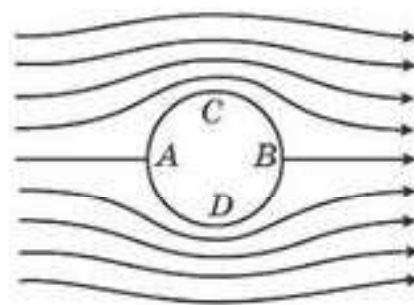
Бүгінгі сабақта: идеал және тұтқыр сұйық тағы қатты дененің қозғалысының ерекшеліктерімен танысасыздар.

Гидроаэродинамиканың ең маңызды міндеттерінің бірі газдағы және сұйықтағы қатты денелер қозғалысын зерттеу, атап айтқанда, осындай ортаның қозғалыстағы денеге әсер ететін күштерін анықтау болып табылады.

Сұйық немесе газдарда қозғалатын денеге жалпы екі күш әсер етеді, олардың біреуі әдетте дене қозғалысына қарсы бағытталған — *маңдай кедергі*, ал екіншісі — қозғалыс бағытына перпендикуляр *көтергіш күші*. Алайда, егер дененің формасы симметриялы және оның симметрия осі жылдамдығының бағытына сәйкес келсе, онда оған көтергіш күш әсер етпейді, тек маңдай кедергісі ғана әсер етеді. Егер дене ішкі кедергісіз идеал сұйықта қозғалған болса, онда маңдай кедергі де әсер етпеген болар еді.

Бұл жағдайда, тұтқырлығы жоқ идеал сұйық дененің айналасында, оның бетінің бойымен еркін сырғанап ағуы тиіс. 25.1-суретте өте ұзын цилиндрдің идеал сұйық айналасында ағын сызықтары көрсетілген. Әрине, ағыны деформацияланған, бірақ екеуі де *A* және *B* нүктелері арқылы өтетін түзуге қатысты идеал симметриялы, *C* және *D* нүктелері арқылы өтетін салыстырмалы түзуге де сондай симметриялы болады. Сондықтан да *A* және *B* нүктелері жанында қысым бірдей (деформацияланған ағындарға қарағанда көп, өйткені бұл нүктелерге жақын жылдамдық аз болады); тура сондай *C* және *D* нүктелерінің жанында қысым да бірдей (деформацияланбаған ағындарға қарағанда кем, өйткені бұл нүктелердің қасындағы жылдамдығы көп). Демек, цилиндр бетіне әсер ететін қысымның күші нөлге тең болады. Тура осындай нәтиже басқа да симметриялық пішіндегі денелер үшін де алынады.

Ал енді тұтқырлығы бар сұйықтағы дененің қозғалысы басқаша болады. Бұл жағдайда сұйықтың өте жұқа қабаты дененің бетіне жабысып, ол жұқа қабат үйкеліс арқылы өзінен кейінгі қабаттарды ілдіріп, сүйрейді қозғалатын болады. Дене бетінен алыстаған сайын қабаттардың жылдамдығы азая бастайды да, дене бетінен белгілі бір қашықтықтан әрі сұйық қозғалысын сезбейді. Осылайша



25.1-сурет

дене жылдамдықтың градиенті бар сұйықтың қабатымен айнала қоршалыады. Бұл қабат *шекаралық қабат* деп аталады.

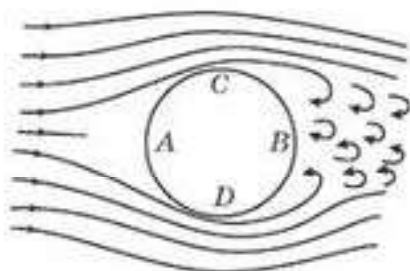
Онда үйкеліс күштері әсер етеді, бұл маңдай кедергінің пайда болуына әкеледі. Бірақ мәселе мұнымен бітпейді. Шекара қабатының болуы сұйық арқылы дене ағынының сипатын түпкілікті өзгертеді. Денені жанай ағу мүмкін болмайды. Беттік қабаттағы үйкеліс күштердің әсері ағынның дененің бетінен бөлініп кетуіне әкеледі, соның салдарынан дененің артында құйындылар пайда болады (25.2-сурет). Дененің артында пайда болған құйынды аймақтағы қысым төмендейді, сондықтан нәтиже беретін қысым күштері нөлден өзгеше, бұл өз кезегінде маңдай кедергіні туғызады.

Осылайша маңдай кедергі үйкеліс және қысым кедергісінен тұрады. Дененің берілген көлденең қимасында қысымның кедергісі оның пішініне байланысты болады. Жаксы ағатын тамшы пішінді денелер ең аз қысым кедергісіне ие (25.3-сурет).

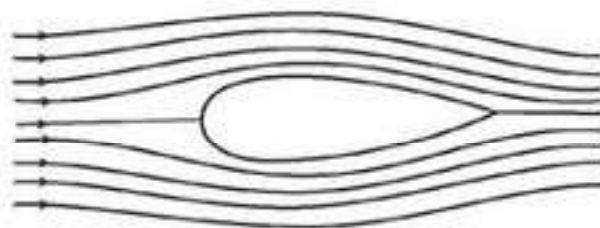
Төмен Рейнольдс сандарында, яғни аз жылдамдық және кішкене дене өлшемдерінде ортаның кедергісі іс жүзінде үйкеліс күштеріне ғана байланысты болады. Ағылшын ғалымы Дж. Стокс бұл жағдайда кедергі күшінің η тұтқырлық коэффициентіне, сұйыққа қатысты дененің v жылдамдығына және дененің өзіне тән r өлшеміне пропорционалды екенін анықтады. Пропорционалдық коэффициенті дененің пішініне байланысты. Шар үшін тән өлшемі ретінде радиусы қабылданса, пропорционалдылық коэффициенті 6π болады. Демек, Стокс формуласына сәйкес төменгі жылдамдықта сұйықтағы шардың қозғалысына кедергі күш

$$F = 6\pi\eta rv. \quad (25.1)$$

Сұйық немесе газдағы қозғалатын қатты дене бетінің әртүрлі нүктелеріндегі статикалық қысымның айырмашылығы кедергі күшін ғана емес, көтергіш күшті де туғызады. Көтергіш күштің пайда болуы үшін сұйықтың тұтқырлығы маңызды емес. 25.4-суретте жартылай цилиндр маңынан идеал сұйық аққан кездегі ток сызықтары көрсетілген. Толық ағынның ток сызықтары CD бағытына қатысты симметриялы болады. Алайда AB түзуіне қатысты сурет асимметриялы. Ағын

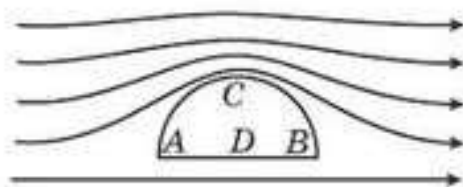


25.2-сурет



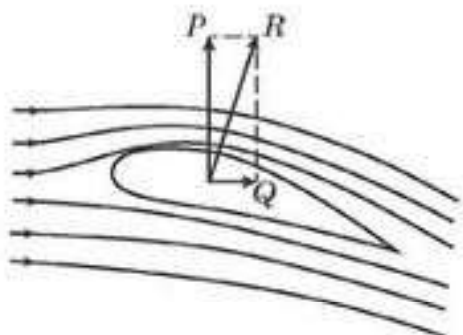
25.3-сурет

сызықтарының C нүктесінің маңындағы қалыңдығы басқа жердегіден артық, сондықтан да мұндағы қысым D нүктесінің маңындағы қысымға карағанда аз болады, осының салдарынан P көтеру күші пайда болады. Сол сияқты тұтқыр сұйықтағы пайда болатын көтергіш күш те осы жолмен түсіндіріледі.



25.4-сурет

Жоғарыда цилиндрдің маңынан тұтқыр сұйық аққанда қалай маңдай кедергі пайда болатыны түсіндірілді. Бірақ бұл жағдайда көтергіш күш пайда болмайды. Алайда, егер цилиндр айналып тұрса, онда жағдай өзгереді. Цилиндр айналғанда оның бетін жабысқақ тұтқыр сұйық қоса айналады да, ол сұйықтық басқа қабаттарына әсер ете отырып, цилиндр маңында құйын туғызады.



25.5-сурет

Цилиндрдің бір жағында құйынның бағыты оны айнала өтіп жатқан ағынның бағытымен сәйкес болады да, ағынның жылдамдығы одан артады. Ал цилиндрдің екінші жағында құйын бағыты ағын бағытына қарама-қарсы болғандықтан, оның жылдамдығын кемітеді. Цилиндрдің екі жағындағы осындай жылдамдық айырымынан сол жерлердегі қысым айырымы пайда болып, көтергіш күш туады. Бұл құбылысты алғаш рет неміс физигі Генрих Мангус зерттеп, зерделеген, сондықтан ол *Мангус әсері* деп аталады.

Көтеруші күштің пайда болуы күнделікті тәжірибеде кеңінен қолданылады. Ауа кемелерін оның канаттарына әсер етіп әуеде ұстайтын күш — көтергіш күш. Маңдай кедергі ұшақ ұшу кезінде зиянды рөл атқарады. Сондықтан әуе кемелерінің канаты мен оның фюзеляжына жақсы ағатын форма беріледі. Қанат профилі сонымен бірге жеткілікті көтеру қуатын қамтамасыз етуі керек. Қанаттың оңтайлы профилі — Ресей ғалымы Н.Е. Жуковский тапқан, 25.5-суретте көрсетілген профиль. Бұл суретте Q — маңдай кедергі, P — көтергіш күш.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Маңдай кедергі күші неге байланысты болады?
2. Шекара қабаты дегеніміз не?
3. Көтергіш күш қалай пайда болады?
4. Мангус әсерінің мәні неде?
5. Стокс күші қалай анықталды?

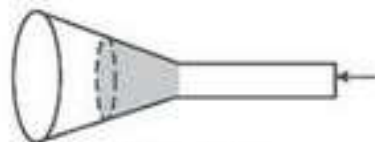
Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Үстелдің шеткі жағынан жеңіл теннис доптарының айналып құлауын қадағаландар. Олардың қозғалысын сипаттап, түсіндіріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

Құйғыға (воронка) қағаз сүзгісін салыңдар (25.6-сурет) және оны құйғының тар аяқ жағынан үрлеп көріңдер. Дұрыс үрленбейді ме? Неліктен?



25.6-сурет

Түсіндіріңдер

Неге дауыл үйдің шатырын жұлып кетеді?

Зерттеңдер

Ыдыстағы су деңгейінен ашық ыдыстағы кішкене тесікке судың ағу жылдамдығына тәуелділігін зерттеңдер. Өздерің тапқан мәндерді Торричелли формуласынан тапқан мәндермен салыстырып, қорытынды жасаңдар.

Талдаңдар

1. Футбол добын қақпаға бұрыштан неге "айналдырып" соғуға болатынын талдаңдар.
2. Не себепті, егер сендер қозғалыстағы пойызға жақын тұрсаңдар, дөңгелектерге "тартылудың" әсері болады?

Шығарыңдар

1. Егер жел қабырғаға 200 Па қысым түсірсе, желдің жылдамдығы қандай болғаны? Жел қабырғаға перпендикуляр соғады. Ауа тығыздығы $1,29 \text{ кг / м}^3$ құрайды.
Жауабы: 8,8 м/с
2. Горизонталь құбырдың кең бөлігінде мұнай 2 м/с жылдамдықпен ағады. Құбырдың тар және кең бөліктеріндегі қысым айырымы 50 мм.сын.бағ. құраса, құбырдың тар бөлігіндегі мұнайдың ағу жылдамдығын анықтаңдар.
Жауабы: 4,33 м/с
- 3. Субұрқағынан атқылап жатқан ағынның көлденең қимасы қандай биіктікте сол ағынның субұрқақтан шығар жеріндегі көлденең қимасынан бес есе артық болады? Ағынның субұрқағынан шығар жердегі жылдамдығы 10 м/с.
Жауабы: 4,8 м
- 4. 1 м биіктікке дейін су толтырылған баққа 10 см биіктікте саңылау жасайды. Бактан қандай қашықтықта су ағысы атқылайды? Ол үлкен қашықтыққа атқылау үшін саңылауды қайда жасаған дұрыс?
Жауабы: 0,6 м, 0,5 м

Рефлексия

1. Бүгін менің білгенім...
2. Қызықты болғаны...
3. Қиын болғаны...
4. Менің түсінгенім...
5. Менің үйренгенім...
6. Менің жасағаным...



Гидроаэромеханика — сұйықтар мен газдардың механикалық қасиеттерін және катты денелердің олардағы қозғалысын зерттейтін ғылым.

Сұйықтар механикасында **қысым** ұғымы маңызды болып табылады. **Қысым** дегеніміз — сан мәні жағынан S бетінің бірлік ауданына оған перпендикуляр бағытта әсер ететін F күшіне тең физикалық шама, яғни $p = \frac{F}{S}$. Тыныштықта тұрған сұйық үшін **Паскаль заңы** орынды: сұйықтың берілген нүктесінде қысым барлық жаққа бірдей беріледі.

Ауырлық күшінің салдарынан пайда болған қысым **гидростатикалық қысым** деп аталады. Ол мына өрнекпен аныкталады: $p = \rho gh$, мұндағы h — сұйық бағанының биіктігі, ρ — оның тығыздығы.

Сұйыққа батырылған денеге **Архимед заңымен** анықталған күш әсер етеді: сұйыққа батырылған денеге осы сұйық тарапынан мәні жағынан дене ығыстырып шығарған сұйық салмағына тең, жоғары қарай бағытталған ығыстыру күші әсер етеді: $F_A = \rho gV$, мұндағы ρ — сұйықтың тығыздығы, V — оның көлемі.

Сұйықтың қозғалысы **ағыс** деп, сұйық бөлшектері тобының қозғалысы **ағын** деп аталады. Графиктік түрде сұйықтың қозғалысы **ағын сызықтары** арқылы бейнеленеді.

Егер ағын сызықтарының түрі мен орналасуы және оның әрбір нүктесіндегі жылдамдықтың мәні уақыттың өтуімен байланысты өзгермесе, ондай сұйықтардың ағысы **тұрақталған (стационар) ағыс** деп аталады. Сығылмайтын сұйықтар үшін үзіліссіздік теңдеуі орынды: берілген ағын түтікшесі үшін сығылмайтын сұйықтың ағыс жылдамдығының түтікшенің көлденең қимасына көбейтіндісі тұрақты шама болып табылады, яғни $S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{const}$.

Идеал сығылмайтын сұйық үшін механикалық энергияның сақталу заңы Бернулли теңдеуі арқылы тұжырымдалады:

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const},$$

мұндағы p — берілген S қимадағы қысым, ρgh — гидростатикалық қысым, $\frac{1}{2} \rho v^2$ — гидродинамикалық қысым.

Барлық нақтылы сұйықтар мен газдарға қандай да бір дәрежеде ішкі үйкеліс тән. Сұйық пен газдардағы ішкі үйкеліс **тұтқырлық** деп аталады. Ішкі үйкеліс сұйықтың бір қабаты екінші қабатына қатысты қозғалған кезде пайда болады.

II бөлім. ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ

6-тарау. ГАЗДАРДЫҢ МОЛЕКУЛАЛЫҚ-КИНЕТИКАЛЫҚ ТЕОРИЯСЫНЫҢ НЕГІЗДЕРІ

§ 26. Газдардың молекулалық-кинетикалық теориясының негізгі қағидалары және оның тәжірибелік дәлелдемелері



Тірек ұғымдар: микробөлшектер, атом, молекула, газдың қысымы, диффузия, броундық қозғалыс.

Бүгінгі сабақта: молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі қағидаларымен және оның тәжірибелік дәлелдемелерімен танысасыздар.

Зат құрылымының молекулалық-кинетикалық құрылымы теориясы (МКТ) көптеген бақылаулар мен тәжірибелердің жалпылама қорытындысы нәтижесінде жасалынды. Оның негізгі қағидаларын атап өтейік.

1. Барлық денелер микробөлшектерден (атомдардан немесе молекулалардан) тұрады, ал дененің массасы өзін түзетін микробөлшектердің массаларының қосындысына тең:

$$m = m_0 N.$$

2. Денедегі микробөлшектер үздіксіз және хаосты қозғалыста болады әрі бұл қозғалыстың жылдамдығы дененің температурасына тәуелді, сондықтан оны *жылулық қозғалыс* деп атайды. Молекулалардың қозғалыс жылдамдығының дене температурасына тәуелділігін кейінірек Людвиг Больцман (1844—1906) тағайындады: $v_0 = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$, мұндағы m_0 — молекула массасы; T — дененің абсолют температурасы; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — *Больцман тұрақтысы*.

3. Денедегі микробөлшектер өзара әсерлеседі әрі өзара әсерлесу күшінің тегі электромагниттік болып табылады. Дене бөлшектерінің арасында тебілу күштері де, тартылу күштері де бар.

Молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі қағидаларын дәлелдейтін тәжірибелік деректерді келтірейік.

1. Заттар бөлінгіш. Бөліну кезінде заттың физикалық және химиялық қасиеттері өзгеріссіз қалады.

2. Газдар сығылғыш. Бұл дене молекулаларының арасында үлкен қашықтықтардың болатынын көрсетеді.

3. Газ кез келген көлемді алады. Бұл дерек молекулалардың қозғалыста болатынын, сонымен қатар олардың арасындағы қашықтықтардың өзгеріп отыратынын білдіреді.

4. Еселік қатынастар заңы. Бұл заң бойынша кез келген химиялық қосылыстар пайда болғанда реакцияға түсетін заттардың массалары өзара белгілі қатынаста болады. Бұл тікелей болмаса да, денелердің атомдардан тұратынын көрсетеді.

5. Газдың өзі тұрған ыдыстың қабырғасына қысым түсіруі. Бұл молекулалардың қозғалыста болатынын көрсетеді.

6. *Диффузия* — бір заттың молекулаларының екінші заттың молекулааралық кеңістігіне еніп кетуі. Диффузияны газдарда (піссудың, бензиннің және т.б. пістердің ауада таралуы), сұйықтарда (бояулардың, сияның, туштың, сүттің суда таралуы) және қатты денелерде (ұзақ уақыт бойы қорғасын және алтын цилиндрлерді бір-біріне тығыз беттестіріп қойғанда алтын молекулаларының қорғасынның молекулааралық кеңістігіне және керісінше еніп кетуі байқалған) бақылауға болады. Диффузияның өту жылдамдығы дененің температурасына және заттың агрегаттық күйіне тәуелді. Газдарда ол сұйықтармен қатты денелерге қарағанда тез өтеді.

7. Молекулаларды электрондық микроскопта немесе пондық проекторда (бірнеше миллион рет үлкейтуді қамтамасыз ететін аспап) бақылау. Қазіргі кезде атомдарды күрделі туннельдік микроскоптардың көмегімен бақылауға болады, олар 100 млн есе ұлғайтуды қамтамасыз етеді.

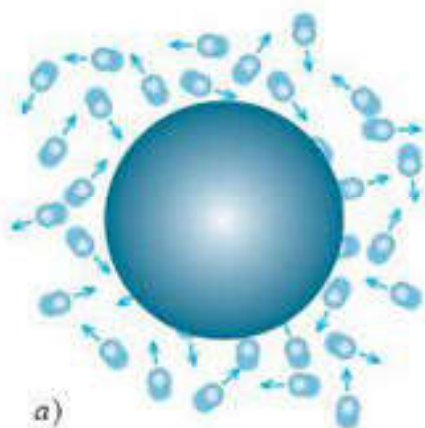
8. Болат цилиндрге құйылған майды қатты қысқанда май цилиндрдің сыртына тамшылап шығып, ал цилиндрдің өзі болса бүтін күйінде қала берген. Бұл молекулалардың арасында кеңістіктердің барлығын, яғни дененің тұтас болмайтынын көрсетеді.

9. Беттері әдейілеп тегістеліп, бір-бірімен түйістірілген екі қорғасын цилиндрдің бір-біріне жабысып қалуы. Бұл жағдайда екі цилиндр біртұтас тәрізді көрінеді. Егер бір цилиндрді бекітіп қойып, екінші цилиндрге жүк ілсек (20 кг шамасында), онда цилиндр бір-бірінен ажырамайды.

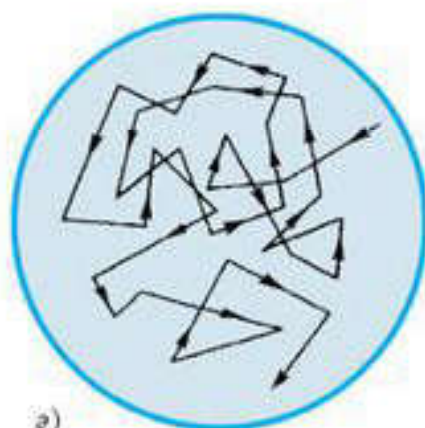
10. Денелердің беріктігі денедегі микробөлшектердің өзара тартылатынын білдіреді. Жай таяқтың өзін оп-оңай сындыра алмайсың, себебі молекулалардың арасында тартылыс күші бар.

11. Денелердің серпімді деформациялық қасиеттері де дененің микробөлшектерінің арасында өзара әсерлесу күштерінің бар екенін көрсетеді (тартылыс күштерінің де, тебілу күштерінің де).

12. *Броундық қозғалыс* дегеніміз — сұйықта немесе газда қалқып жүрген қандай да бір қатты заттың өте ұсақ бөлшектерінің сұйық немесе газ молекулаларының соққыларының әсерінен бейберекет қозғалуы. Бұл қозғалыс денедегі молекулалардың хаосты қозғалысының айқын дәлелі. Мұны ағылшын ботанигі Роберт Броун (1773—1858) 1827 жылы тұңғыш рет бақылады. Ол суға түскен плаун спораларын микроскоппен бақылай отырып, олардың хаосты қозғалатынына назар аударды (26.1-сурет). Броун бұл қозғалыстың үздіксіздігіне және



а)



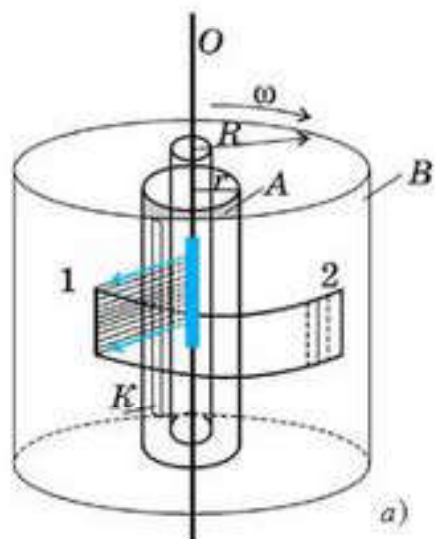
б)

26.1-сурет

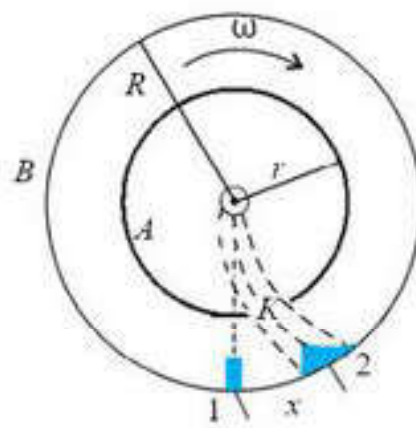
тоқталмайтынына да назар аударды, оны тәуліктер бойы да, айлап та бақылауға болады, оның қарқындылығы тек температураға ғана тәуелді өзгереді. Броундық қозғалыс дегеніміз — жылулық қозғалыс, ол температураға тәуелді болғандықтан тоқтамайды.

Броундық қозғалысты тек молекулалық-кинетикалық теорияның негізінде ғана түсіндіруге болады. Броундық бөлшекке соқтығысатын молекулалар соққылары бір-бірін теңгермейді, нәтижесінде броундық қозғалыс туындайды. Броундық қозғалысқа сапалық түсініктеме беруге болады: *импульстері аз және кездейсоқ бағытта қозғалып жүрген көптеген молекулалар броундық бөлшекке бір бағытта соқтығысып қалса, онда олар бөлшекті біршама ығыстырады.* Броундық қозғалыстың сандық теориясын А.Эйнштейн мен поляк ғалымы М.Смолуховский 1905—1906 жылдары жасады. Француз физигі Ж.Перреннің еңбектері молекулалық-кинетикалық теорияның дұрыстығын толық дәлелдейді.

13. Молекулалардың жылдамдықтарын анықтау үшін 1920 жылы неміс ғалымы О.Штерн тәжірибе жасады. Ішіндегі ауа үздіксіз сорылып алынып отыратын *A* және *B* вакуумдық екі цилиндр алынған (26.2, *a*-сурет). Цилиндр осі бойымен күміс жалатылған жіңішке платина сым тартылған. Электр тогын жібергенде сым қызаяды да, күміс булана бастайды. Ұшып шыққан молекулалар түзусызықты қозғалады. Олардың кейбіреулері ішкі цилиндрдегі *K* саңылаудан ұшып өтіп,



а)



б)

26.2-сурет

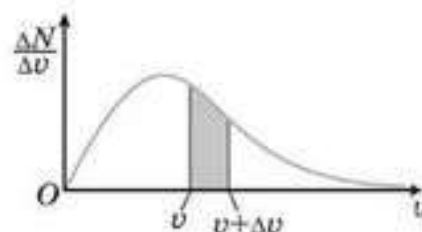
сыртқы цилиндрдің салқындатылған бетіне келіп қонады да, ол жерде анық бақыланатын I күміс жолақты береді. Егер цилиндрді тұрақты ω бұрыштық жылдамдықпен айналдырса, онда қонған атомдардың күміс жолағы бұрынғымен салыстырғанда қайсыбір кашықтыққа ығысады 2 әрі аздап бұзылғыр болады (26.2. ә-сурет). Ығысудың себебі — күміс атомы ішкі цилиндрден сыртқы цилиндрге дейін жеткенше жүйе тұтастай қандай да бір ϕ бұрышқа бұрылып үлгереді. Жолақтың ығысу шамасы бойынша күміс атомдары жылдамдығының шамасын бағалайды. Атомдардың цилиндрлер аралығын ұшып өту уақыты $\tau = \frac{R_B - R_A}{v_0}$, ол цилиндрлер жүйесінің бұрылу уақытына тең: $\tau = \frac{x}{\omega R_B}$.

Осыдан $v_0 = \frac{(R_B - R_A)\omega R_B}{x}$.

Штерн осы тәжірибе арқылы күміс атомдары жылдамдығының шамасы 650 м/с болатынын тапты. Штерн өткізгіштегі ток күші мен температураны өзгерте отырып, атомдар жылдамдығының \sqrt{T} шамасына пропорционал екенін көрсетті. Жолақтың жайылып орналасу себебі күміс атомдары әртүрлі жылдамдықпен қозғалады. Сондықтан шапшаң молекулалар цилиндр қабырғасына ертерек, ал баяулары кешірек жетеді. Қабаттың қалыңдығы бойынша белгілі жылдамдықпен қозғалатын атомдар санын анықтайды. Тәжірибе, шындығында да, молекулалардың жылдамдықтар бойынша таралатынын көрсетеді. Мұндай таралудың сипатын Максвелл 1859 жылы теориялық жолмен есептеп шығарған (26.3-сурет), ал Штерн тәжірибесі оны толық дәлелдеп шықты.

Штерн тәжірибесі молекулалардың орташа квадраттық жылдамдығының дәлді-рыстығын дәлелдейді. Штерннің молекулалар шоғын пайдалануы тәжірибенің осал жағы еді. Кейіннен Штерн өзінің тәжірибесін

жетілдірді және дәлірек нәтижелер $v_0 = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ екенін алды.



26.3-сурет

Біз молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі қағидаларын дәлелдейтін кейбір тәжірибелік деректерді қарастырайық. Молекулалық-кинетикалық теорияның қағидаларына келетін болсақ, олар денелерде өтетін жылулық процестерді (қыздыру, суыту, фазалық өтулер) сипаттау кезінде де, денелердің жылуөткізгіштік теориясын жасауда да аса маңызды рөл атқарады.

Жоғарыда келтірілген барлық мысалдар молекулалардың бар екенін дәлелдейді. Міне, олар атом және молекулалардың өлшемі мен массасының өте аз екенін де көрсетеді. Осы шамаларды қалай анықтауға болады?

Молекулалардың өлшемі. Молекуланың массасын анықтау үшін тіптен үй жағдайында да қоюға болатын қарапайым тәжірибені пайдалануға болады. Тамшыурдың (пипетканың) көмегімен зәйтүн майының бір тамшысын су бетіне тамызайық. Ол су бетіне бір молекуланың еніндей болатын қалыңдықпен жайылып кетеді. Сонда май молекуласының диаметрі $d_0 = \frac{V}{S}$ болады, мұндағы V — тамшының көлемі, $S = \pi R^2$ — жайылып кеткен тамшының ауданы (дөңгелектің ауданы). Есептеулер зәйтүн майының молекуласының диаметрі шамамен $1,7 \cdot 10^{-9}$ м болатынын көрсетеді. Бұл өте мардымсыз аз шама, оны көзге елестетудің өзі қиын. Бұл жерде салыстыру ғана көмек бере алады. Егер әлемдегі барлық заттың өлшемдері 100 млн есеге артса, онда сутек молекуласының диаметрі ($2,3 \cdot 10^{-9}$ м) 2,3 см болатын шарик тәрізді, адамның бойы 170 000 км, шашының ені 10 км болады.

Молекулалардың саны. Міне, өлшемдері осындай кішкене молекуланың массасы 1 г, көлемі 1 см^3 судағы санын анықтайық. Су молекуласының диаметрі $\approx 3 \cdot 10^{-10}$ м (мұны жоғарыда айтылған тәсілмен анықтауға болады). Молекуланың көлемі шамамен $\approx (3 \cdot 10^{-10})^3 \text{ м}^3$. Молекулаларды тығыз орналасқан деп есептейміз. Сонда тамшының көлемін молекуланың көлеміне бөліп, молекулалар санын табамыз:

$$N = \frac{V_{\text{тамшы}}}{V_0} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}{27 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3} \approx 3,7 \cdot 10^{22}. \text{ Молекулалардың мұндай санын}$$

бағалау үшін мынадай салыстыру жүргізейік: сен тыныс алу кезінде ішке тартқан молекулаларды қайтадан шығарғанда олар Жер атмосферасында біркелкі таралатын болса, онда ғаламшардағы әрбір адамға сенің өкпенде болған 2-3 молекуладан келер еді.

Молекулалардың массасы. Молекула массасының соншалықты аз болатыны енді түсінікті. Оны есептеп шығару үшін зәйтүн майымен жүргізілген тәжірибеде алынған нәтижелерді пайдалануға болады. Майдың бір молекуласының көлемі шамамен $(1,7 \cdot 10^{-9})^3 \text{ м}^3$. Молекулалар тығыз орналасқан кезде массасы 1 мг май тамшысында

$$N = \frac{V_{\text{тамшы}}}{V_0} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}{5 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3} \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ молекула, ал майдың бір молеку-$$

ласының массасы $m_0 = \frac{m_{\text{тамшы}}}{N} = \frac{10^{-6}}{2 \cdot 10^{20}} = 5 \cdot 10^{-27}$ кг болады. Молекула массасының өте аз екені анық болды. Кейбір заттардың молекулаларының өлшемдері мен массаларын келтірейік:

$$\text{сутек: } d_0 = 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ м; } m_0 = 3,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг;}$$

$$\text{оттек: } d_0 = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м; } m_0 = 5,1 \cdot 10^{-26} \text{ кг;}$$

$$\text{су: } d_0 = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м; } m_0 = 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

Есептеулер жүргізуге ыңғайлы болу үшін 1961 жылы Халықаралық келісім бойынша молекулалардың салыстырмалы массалары енгізілді. Өте аз ($\approx 10^{-27}$) және сол сияқты өте үлкен ($\approx 10^{22}$) сандар есте сақталмайды. Сондықтан молекулалардың массаларын көміртек атомы массасының $\frac{1}{12}$ бөлігімен салыстыратын болды. Көміртек шкаласының алынуының басты себебі, көміртек көптеген органикалық қосылыстардың құрамына кіреді.

Заттың салыстырмалы молекулалық (немесе атомдық) массасы M_r деп белгіленеді, ол берілген зат молекуласы (немесе атомы) массасының көміртек атомы массасының $\frac{1}{12}$ бөлігінен қанша есе артық екенін көрсететін физикалық шаманы атайды:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_{0c}} \quad (26.1)$$

Барлық химиялық элементтің салыстырмалы атомдық массасы дәл өлшенген. Молекуланың құрамына кіретін химиялық элементтердің атомдық массаларын қосып, заттың салыстырмалы молекулалық массасын алуға болады. Мысалы, H_2SO_4 күкірт қышқылы үшін $M_r = 1 \cdot 2 + 32 \cdot 1 + 16 \cdot 4 = 98$.

Зат мөлшері. Кез келген денедегі молекулалар саны орасан зор болатындықтан, оларды заттың қандай да бір үлесінің молекулалары санымен салыстыру практикада қолдануға ыңғайлы. Заттың осындай үлесі ретінде 12 г көміртектің атомдар саны алынған.

Зат мөлшері n дегеніміз — берілген денедегі молекулалар саны 12 г көміртек атомдар санынан қанша есе артық болатынын көрсететін физикалық шама:

$$n = \frac{N}{N_A} \quad (26.2)$$

Зат мөлшерін мольмен өлшейді. **1 моль дегеніміз** — 12 г көміртекте қанша атом болса, сонша молекуласы бар заттың мөлшері.

Авогадро тұрақтысы. Жоғарыда айтылғандардан көріп отырғанымыздай, кез келген заттың бір мольдегі молекулалар немесе атомдар саны бірдей болады. Бұл сан XIX ғасырда өмір сүрген италиялық ғалым Авогадроның есімімен *Авогадро саны* деп аталады. Авогадро санын анықтау үшін 1 мольдің анықтамасын және көміртек атомының массасын пайдаланамыз. Тәжірибелер көміртек атомы массасының $1,995 \cdot 10^{-26}$ кг екенін көрсетті. Сонда *Авогадро саны*

$$N_A = \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{1,995 \cdot 10^{-26} \text{ кг} \cdot \text{моль}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Авогадро саны универсал тұрақты шама және молекулалық физикада үлкен рөл атқарады.

Мольдік масса. Молекулалық физикада және химияда заттың M мольдік массасы түсінігі кең пайдаланылады.

Заттың мольдік массасы дегеніміз — бір мольдің мөлшерінде алынған заттың массасы :

$$M = m_0 N_A. \quad (26.3)$$

Заттың мольдік массасы заттың салыстырмалы молекулалық массасымен $M = M_r \cdot 10^{-23}$ кг/моль қатынасы арқылы байланысқан.

Заттың кез келген мөлшерінің массасын былай анықтауға болады:

$$m = m_0 N = m_0 N_A V = MV. \quad (26.4)$$

Молекулалар концентрациясы . Микробөлшектер әлемінде заттың бірлік көлемінде канша бөлшек бар екенін көрсететін шама *молекулалар концентрациясы* деп аталады:

$$n = \frac{N}{V}. \quad (26.5)$$

Осыны ескерсек, тығыздық

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 n \quad (26.6)$$

екенін аламыз.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Жытулық қозғалыстың хаостығы туралы ұйғарымды қалай түсінесіңдер?
2. Молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі қағидаларын атап өтіңдер.
3. Қандай мысалдар молекулалардың бар екенін дәлелдейді?
4. Денедегі молекулалардың үздіксіз, хаосты қозғалыста болатынын дәлелдендер.
5. Қандай қозғалыс броундық деп аталады?
6. Броундық қозғалыстың қарқындылығы қандай факторларға тәуелді?
7. Диффузия деп нені түсінесіңдер? Диффузияның ету сипатын қалай өзгертуге болады?
8. Штерннің молекулалардың жылдамдығын анықтау тәжірибесінің маңыздылығы неде?
9. Денедегі атомдар мен молекулалардың өзара әсерлесетінін қалай дәлелдеуге болады?
10. Молекуланың өлшемі жайлы не білесіңдер? Молекуланың диаметрін қалай есептеп шығаруға болады?
11. Денедегі молекулалардың санын қалай есептеп шығаруға болады?
12. Молекулалық массасы қалай анықталған?
13. Заттың салыстырмалы молекулалық массасының физикалық мағынасы қандай? Ол не үшін енгізілді?
14. Авогадро саны нені білдіреді?
15. Қандай масса мольдік деп аталады?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Газдар мен сұйықтардағы диффузия құбылысын бақылаңдар. Заттың қандай агрегаттық күйлерінде диффузия шапшаңырақ өтеді? Неліктен?

Тәжірибе жасаңдар

Кәдімгі таяқты сындыруға талпынып, оның беріктігін тексеріңдер және молекулалар арасында тартылыс күшінің бар екеніне көз жеткізіңдер.

Түсіндіріңдер

1. Неліктен броундық қозғалыстың ашылуы физика үшін маңызды болды?
2. Заттың әртүрлі агрегаттық күйлеріндегі бөлшектердің қозғалысының орналасуының және өзара әсерлесуінің ерекшеліктерін сипаттаңдар.
3. Молекулалардың жылдамдығы қалай анықталғанын айтып беріңдер.

Зерттеңдер

Нәтижесі молекулалық-кинетикалық теорияның негіздемесі болатындай тәжірибені орындаңдар.

Талдаңдар

1. Температура жоғарылаған сайын диффузияның жылдамдығы арта түседі. Осыны түсіндіріңдер.
2. Велосипед шинасына ауа үрлеген кезде сорғы едәуір қызады. Неліктен?

Ойлап табыңдар

Молекулалардың жылдамдығын анықтаудың өз әдістеріңді ұсыныңдар.

Шығарыңдар

1. Перрен тәжірибелерінде броундық бөлшектердің өлшемі 1 мкм болды. Олар диаметрі 10^{-3} см болатын су молекуласынан қанша есе үлкен? *Жауабы: 10^4 есе*
2. Массасы 6 кг мыс кесекте қанша зат мөлшері бар? *Жауабы: 93,75 моль*
3. Ыдыста $5,418 \cdot 10^{25}$ оттегі молекулалары бар. Ыдыста мольмен алғанда қанша зат мөлшері бар? *Жауабы: 900 моль*
4. Азоттың 200 молінің массасы қандай болады? *Жауабы: 5,6 кг*
- *5. Радон ваннасында көлемі 1 дм³ суда $1,8 \cdot 10^6$ радон атомдары бар. Судың қанша молекуласына радонның бір атомы сәйкес келеді? *Жауабы: $1,85 \cdot 10^{22}$*

Рефлексия

1. Оқылған материалдан білгенім...
2. Параграфтағы мені қызықтырған...
3. Мені ... ойландырды.

§ 27. Молекулалардың өзара әсерлесу күштері



Тірек ұғымдар: Ван-дер-Ваальс күштері, бағдарлық күштер, дисперсиялық және индукциялық күштер, потенциалдық шұңқыр, кристалдық тор.

Бүгінгі сабақта: денедегі молекулалардың өзара әсерлесетінін білесіңдер; осы күштердің табиғатымен таныласыңдар; молекулалық-кинетикалық теорияның негізінде қатты дененің, сұйықтың және газдың модельдерін сипаттауды үйренесіңдер; кристалдық, аморфты және полимер денелердің құрылымымен таныласыңдар.

Молекулалардың өзара әсерлесу күштері. Денелердегі молекулалар арасында өзара әсерлесу күштерінің бар екені бізге белгілі. Осындай күштердің бар екенін дәлелдейтін бірқатар деректерді келтірейік. Олар молекулалар арасында бір мезгілде тартылыс күштерінің де, тебілу күштерінің де бар екенін көрсетеді. Екі күш бір мезгілде әсер етсе де, жақын қашықтықтарда тебілу күштері, ал алыс қашықтықтарда тартылу күштері басымырақ. Молекулалардың өзара әсерлесу күштерін нидерланды физигі Й.Д. Ван-дер-Ваальс (1837—1923) зерттеген, сондықтан оларды көбіне *ван-дер-ваальс күштері* деп атайды. Атомдар мен молекулалардың өздері жайлы айтарлықтай ештеңе жоқ болғандықтан, молекулалық күштердің тегі мен сипатын зерттеу өте қиын мәселе еді. XX ғасырдың басында молекула мен атомның көптеген зарядталған бөлшектерден — электрондар мен атом ядроларынан тұратын күрделі жүйе екені белгілі болды. Атом мен молекула тұтастай алғанда электрлік бейтарап күйде болғанмен, олардың арасында біршама электрлік күштер әсер етеді. Атом ішіндегі бөлшектердің өзара қалай әсерлесетінін сипаттау өте қиын. Бұл мәселені атомдық физикада қарастырады. 10-сынып физикасында біз молекулалық күштерді тек сапалық түрде ғана қарастырамыз. Молекулааралық күштердің бірнеше түрлері болады және олардың әрбіреуінің өз ерекшеліктері бар. Мысалы, диполь молекулаларының электрлік күштері дипольдің бағытына тәуелді, сондықтан бұл күштерді *бағдарлық күштер* деп атайды. Бағдарлық күштермен қатар *дисперсиялық және индукциялық күштер* де болады. Аталып өткен тартылыс күштерінің үш түрі де қашықтыққа тәуелді $1/r^7$ пропорционал кемиді.

Тебілу күштеріне мынадай жағдайлар қатысты: 1) олар молекулалар немесе атомдардың арақашықтығы азайғанда өте тез артады; 2) тебілу күштеріне тән жағдай — олардың жеке молекуланың түріне тәуелділігі, мұны ескеру және басқа молекулаларға қолдану өте қиын. Есептеулер көрсеткендей, тебілу күштері молекулалар бір-біріне жақындағанда $1/r^9$ қатынасына пропорционал артады.

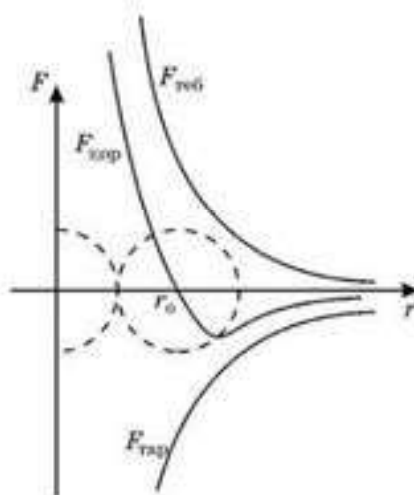
Осы айтылғандарға сүйене отырып, молекулалық күштердің қашықтыққа тәуелділігін жобалап және осы тәуелділіктің графигін беруге болады (27.1-сурет). Графиктен көріп отырғанымыздай, $r > r_0$ үшін

молекулаар арасында тартылыс күштері, $r < r_0$ үшін тебілу күштері басым, ал енді $r = r_0$ кезінде тартылыс және тебілу күштері шамалас. r_0 нүктесінде молекулаардың өзара әсерлесуінің қорытқы күші нөлге тең, ал олардың потенциалдық энергиясының мәні минимал.

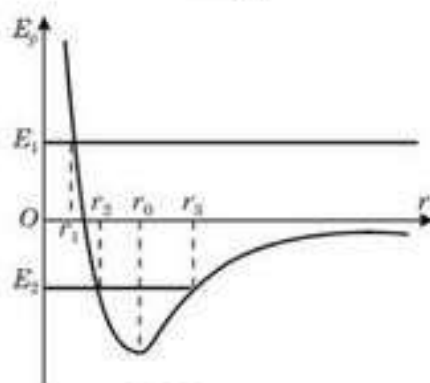
Өзара әсердің потенциалдық энергиясы. r_0 қашықтығы атомдардың орнықты тепе-теңдік қалпына сәйкес келеді (27.2-сурет). Атом r_0 нүктесінің маңайында хаостық тербелістер жасайды. Молекулаардың потенциалдық энергиясының өзі молекулаардың арақашықтығымен анықталады. Олардың арақашықтығы неғұрлым үлкен болса, онда оны потенциалдық шұңқырға тартатын тартылыс күштері соғұрлым көбірек жұмыс атқарады. Сондықтан молекулаардың потенциалдық энергиясы теріс мәнге ие болады. Бір-бірінен шексіз қашықтықта орналасқан молекулаар мен атомдарды өзара әсерлеспейді деуге болады, демек, олардың потенциалдық энергиясы нөлге тең. Ал молекулаар бір-біріне жақындағанда (олардың r арақашықтығы азайған кезде) потенциалдық энергия азаяды, яғни теріс мәнге ие болады. Заттың молекулаары “потенциалдық шұңқырға” түсіп кететін секілді (27.3-сурет). Молекулаар одан әрі қарай жақындаған кезде ($r < r_0$) тез артып отыратын тебілу күштері пайда болады да, потенциалдық энергия қайтадан арта бастайды. Заттың атомдары мен молекулаары r_0 төңірегінде тербелмелі қозғалыстар жасайды. Басқаша айтқанда, потенциалдық энергия-

ның атомдар немесе молекулаар арасындағы қашықтыққа тәуелділік графигі денедегі бөлшектерді сипаттауға, ал денедегі молекулаардың кинетикалық және потенциалдық энергияларының арасындағы қатынас заттың агрегаттық күйін анықтауға мүмкіндік береді. Сондықтан заттың агрегаттық күйлерінің болу-болмауын түсіндіруге болады.

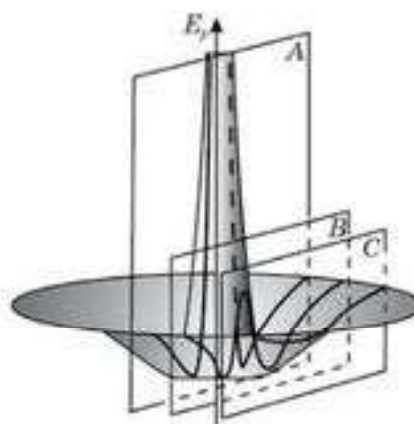
Газ тәрізді, сұйық және қатты денелердің құрылымдары. Зат құрылымының молекулаалық-кинетикалық теориясын пайдаланып, заттың үш агрегаттық күйде болуын түсіндірейік.



27.1-сурет



27.2-сурет



27.3-сурет

Газдар . Газдарда молекулалардың арақашықтықтары сол молекулалардың өлшемінен көп артық болады. Молекулалардың өзара әсерінің потенциалдық энергиясы олардың кинетикалық энергиясынан көп кіші. Сондықтан молекулалар газда барлық көлем бойынша жеңіл орын ауыстыра алады, олар бір-бірімен соқтығысып, өздерінің орын ауыстыру бағыттарын үнемі өзгертіп отырады. Газдарда жақын да, алыс та бейберекеттік орын алады, оларда нағыз хаостық қозғалыс басым. Өздері тұрған ыдыстың қабырғасына соқтығысып, оған өздерінің импульстерін береді. Сондықтан газдың ыдыс қабырғасына түсіретін қысымы пайда болады. *Газ өзінің көлемін де, пішінін де сақтамайды, себебі өте әлсіз өзара әсерлесу күштері оларды бір-бірінің қасында ұстап тұра алмайды* .

Сұйықтар . Сұйықтың молекулалары тығыз орналасады. Оларды көрші молекулалар қысып тұрған секілді. Олармен соқтығысқан молекула өзінің тепе-теңдік күйінің төңірегінде тербелістер жасайды. Сұйықтағы молекулалардың жылулық энергиясы өзара әсерден туатын минимал потенциалдық энергиямен шамалас. Молекулалардың жылулық қозғалысы бұл орналасуды бұзады. Рентген құрылымдық талдау сұйық молекулаларының он-он екіден бірігіп, топ-топ болып орналасатынын көрсетті. Молекулалар арасындағы өзара әсер күштері молекулаларды бір-бірінің қасында ұстап тұрып, жуық тәртіпті қамтамасыз етеді. Кейбір молекула өз тобынан секіріп шығып, басқа топқа барып түсіп, онда да тербелістер жасай алады.

Молекулалардың секірулерінің салдарынан сұйық фазадағы қозғалыс ретсіз болады. Температура жоғарылағанда молекулалардың секіріп кетуі артады да, олардың “отырықшылық өмірінің” уақыты азая түседі. Сұйықтың молекулалары жайлы олар жартылай көшпелі өмір сүреді деуге болады. Сұйықтардағы молекулалық қозғалысты кенес физигі Я.И. Френкель зерттеген.

Сұйықтың молекулалары тығыз орналасқандықтан, оларды сығылмайды деуге болады, міне, сондықтан олар қысым тудырады. Барлық сұйықтар аққыш, яғни олар пішінін сақтамайды, оның есесіне көлемін сақтайды. Сұйық молекулаларының кинетикалық энергиясы олардың потенциалдық энергиясымен шамалас .

Секундына 10 млн кадр беретін жиілікпен суретке түсіргенде сұйықтың *морттық қасиеті* болатыны тағайындалды. Сұйықтың тамшылары қатты бетке түскенде жарықшақтарға айналып быт-шыт болады да, бірден ірі тамшыларға бірігеді.

Қатты денелер . Қатты дене молекулаларының өзара әсерлесу күші соншалықты зор, сондықтан молекулалар *кристалдық тордың түйіндері* деп аталатын белгілі қалыптардың төңірегінде ғана тербеле алады. Сол себепті қатты денелер пішінін де, көлемін де сақтайды.

Қатты дененің молекулалары жуық тәртіпті де, алыс тәртіпті де сақтайды. Қатты денелер кристалдық торлардың әртүрлілігімен ерекшеленеді, себебі молекулалар арасындағы өзара әсерлесу күштері мен денелердегі молекулалардың немесе атомдардың орналасулары да әртүрлі. Кристалдық торлардың мынадай түрлерін атауға болады:

- 1) иондық — оның түйіндерінде оң және теріс иондар;
- 2) атомдық — оның түйіндерінде бейтарап атомдар;
- 3) молекулалық — оның түйіндерінде молекулалар;
- 4) металдық — оның түйіндерінде оң иондар орналасқан.

Егер кристалдың өсуіне кедергі жасамаса, онда атомдардың ішкі орналасуын дұрыс геометриялық монокристалдар құрады. Қатты денелерде молекулалардың кинетикалық энергиясы олардың потенциалдық энергиясынан аз болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Зат молекулаларының өзара әсерлесу күштерінің сипаты қандай?
2. Молекулалар арасындағы тартылыс күштері мен тебілу күштері қашықтыққа тәуелді қалай өзгереді?
3. “Потенциалдық шұңқыр” деп нені түсінесіңдер?
4. Зат молекулалары арасындағы өзара әсерлесу күштерінің қорытқы күші олардың арақашықтығына тәуелді екенін қалай түсіндіруге болады?
5. Заттың газ күйінің молекулалық-кинетикалық теория негізіндегі сипаттамасын беріңдер.
6. Сұйық молекулалары өздерін қалай ұстайды?
7. Заттың қатты күйдегі фазасына сипаттама беріңдер.



Рефлексия

1. Оқылған материалдан білгенім...
2. Параграфтағы мені қызықтырған...
3. Мені ... ойландырды.

§ 28. Термодинамикалық жүйелер және термодинамикалық параметрлер. Термодинамикалық жүйелердің тепе-теңдік және тепе-теңдік емес күйлері



Тірек ұғымдар: макроденелер, микроденелер, термодинамикалық жүйе, термодинамикалық параметрлер, термодинамикалық процесс, газдың қысымы, тепе-теңдік күйі, тепе-теңдік емес күйі.

Бүгінгі сабақта: макрокопиялық денелердің қасиеттерін сипаттайтын негізгі ұғымдармен танысасыздар; термодинамикалық жүйелердің тепе-теңдік және тепе-теңдік емес күйлерін ажыратуды және осы күйлерді сипаттауды үйренесіздер.

Термодинамиканың негізгі ұғымдары зерттелетін жүйенің ішкі құрылымы жөніндегі көзқарастардың көмегімен емес, тәжірибе негізінде енгізілді. Термодинамикада тек макрокоптық шамалар ғана қолданылады: температура, көлем, қысым, дененің ішкі энергиясы және т.б.

Термодинамиканың негізгі ұғымдарының бірі — *термодинамикалық жүйе* ұғымы, яғни макрокоптық параметрлердің сандық сипатын беретін кез келген химиялық құрамдағы және кез келген физикалық денелердің жиынтығы. Егер термодинамикалық жүйе бір күйден (параметрлердің бір жиынтығымен сипатталатын) екінші күйге өтсе, онда термодинамикалық процесс өтті деп есептеледі, яғни *термодинамикалық жүйенің кез келген өзгерісі термодинамикалық процесс* болып табылады, осы процесс кезінде *термодинамикалық параметрлер* өзгереді.

Термодинамикалық параметрлер деп макрокопиялық денелердің (макрожүйенің) күйін сипаттайтын физикалық шамаларды атайды. Оған газдың қысымы, көлемі, температурасы (p, V, T) жатады.

Барлық макроденелер микроденелерден (атомдар мен молекулалардан) тұрады. Микроденелердің де өз сипаттамалары (микропараметрлері) бар. Оларға молекуланың (атомның) V_0 көлемі, молекуланың (атомның) m_0 массасы, молекуланың (атомның) v_0 жылдамдығы, молекулалардың (атомдардың) n_0 концентрациясы жатады. Макроденелерде өтіп жатқан процестердің осы макроденені түзетін микроденелердің параметрлерінің өзгерісінен туатыны анық.

Әрбір физикалық шаманың белгілі бір ақпарат беретінін, яғни оның физикалық мағынасы болатынын еске сала кетейік. Мысалы, макродененің массасы денеде заттың қандай мөлшері бар екенін, көлем дененің кеңістікте қандай орын алатынын білдіреді, газ қысымы газдың бірлік ауданға қандай күшпен әсер ететінін сипаттайды.

Кез келген жүйе температурасы, қысымы, көлемі және т.б. жағынан ерекшеленетін әртүрлі күйлерде бола алады. Макродененің (мак-

рожүйенің) термодинамикалық параметрлері (термопараметрлері) өзгермейтін болса, онда осы дененің белгілі бір күйі жайлы сөз болады. Дене бір күйден екінші күйге өткенде оның термопараметрлері өзгереді.

Мәселен, бізде бір денелер жүйесі болсын делік, онда әртүрлі нүктелердегі күй параметрлері немесе ең болмағанда олардың біреуі, мысалы, температура түрлі мәнге ие болсын. Бұл жағдайда біз бүкіл жүйеге қандай да бір белгілі температураны жаза алмаймыз. Мұндай жүйенің күйін *тепе-теңдік емес күй* деп атайды. Егер осындай жүйені окшаулап, өз еркіне қойсақ, онда температураның теңелу процесі жүреді, одан кейін жылу алмасу процесі тоқтайды — термодинамикалық тепе-теңдік орнайды. *Тепе-теңдік күй* деп жүйенің параметрлері оның барлық бөліктері үшін бірдей белгілі бір мәнге ие болатын күйді айтады.

Макрожүйенің тепе-теңдік емес күйден тепе-теңдік күйге көшу процесі *релаксация* деп, ал мұндай өтуге қажет уақыт аралығы *релаксация уақыты* деп аталады. Әртүрлі процестер үшін релаксация уақыты секундтың үлесінен (газдағы қысым тепе-теңдігінің орнығуы) бірнеше жылдарға дейінгі (қатты қорытпалардағы концентрацияның теңелуі) мәнге ие бола алады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Термодинамикалық жүйе деп нені түсінеді? Ол қандай параметрлер арқылы сипатталады?
2. Термодинамикалық процесс деп нені айтады?
3. Термодинамикалық параметрлер деп нені түсінеді? Оларға не жатады?
4. Жүйенің қандай күйін тепе-теңдік күй деп атайды? Бұл кезде жүйенің параметрлері қандай мәндерге ие болады?
5. Жүйенің қандай күйін тепе-теңдік емес күй деп атайды? Бұл кезде жүйенің параметрлері қандай мәндерге ие болады?
6. Релаксация деп нені айтады?



Рефлексия

1. Оқылған материалдан білгенім...
2. Параграфтағы мені қызықтырған...
3. Мені ... ойландырды.

§ 29. Температура — зат бөлшектерінің жылулық қозғалыстарының орташа кинетикалық энергиясының өлшемі



Тірек ұғымдар: температура, жылулық тепе-теңдік, молекулалардың орташа кинетикалық энергиясы, Больцман тұрақтысы.

Бүгінгі сабақта: молекулалық физикада ерекше орын алатын физикалық шама — температурамен танысасыздар; температура мен молекулалардың ішкі қозғалысының орташа кинетикалық энергиясының байланысын сипаттауды, газдардың молекулалық-кинетикалық теориясының негізгі теңдеуін және газ қысымына арналған формуланы есеп шығару кезінде қолдануды үйренесіздер.

Температура. Молекулалық физикада температура деп аталатын физикалық шаманың алатын орны зор. Алғашқыда температура ұғымы дененің жылулық дәрежесін көрсету үшін енгізілді. Жылудың түрліше дәрежесі денелер жанасқанда өтетін жылу процесі бойынша ажыратылады. Жылуды беріп жатқан дене ыстығырақ болады, демек, оның температурасы жоғарырақ. Жылу алмасу нәтижесінде екі дененің де температуралары теңесіп, жылулық тепе-теңдік орнайды.

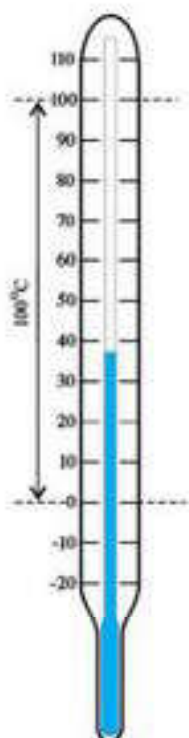
Жылулық тепе-теңдік деп барлық макроскопиялық параметрлер мейлінше ұзақ уақыт бойы өзгермей қалатын кездегі күйді айтады. Бұл жүйеде көлем мен қысым өзгермейді, жылу алмасу болмайды, газдар, сұйықтар және қатты денелер бір-біріне айналмайды және т.с.с. дегенді білдіреді. Атап айтқанда, термометрдегі сынап бағанының көлемі өзгермейді. Демек, жүйенің температурасы тұрақты болып қалады.

Жылулық тепе-теңдік уақыт өтуімен температуралары әртүрлі кез келген денелер арасында орнайды.

Жылулық тепе-теңдік тек екі дененің жанасуы кезінде ғана емес, бірнеше денелер жанасқанда да орнайды. *Жылулық тепе-теңдік кезінде барлық денелердің температуралары бірдей, сондықтан оны жылулық тепе-теңдік күйінің сипаттамасы* деп есептеуге болады. Дененің жылулық тепе-теңдік күйі кезінде температураның барлық нүктелерде бірдей болуы температураны өлшеуге пайдаланылады. Дене мен температураны өлшейтін құралды — термометрді (29.1-сурет) тікелей жанастырсақ, олардың температуралары теңеседі, яғни жылулық тепе-теңдік орнайды.

Денелердің температурасын өлшеуге пайдаланылатын құралды термометр деп атайды.

Термометрдің құрылымында денелерді қыздырғанда немесе салқындатқанда көлемін өзгерту қасиеті қолданылады.



29.1-сурет

Температураның физикалық мағынасының анықтамасына келесі ой-пікірлер негізінде келуге болады. Күнделікті тәжірибелер мен бақылаулар әртүрлі қыздырылған екі дененің жылулық жанасуы кезінде олар өздерінің энергияларымен алмасатынын көрсетеді және осы кезде жанасушы денелердің физикалық параметрлерінің өзгеруі болады.

Неғұрлым қызған дене мен аса қызбаған дененің жанасуы кезінде және бірқатар физикалық параметрлердің өзгеруімен қоса жүретін энергия берілу процесі жылу берілу деп аталады.

Сөйтіп, температура макроскопиялық физикалық параметр ретінде бір денеден екінші денеге жылу берілу мүмкіндігін және жылу берілу бағытын анықтайды. Сонымен бірге температура термодинамикалық тепе-теңдіктегі окшауланған денелер жүйесінің ішкі күйін сипаттайды.

Жылулық тепе-теңдік орнаған кезде термометр дене температурасына тең болатын өз температурасын көрсететінін ескерген жөн.

Физикада теориялық зерттеулер үшін температуралардың *термодинамикалық шкаласы* немесе *абсолют температуралық шкала* деп аталатын шкала пайдаланады. Ең алғаш мұндай шкаланы 1848 жылы ағылшын физигі У. Томсон ұсынды. Бұл шкалада нөлдік нүкте ретінде молекулалардың жылулық қозғалысы тоқтайтын температура алынады. Осы температураны *абсолют нөл* деп атаған. Бұл температураның барлық мүмкін болатын мәндерінің ішіндегі ең төменгісі. Температуралардың абсолюттік шкаласында теріс мәндер жоқ.

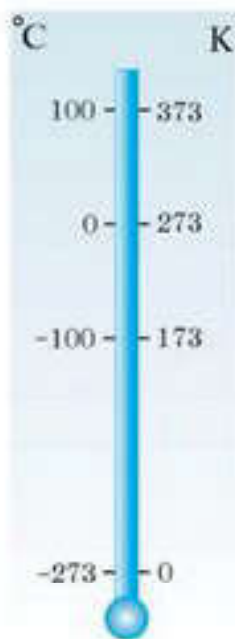
Абсолют нөлге жету мүлдем мүмкін емес, өйткені молекулалардың жылулық ілгерілемелі қозғалысы ешқашан тоқтамайды. Оған тек жақындауға ғана болады. Қазіргі кезде зертханалық жағдайларда абсолют нөлден градусың небәрі бірнеше миллиондық үлесіндей айырмашылығы бар температуралар алынған.

Абсолют температуралық шкаладағы екінші нүкте ретінде су бір мезгілде үш күйде (қатты, сұйық және газ тәрізді) болатын температура алынған. Бұндай күй *үштік нүкте* деген атқа ие болды және ол Цельсий шкаласы бойынша $t = 0,01^{\circ}\text{C}$ температураға сәйкес келеді.

Термодинамикалық шкала бойынша судың үштік нүктесінің температурасы 273,16 бірлікке тең деп алынады. Абсолют температураның бірлігіне бір Кельвинді (1 К) алу келісілген, оның өлшемі бір Цельсий градуска тең: $(1^{\circ}\text{C}) : 1 \text{ K} = 1^{\circ}\text{C}$.

Температуралардың халықаралық шкаласы бойынша үштік нүктенің температурасы $T = 273,16 \text{ K}$, ал Цельсий шкаласы бойынша $t = 0,01^{\circ}\text{C}$ болғандықтан және $1^{\circ}\text{C} = 1 \text{ K}$ екенін ескерсек, онда температуралар арасындағы қатынас мынаған тең болады: $T - t = 273,15^{\circ}$.

Бұдан термодинамикалық (немесе абсолюттік) температура T мен Цельсий шкаласы бойынша өлшенетін температура арасындағы байланысты бейнелейтін формуланы табамыз: $T = (t + 273,15) \text{ K}$ немесе $t = (T - 273,15)^{\circ}\text{C}$.



29.2-сурет

29.2-суретте Цельсий және Кельвин шкалаларының қарапайым салыстырмалы кестесі көрсетілген.

Абсолюттік шкала бойынша нөлдік температура (абсолют нөл) мынаған тең екені түсінікті: $0\text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$.

Денелер молекулалардан тұрады, ал температура денелердің ішкі күйін сипаттайды, демек, температура молекулалар қозғалысымен қандай да бір байланыста деп ұйғаруға болады. Бұл ұйғарымды бірқатар тәжірибелік фактілер де дәлелдейді. Мәселен, сұйықтың температурасы артқан сайын бөлшектердің броундық қозғалысының қарқыны да арта түседі. Сондай-ақ диффузияның жылдамдығының артуы да ортаның температурасының жоғарылауына тәуелді болады.

Енді молекулалардың орташа кинетикалық энергиясы мен газ температурасы арасында қандай байланыс бар екенін айқындайық. Ол үшін мынадай екі процестің сипаттамасын қарастырайық.

1. Егер молекулаларының орташа кинетикалық энергиясы әртүрлі болатын екі газды жанастырсақ, онда ретсіз қозғалыс нәтижесінде молекулалар бір-бірімен соқтығысады. Мұнда газдың кинетикалық энергиясы үлкен молекулалары өз энергиясының бір бөлігін кинетикалық энергиясы неғұрлым аз молекулаларға береді. Бұл энергияның берілу процесі молекулалардың орташа кинетикалық энергиялары теңескенге дейін жалғасады. Онда бейберекет қозғалатын молекулалардың соқтығысуы жалғаса беретініне қарамастан, газдар арасында жылулық тепе-теңдік орнайды.

2. Бірақ температуралары әртүрлі денелер де өздерін осы тәрізді етіп көрсететіні белгілі. Әртүрлі температураларға дейін қыздырылған екі дене жанасқанда энергияның бір денеден екінші денеге берілуі жүзеге асады да, температуралары бірдей болған кезде жылулық тепе-теңдік орнайды.

Жылулық тепе-теңдікке өту процесінің осы екі сипаттамасын салыстыра отырып, келесі қорытындыны жасауға болады: *молекулалардың ілгерілемелі қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы мен температурасы денелердің жылулық тепе-теңдікке өту процесін бірдей сипаттайды: біріншісі — микроскопиялық, екіншісі — макроскопиялық тұрғыдан*. Денелер жанасқанда бұл шамалардың екеуі де теңеседі, яғни денелердің жылулық тепе-теңдігі орнайды. Олай болса, идеал газдың абсолют температурасы мен молекулалардың орташа кинетикалық энергиясы арасында сандық байланыс бар:

$$\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} \sim T. \quad (29.1)$$

Молекулалардың орташа кинетикалық энергиясы \overline{W}_k газдың T абсолют температурасына пропорционал.

(29.1) өрнегіндегі пропорционалдық тәуелділікті теңдік түрінде жазу үшін өлшемдік коэффициент $\frac{3}{2}k$ енгізеді. Сонда

$$\frac{m_0 \overline{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT \text{ немесе } \overline{W}_k = \frac{3}{2}kT.$$

k коэффициентін *Больцман тұрақтысы* деп атайды. Ол температура бір градусқа өзгерген кезде бір молекуланың кинетикалық энергиясы қаншалықты өзгередінін көрсетеді. Әртүрлі әдістердің көмегімен тәжірибелік түрде *Больцман тұрақтысының сандық мәні* анықталды:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Сонымен, дененің абсолют температурасы молекулалар қозғалысының орташа кинетикалық энергиясының өлшемі болып табылады.

Температураның молекулалық-кинетикалық мағынасы осында. Бұл қорытынды идеал газ үшін ғана емес, кез келген күйдегі зат үшін де дұрыс.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Денелердің жылулық немесе термодинамикалық тепе-теңдігі деп нені түсінесіңдер?
2. Ыстық және суық денелердің айырмашылығы неде?
3. Дененің температурасын қалай өлшеуге болады?
4. Бір-бірімен жылулық тепе-теңдік күйдегі газдар үшін қандай шама бірдей болады?
5. Қандай дене термометрлік дене деп аталады?
6. Абсолют температуралық шкаланы құру принципі неде? Абсолют (термодинамикалық) температураның өлшем бірлігі қандай?
7. Қандай температура температураның абсолют нөлі деп аталады?
8. Абсолют температура мен Цельсий шкаласы бойынша температураның арақатынасы қандай?
9. Температура мен газ молекулаларының ілгерілемелі қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы арасында қандай байланыс бар?

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Күнделікті тұрмыста кездесетін денелердегі жылулық тепе-теңдіктің орнауының мысалдарын қарастырыңдар.

Түсіндіріңдер

1. Дененің температурасын өлшеңдер және сынапты термометрдің жұмыс істеу принципін түсіндіріңдер.
2. Бір немесе бірнеше молекуланың температурасы жөнінде не айтуға болады? Түсіндіріңдер.
3. Абсолют температура шкаласынан Цельсий шкаласының айырмашылығы неде? Олардың ұқсастығы неде?

Зерттеңдер

Физика анықтамалығын пайдаланып, сынапты және спиртті термометрлерді қолдануға болатын температура интервалдарын анықтаңдар.

Талдаңдар

1. Жылулық тепе-теңдік күйлерінің айрықша белгілері қандай?
2. Мына температураларды Кельвин шкаласы арқылы өрнектеңдер: 27°C ; -175°C ; 100°C ; 0°C . Есептеулеріңді келтіріңдер.
3. Мына температураларды Цельсий шкаласы арқылы өрнектеңдер: 4 K ; 180 K ; 310 K ; 420 K . Есептеулеріңді келтіріңдер.

Ойлап табыңдар

Температура мен газ молекулаларының ілгерілемелі қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы арасындағы байланысты анықтауға арналған практикалық есеп ойластырыңдар.

Шығарыңдар

1. Егер абсолют температурасын 30% азайтса, онда неон атомының орташа кинетикалық энергиясы қанша есе өзгереді? *Жауабы: 1,43 есе кемиді*
2. 47°C температурадағы 10^5 гелий атомдарының кинетикалық энергиясын табыңдар. *Жауабы: $6,62 \cdot 10^{-16}$ Дж*
3. 27°C температурада гелий молекулаларының жылулық қозғалысының кинетикалық энергиясы 10 Дж. Гелийдің молекулалар санын анықтаңдар. *Жауабы: $1,6 \cdot 10^{21}$*
4. Қайсыбір газдың 296 K температурадағы орташа квадраттық жылдамдығы 480 м/с. Осы газдың 10 г массасында қанша молекула бар? *Жауабы: $1,88 \cdot 10^{25}$*

Рефлексия

1. Оқылған материалдан білгенім...
2. Параграфтағы мені қызықтырған...
3. Мені ... ойландырды.

§ 30. Идеал газ. Газдардың молекулалық-кинетикалық теориясының негізгі теңдеуі



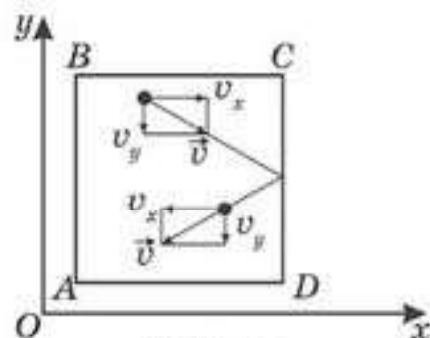
Тірек ұғымдар: идеал газ, молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуі, Авогадро заңы.

Бүгінгі сабақта: газдардың молекулалық-кинетикалық теориясының негізгі теңдеуімен танысасыздар және осы теңдеуді есептер шығару кезінде қолдануды үйренесіздер.

Макроәлем мен микроәлемнің арасындағы сандық байланысты табу үшін мәселені барынша ықшамдауымыз керек. Әртүрлі газдардың молекулалары бір-бірінен өлшемдері мен массалары және түрліше қосылыстары бойынша, сонымен қатар әртүрлі газдар молекулаларының арасындағы өзара әсерлесу күштерімен ерекшеленеді. Егер осы факторлардың барлығын ескерсек, онда мәселе қиындай түседі. Сондықтан есептеулерді жеңілдету үшін молекулалық-кинетикалық теорияда нақты газдардың қарапайым физикалық моделі — *идеал газ* енгізілген. Мұндай газ жоқ, бірақ ол бізге макроәлем және микроәлемдер арасындағы байланысты тағайындау үшін қажет, сонымен қатар идеал газ нақты газға неғұрлым тән қасиеттерді бейнелеуі тиіс.

Идеал газ дегеніміз — молекулалары шексіз аз көлем алатын серпімді шарлар болып табылатын және өзара әсерлесуі тек олардың бір-бірімен тікелей немесе ыдыстың қабырғасымен соқтығысуы кезінде ғана білінетін газ. Соқтығысулар аралығында молекулалар инерциямен қозғалады. Молекулалардың бір-бірімен және өзі тұрған ыдыстың қабырғаларымен соқтығысулары серпімді соқтығысу заңдары бойынша есептеледі.

Макродененің күйі мен ондағы микробөлшектердің қасиеттерінің арасындағы байланысты газдың өзі тұрған ыдыстың қабырғаларына түсіретін орташа қысымын есептеу арқылы тағайындау тиімді. $ABCD$ ыдыста Ox координата осіне перпендикуляр, ауданы S қабырғаны бөліп алайық (30.1-сурет). Қабырғаға қарай жылдамдықпен ұшып келе жатқан массасы m_0 әрбір молекуланың $m_0 v_x$ импульсі бар. Соқтығысу абсолют серпімді болатындықтан, импульс қарама-қарсы таңбаға өзгереді, демек, молекулалардың импульсінің өзгерісі $2m_0 v_x$ болады. Модулі бойынша дәл осындай $2m_0 v_x$ импульсті молекула қабырғаға да береді. Молекулалар көп, олардың әрбіреуі соқтығысу кезінде қабырғаға осындай импульс беріп отырады. t уақыт ішінде молекулалар қабырғаға $2m_0 v_x z t$ импульс береді, мұндағы z — барлық молекулалардың осы уақыт аралығындағы қабырғамен соқтығысу саны. Соқтығысу саны молекулалардың



30.1-сурет

концентрациясына пропорционал $n = \frac{N}{V}$. Сонымен қатар соқтығысу саны z молекулалардың жылдамдығына да пропорционал. Негұрлым жылдамдық үлкен болса, молекулалардың қабырғамен соқтығысу саны соғұрлым көбірек, яғни соқтығысулар саны қабырға бетінің S ауданына да пропорционал. Орташа есеппен алғанда, барлық молекулалардың тек жартысы ғана осы қабырғаға қарай қозғалатынын да ескеру керек. Ал молекулалардың екінші жартысы одан кері бағытта қозғалады. Сондықтан $z = \frac{1}{2}nv_x S$ және t уақыт ішінде қабырғаға берілген толық импульс $2m_0v_x z t = m_0 n v_x^2 S t$ болады. Ньютонның екінші заңы бойынша күш импульсі дене импульсінің өзгерісіне тең, яғни $Ft = m_0 n v_x^2 S t$. Барлық молекулалардың v_x жылдамдыққа ие болмайтынын да ескеру керек, шындығында, қабырғаға әсер ететін орташа күш \bar{v}_x^2 пропорционал емес, ол жылдамдықтың орташа квадратына пропорционал болады. Сонда $F = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2 S$. Газдың ыдыс қабырғасына түсіретін қысымы $p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2$.

$$p = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2, \quad (30.1)$$

немесе

$$p = \frac{1}{3}\rho\bar{v}^2 \quad (30.2)$$

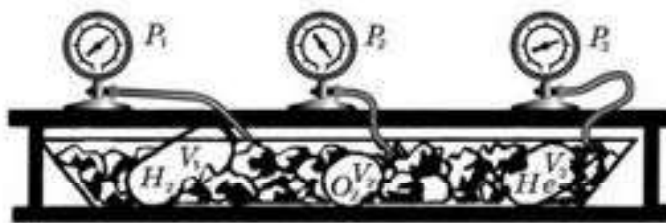
теңдеуі молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуі деп аталады. Оны бұлай атау себебі: 1) ол макро- және микроәлемдерді байланыстырып тұр; 2) тәжірибе арқылы алынған барлық газ заңдарын теориялық жолмен алуға мүмкіндік береді; 3) ол микроәлемде өтіп жатқан процестер жайлы ақпарат береді.

Негізгі теңдеуді былай да жазуға болады:

$$p = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2 \frac{2}{2} = \frac{2}{3}n \frac{m_0\bar{v}^2}{2} = \frac{2}{3}n\bar{W}_{к0}. \quad (30.3)$$

Осыдан идеал газ қысымының бірлік көлемдегі молекулалардың ілгерілемелі қозғалысының орташа кинетикалық энергиясына, яғни кинетикалық энергияның тығыздығына пропорционал екені шығады.

Молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуінің тағы бір түрін алу үшін тәжірибеге жүгінейік. Түрліше газдармен, мысалы, сутек, гелий және оттегі толтырылған бірнеше ыдысты алайық. Ыдыстардың белгілі көлемдері бар және манометрлермен жабдықталған, олардың көмегімен ыдыстағы газдың қысымын бақылап отыруға болады. Ыдыстағы газдардың массалары, демек, ондағы молекулалар саны да белгілі. Газдарды жылулық тепе-теңдікке келтіреміз. Бұл үшін



30.2-сурет

ыдыстарды еріп жатқан мұзға орналастырамыз да, манометрлердің көрсетулерінің тоқтауын күтеміз (30.2-сурет). Осыдан кейін барлық газдардың температурасы 0°C деп айта аламыз. Газдардың қысымы p , олардың көлемі V және молекулалар саны N әртүрлі.

Сутек үшін $\frac{pV}{N}$ қатынасын табамыз. Егер 1 моль сутек 0.1 м^3 көлем алса, онда 0°C температура кезінде сутектің қысымы 22.65 кПа болып шығады. Осыдан

$$\frac{pV}{N_A} = \frac{22.35 \cdot 10^3 \cdot 0.1 \text{ Н} \cdot \text{м}^3}{6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 3.76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж.}$$

Есептеулер басқа газдар үшін де $\frac{pV}{N}$ қатынасының мәні дәл осындай болатынын көрсетеді. Осы шаманы $\theta_0 = \frac{pV}{N}$ деп белгілейік. Енді осы газы бар ыдыстарды қалыпты атмосфералық қысымда қайнап тұрған суға қоямыз. $\frac{pV}{N}$ шамасы тағы да барлық газдар үшін бірдей:

$$\theta_{100} = \frac{pV}{N} = 5.14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж.}$$

θ шамасы *энергетикалық температура* деп аталады. Ол джоульмен өлшенеді. Біз температураны градуспен өлшеуге үйренгенбіз. Сондықтан энергетикалық температура және градуспен өлшенетін температура өзара тікелей байланысты: $\theta = kT$, мұндағы k — пропорционалдық коэффициент. Осы коэффициенттің сан мәнін есептеп шығарайық:

$$\theta_{100} - \theta_0 = k(T_2 - T_1), \text{ мұндағы } T_2 = 373 \text{ К, ал } T_1 = 273 \text{ К. Осыдан}$$

$$k = \frac{\theta_{100} - \theta_0}{T_2 - T_1} = \frac{5.14 - 3.76}{100} \cdot 10^{-21} \text{ Дж/К} = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ коэффициенті Больцман тұрақтысы деп аталады. *Больцман тұрақтысы энергетикалық температураны Кельвинмен өлшенетін абсолют температурамен байланыстырады*. Ол молекулалық-кинетикалық теориядағы аса маңызды тұрақты шама.

Енді молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуін қарастырайық:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{W}_{k_0} = \frac{2}{3} \frac{N \overline{W}_{k_0}}{V},$$

мұндағы $\overline{W}_{к_0}$ — идеал газ молекуласының ілгерілемелі қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы. Осыдан $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3}\overline{W}_{к_0}$. Осыған дейін $\frac{pV}{N} = kT$ деп алғанбыз. Көріп отырғанымыздай, бұл теңдеулердің сол жақтары өзара тең, демек, олардың оң жақтары да өзара тең болады. Сонда

$$\overline{W}_{к_0} = \frac{3}{2}kT. \quad (30.4)$$

Соңғы формула газ молекулаларының хаосты қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы абсолют температураға пропорционал екенін көрсетеді. Идеал газ молекулаларының ілгерілемелі қозғалысының орташа кинетикалық энергиясының осы мәнін молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуіне қойып,

$$p = \frac{2}{3}n\overline{W}_{к_0} = \frac{2}{3}n\frac{3}{2}kT = nkT \quad (30.5)$$

аламыз. Бұл молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуінің жазылуының тағы бір түрі.

$$p = nkT = \frac{N}{V}kT$$

теңдеуінен бірдей температура мен қысым кезінде газдың тең көлемдеріндегі молекулалар саны бірдей болатыны шығады. Бұл — Авогадро заңы.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Идеал газ ұғымы қандай мақсатпен енгізілген? Идеал газ моделін сипаттаңдар.
2. Молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуін қорытып шығарыңдар.
3. Энергетикалық температура деп нені айтады?
4. Молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуінің жазылуының үш түрін атаңдар.
5. Молекулалардың хаосты қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы жүйенің температурасымен қалай байланысқан?

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Су тамшысының массасы 1 нг. Ол қанша молекуладан тұрады?

Шешуі. Тамшыдағы молекулалар санын $N = \nu N_A$ формуласы бойынша табамыз, мұндағы $\nu = \frac{m}{M}$ — зат мөлшері, N_A — Авогадро саны, M — судың молярлық массасы, онда

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{10^{-12} \text{ кг} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} = 3,3 \cdot 10^3 \text{ молекула.}$$

Жауабы : $3,3 \cdot 10^3$ молекула

2-есеп. Белгісіз газдың тығыздығы $\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$. $V = 0,1 \text{ м}^3$ көлемде осы газдың $N = 2,7 \cdot 10^{24}$ молекуласы бар. Бұл қай газ? Оның молярлық массасын анықтаңдар.

Шешуі. Газдың массасын мына екі формуланы пайдаланып табуға болады: $m = \rho V$ және $m = m_0 N$, мұндағы $m_0 = \frac{m}{N_A}$ — газ молекуласының

массасы. Онда $\rho V = \frac{m}{N_A} \cdot N$ және бұдан $m = \frac{\rho V \cdot N_A}{N}$,

$$m = \frac{0,09 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,1 \text{ м}^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}}{2,7 \cdot 10^{24}} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Бұл — H_2 сутек.

Жауабы : $2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, сутек

3-есеп. Заманауи вакуумдық сорғылар қысымды $p = 10^{-12} \text{ мм.сын. бағ. дейінгі}$ қысымға дейін төмендете алады. Осы қысымдағы және $t = 48^\circ\text{C}$ температурадағы $V = 1 \text{ см}^3$ көлемде газдың қанша молекуласы бар?

Шешуі. Идеал газдың молекулалық-кинетикалық теориясының негізгі теңдеуіне сәйкес идеал газдың қысымы $p = nkT$, мұндағы $n = \frac{N}{V}$ — молекулалардың концентрациясы, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ — Больцман тұрақтысы, $T = (t + 273) \text{ К}$ — газдың абсолют температурасы.

$$\text{Онда } p = \frac{N}{V} kT. \text{ Бұдан } N = \frac{pV}{kT} \cdot N = \frac{10^{-12} \cdot 133 \text{ Па} \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 321 \text{ К}} \approx 30000.$$

Жауабы : 30 000 молекула

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

1. Молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуін шығарған кезде молекулалардың соқтығысуларын ескеру неліктен соңғы нәтижеге әсер етпейтінін түсіндіріңдер.
2. Больцман тұрақтысының физикалық мағынасы қандай?
3. Молекулалық-кинетикалық теорияның теңдеуі неліктен негізгі теңдеу деп аталады?

Зерттеңдер

Молекулаларының концентрациясы бірдей және олардың қозғалысының орташа жылдамдықтарының квадраты тең болғандағы оттегі мен сутек элементтерінің қысымдарын салыстырыңдар.

Талдаңдар

1. Авогадро заңын тұжырымдаңдар.
2. Идеал газ үшін молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуін қорытып шығару кезінде қандай болжамдар пайдаланылды?

Шығарыңдар

1. Егер ыдыстың қабырғасы 20°C температурада 1568 Н/см^2 қысымға шыдайтын болса, массасы $6,4 \text{ кг}$ оттегі газы бар баллонның ең кіші көлемі қандай болу керек?

Жауабы: 31 л

2. Тұрақты 10^5 Па қысымдағы оттектің тығыздығы сутектің тығыздығындай болу үшін температурасы $T_2 = 200 \text{ К}$, ал қысымы сондай сутекті қандай T_1 температураға дейін қыздыру керек?

Жауабы: 3200 К

3. Көміртек оттегімен қоспасының газ күйіндегі массасы $m = 1 \text{ г}$, температурасы 27°C және $5,6 \cdot 10^4 \text{ Па}$ қысымда 1 дм^3 көлем алады. Осы қоспаның формуласын жазыңдар.

Жауабы: CO_2

Рефлексия

1. Оқылған материалдан білгенім...
2. Параграфтағы мені қызықтырған...
3. Мені ... ойландырды.



Молекулалық-кинетикалық теория — молекулалық физиканың жылулық құбылыстарды заттың ішкі құрылымын ескере отырып зерттейтін бөлімі.

Молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі қағидалары :

- 1) барлық денелер микробөлшектерден тұрады;
- 2) денені құрайтын микробөлшектер үздіксіз және хаосты қозғалыста болады;
- 3) денені құрайтын микробөлшектер өзара әсерлеседі. Бұл әсердің тегі электромагниттік болып табылады.

Бұл қағидалардың тәжірибелік дәлелдемесі бар, мысалы, диффузия, броундық қозғалыс.

Кез келген макроскопиялық дене термопараметрлер арқылы сипатталады. **Термодинамикалық параметрлер** деп макроскоптық денелердің (макрожүйенің) күйін сипаттайтын физикалық шамаларды атайды. Оларға газдың қысымы, көлемі, температурасы жатады.

Температура термодинамикалық тепе-теңдіктегі окшауланған денелер жүйесінің ішкі күйін сипаттайды. Жылу алмасу нәтижесінде екі дененің температуралары бірдей болады, яғни **жылулық тепе-теңдік** орнайды.

Дене температурасы неғұрлым жоғары болса, оның молекулалары соғұрлым шапшаңырақ қозғалады және олардың кинетикалық энергиясы да үлкен болады. Бұл температура сияқты молекулалар қозғалысының кинетикалық энергиясын да молекулалардың жылулық қозғалысының өлшемі ретінде қарастыруға болатынын білдіреді.

Есептеулерді жеңілдету үшін молекулалық-кинетикалық теорияда нақты газдардың қарапайым физикалық моделі — **идеал газ** енгізілген. **Идеал газ** дегеніміз — молекулалары шексіз аз көлем алатын серпімді шарлар болып табылатын және өзара әсерлесуі тек олардың бір-бірімен тікелей немесе ыдыстың қабырғасымен соқтығысуы кезінде ғана білінетін газ.

Макроскопиялық денедегі микробөлшектердің қозғалысы макродененің күйін анықтайды. Микроәлем мен макроәлемнің арасындағы байланысты молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуі арқылы көрсетуге болады: $p = \frac{1}{3} n m_0 v_0^2$ немесе $p = \frac{2}{3} n W_x$, немесе $p = nkT$.

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT$$

теңдеуінен **бірдей температура мен қысым кезінде газдың тең көлемдеріндегі молекулалар саны бірдей болатыны шығады.** Бұл — **Авогадро заңы**.

7-тарау. ГАЗ ЗАҢДАРЫ

§ 31. Идеал газ күйінің теңдеуі



Тірек ұғымдар: идеал газ күйінің теңдеуі, универсал газ тұрақтысы.

Бүгінгі сабақта: универсал газ тұрақтысының физикалық мағынасымен таныса-сындар; идеал газ күйінің теңдеуін есептер шығару кезінде қолдануды үйренесіңдер.

Идеал газ күйінің теңдеуі. Газдың қандай күйде тұрғанын білу үшін оның термодинамикалық параметрлерін, яғни p қысымды, T температураны, V көлемді білу қажет. Термопараметрлердің біреуінің өзгерісі оның басқа параметрлерінің өзгеруіне әкеп соғады. *Термодинамикалық параметрлерді байланыстыратын теңдеу газ күйінің теңдеуі* деп аталады. Осы теңдеуді молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуін пайдалана отырып шығарып көрейік.

Бізге $p = nkT$ екені белгілі. Газ молекулаларының концентрациясын $n = \frac{N}{V}$ ескеріп, $p = \frac{N}{V}kT$ аламыз. Осыдан $pV = NkT$ шығады. Газ молекулаларының санын газдың зат мөлшері арқылы табамыз: $N = \nu N_A = \frac{m}{M}N_A$. Осыны ескерсек, $pV = \frac{m}{M}N_AkT$.

Авогадро саны және Больцман тұрақтысының көбейтіндісіне тең тұрақты шаманы *универсал газ тұрақтысы* деп атайды:

$$R = kN_A. \quad (31.1)$$

$$R = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}.$$

Универсал газ тұрақтысы дегеніміз — заттың 1 мөлінің температурасын 1 К арттыру үшін оған қанша жылу мөлшерін беру қажет екенін көрсететін физикалық шама.

Осы айтылғандарды ескерсек, онда идеал газ үшін мына теңдеу орындалады:

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (31.2)$$

Бұл *идеал газ күйінің теңдеуі* деп аталады. Осы түрде бұл теңдеуді тұңғыш рет орыс ғалымы Д.И. Менделеев алған, сондықтан ол *Менделеев—Клапейрон теңдеуі* деп аталады. 10 жылдай Ресейде қызмет еткен, француз физигі, Б.П. Клапейрон идеал газ күйінің теңдеуін Менделеевтен бұрын (1834 ж.) ашқан. Идеал газ күйінің теңдеуі — физикадағы алғашқы тамаша жалпылау теңдеуі. Ол тәжірибеде тағайындалған бірқатар газ заңдарын жалпылайды. Қандай затты алғанымызға тәуелсіз болатын жалпыланған заңдарды ашу — физика ғылымының мақсаты.

Егер Менделеев—Клапейрон теңдеуін $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M}R$ түрінде жазсақ, онда теңдіктің оң жағында газдың мольдік массасына ғана тәуелді болатын тұрақты шама тұрады. Сонда

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad (31.3)$$

деп жазуға болады. Клапейрон идеал газ күйінің теңдеуін дәл осындай түрде алған.

Егер күй теңдеуін қалыпты жағдайдағы идеал газдың бір моли үшін жазатын болсақ, яғни қысым $p = 101325$ Па және температура $T = 273$ К болған кезде газ $V = 22,4$ л/моль көлемді қабылдайды.

Онда $\frac{pV}{T} = \frac{101325 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3}{273 \text{ К} \cdot \text{моль}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ — универсал газ тұрақтысын аламыз.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай теңдеу идеал газ күйінің теңдеуі деп аталады?
2. Идеал газ күйінің теңдеуін қалай алуға болады?
3. Неліктен газ тұрақтысы универсал тұрақты деп аталады?
4. Идеал газ күйі теңдеуін нақты газдардың қасиеттерін сипаттау үшін қолдануға болатынын қалай анықтауға болады?
5. Менделеев—Клапейрон теңдеуін қорытып шығарындар.

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Физика кабинетінің өлшемдерін анықтаңдар. Кабинеттегі ауаның 27°C температурадағы және қалыпты атмосфералық қысымдағы массасын табыңдар.

Түсіндіріңдер

1. Неліктен қысымдары бірдей болған кезде ыстық ауа суық ауадан жеңіл болады?
2. Суқоймасының түбінен көпіршіктер көтеріледі. Көпіршікті судың ішінен итеріп шығаратын күш судың тереңдігіне байланысты қалай өзгереді?

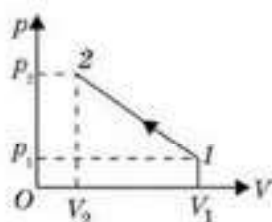
Зерттеңдер

Кез келген идеал газдың бір молінің көлемі қалыпты жағдайларда $2,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ тең болатынын дәлелдендер.

Шығарыңдар

1. Идеал газ күйінің теңдеуін пайдаланып, төмендегі кестеде келтірілген төрт параметр бойынша, бесінші белгісіз параметрді анықтаңдар.

m , кг	M , кг/моль	p , Па	V , м ³	T , К
8	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^5$	16,6	x_1
$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^3$	x_2	200
64	$32 \cdot 10^{-3}$	x_3	24,9	300
7	x_4	10^5	8,3	400
x_5	$44 \cdot 10^{-3}$	10^7	$2,49 \cdot 10^{-2}$	300



31.1-сурет

2. Массасы 20 г гелий көлемі 32 л, қысымы $4,1 \cdot 10^5$ Па болатын 1-күйден өте баяу түрде көлемі $V_2 = 9$ л, қысымы $p_2 = 15,5 \cdot 10^5$ Па тең 2-күйге өтеді (31.1-сурет). Осы процесс кезінде газ қандай ең үлкен температураға дейін қызады?

Жауабы: 484 К

3. Гелий мен аргоннан тұратын қоспаның қысымы $p = 150$ кПа және $t = 27^{\circ}\text{C}$ температура кезіндегі тығыздығы $\rho = 2$ кг/м³. Көлемі $V = 1$ см³ газ қоспасында қанша гелий атомдары бар?

Жауабы: $6,8 \cdot 10^{18}$ см⁻³

Рефлексия

1. Сабақта қандай жаңа ақпарат алдыңдар?
2. Нені есте сақтау керек деп ойлайсыңдар?
3. Материалдың барлығы түсінікті ме?

§ 32. Изопроцестер. Изопроцестердің графиктері. Дальтон заңы



Тірек ұғымдар: изопроцестер, изотермиялық процесс, термостат, Бойль—Мариотт заңы, идеал газдың изотермасы, изобаралық процесс, Гей—Люссак заңы, изохоралық процесс, Шарль заңы, Дальтон заңы, парциал қысым.

Бүгінгі сабақта: изотермиялық, изобаралық және изохоралық процестермен таныса-сындар; температура тұрақты болғанда газ қысымының көлемге тәуелділігі (Бойль—Мариотт заңы) зерттеуді; қысым тұрақты болғанда газ көлемінің температураға тәуелділігі (Гей—Люссак заңы) зерттеуді; көлем тұрақты болғанда газ қысымының температураға тәуелділігі (Шарль заңы) зерттеуді; газ заңдарын сандық және графикалық есептер шығару кезінде қолдануды үйренесіңдер.

Изопроцестер. Газдарда өтіп жататын көптеген процестердің ішінен газдың берілген массасы үшін қандай да бір термопараметрдің тұрақты болып қалатын кезіндегі процестер қызықтырақ. Мәселен, тұрақты температура кезінде өтетін процесс *изотермалық* (грекше *isos* — бірдей және *therme* — жылу), ал тұрақты қысым кезінде өтетін процесс *изобаралық* (грекше *isos* — бірдей, *baros* — ауырлық, салмақ) деп аталады. Егер көлем тұрақты болса, онда процесс *изохоралық* деп аталады (грекше *isos* — бірдей және *chora* — көлем). Барлық газ заңдары Менделеев—Клапейрон теңдеуінен жеңіл алынады.

Изотермалық процесс. Изопроцестердің ішінен бірінші болып осы изотермалық процесс зерттелді. Ағылшын физигі Р. Бойль 1662 жылы және оған тәуелсіз француз физигі Э. Мариотт тәжірибе жүзінде *тұрақты температура кезінде газдың берілген массасы үшін оның қысымының газ алып тұрған көлемге көбейтіндісі тұрақты шамаға тең болатынын* тағайындады, яғни $pV = \text{const}$. Бұл заң *Бойль—Мариотт заңы* деп аталады. Теориялық жолмен Бойль—Мариотт заңын Менделеев—Клапейрон теңдеуін газдың екі күйі үшін жазып, жеңіл алуға болады. Берілген газдың бірінші күйі $p_1V_1 = \frac{m}{N}RT$, екінші күйі $p_2V_2 = \frac{m}{N}RT$. Бұл теңдеулердің оң жақтары тең, демек, олардың сол жақтары да тең, яғни

$$p_1V_1 = p_2V_2. \quad (32.1)$$

Практикада изотермалық процесті іске асыру үшін зерттелетін газдың массасы өте үлкен, ал температурасы өзгеріссіз қалатын қоршаған ортамен жақсы жылулық байланыста болуы тиіс. Мұндай орта *термостат* деп аталады. Бойль—Мариотт заңын Мельде түтігінің көмегімен анықтауға болады (бір жағы жабық шыны түтік, онда сыртқы ауадан сынап бағанымен бөлінген ауа бар). Түтіктің қалпын өзгерте отырып, біз ауа бағанының көлемі мен қысымын өзгертеміз, ал оны сызғыш пен манометрдің көмегімен өлшейміз. Қысымның көлемге

көбейтіндісі барлық уақытта тұрақты болып қалады. Бойль—Мариотт заңы қысымдар мен температуралардың кең диапазонында орындалады. Тек өте жоғары қысымдар (жүздеген атмосфераларға жететін) кезінде ғана біршама ауытқулар болады.

Бойль—Мариотт заңы бойынша газдың берілген массасының қысымы изотермалық процесс кезінде көлемнен кері пропорционал тәуелділікте болады, яғни гиперболалық тәуелділікті аламыз. Осы тәуелділікті график түрінде pV координата жүйесінде көрсетейік (32.1-сурет). Алынған қисық *идеал газдың изотермасы* деп аталады. Өртүрлі температуралар үшін газ қысымының көлемге тәуелділік сипатында өзгеріс болмайды, тек температура жоғарылаған кезде қисықтар координаталар осьтерінен қашықтай береді. Бұл жерде біз изотермалар аясына келеміз.

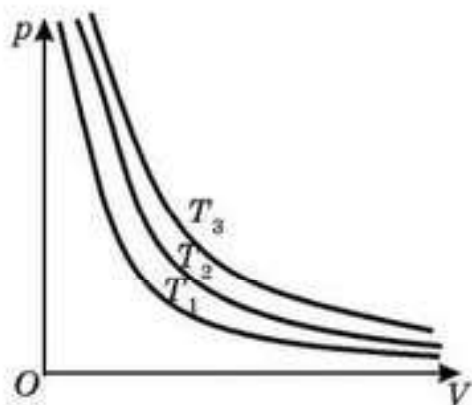
Изотермалық процестерді график түрінде басқа координаталар жүйесінде өрнектеуге болады (32.2-сурет).

Изобаралық процесс. Француз физигі Гей—Люссак 1802 жылы тәжірибе жүзінде тұрақты қысымда газдың берілген массасы көлемінің температураға сызықты тәуелді болатынын тағайындады, яғни

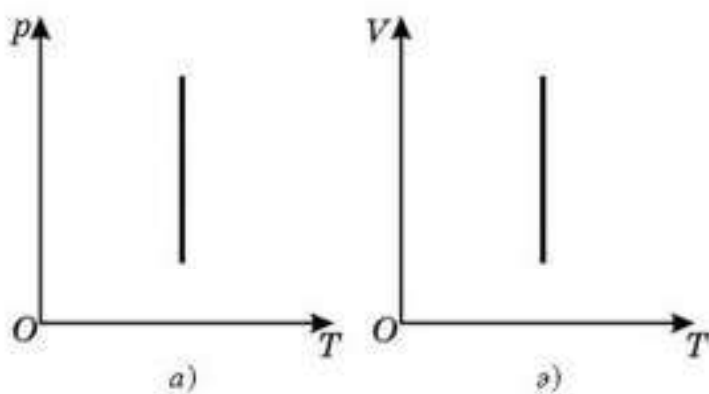
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (32.2)$$

Бұл заң *Гей—Люссак заңы* деп аталады. Оны да теориялық жолмен, Менделеев—Клапейрон тендеуін газдың түрліше екі күйіне қолдана отырып шығарып алуға болады. $pV_1 = \frac{m}{M}RT_1$ — бірінші күй және $pV_2 = \frac{m}{M}RT_2$ — екінші күй.

Бірінші тендеуді екінші тендеуге бөліп, $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ аламыз. Гей—Люссактың өзі заңды $V = V_0(1 + \alpha_V t)$ түрінде алды, мұндағы α_V — көлемдік ұлғаюдың температуралық коэффициенті. Тәжірибелер көрсеткендей, тығыздық аз болғанда бұл коэффициент барлық газдар үшін мынаған тең: $\alpha_V \approx \frac{1}{273} \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

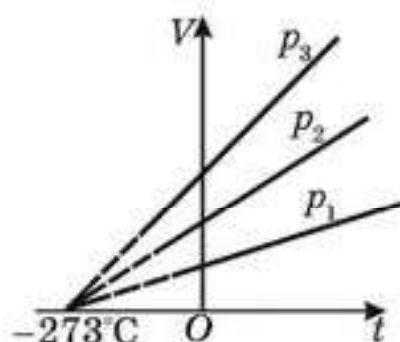


32.1-сурет



32.2-сурет

Идеал газ көлемінің температураға тәуелділігі изобаралық процесс кезінде анық болатындықтан, бұл процестің Vt координаталарындағы графигі *изобара* деп аталатын түзуді береді. 32.3-суретте изобаралар аясы келтірілген, изобараның көлбеулік бұрышы азырақ болған сайын процестегі қысым соғұрлым жоғары, бірақ барлық изобаралар температурасы -273°C болатын нүктеден басталады.



32.3-сурет

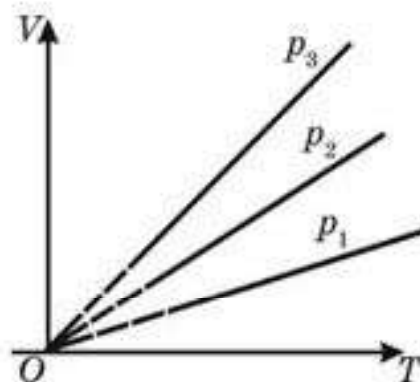
Графиктік тәуелділікті VT координаталар жүйесінде өрнектеген ыңғайлы (32.4-сурет). Бұл координаталардағы барлық изобаралар температуралардың абсолют нөлінен басталады.

Изохоралық процесс. Бұл процесті француз физигі Ж. Шарль зерттеген. 1787 жылы ол тәжірибе жүзінде тұрақты көлемде берілген газ массасының қысымы оның температурасына тура пропорционал болатынын тағайындады, яғни

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (32.3)$$

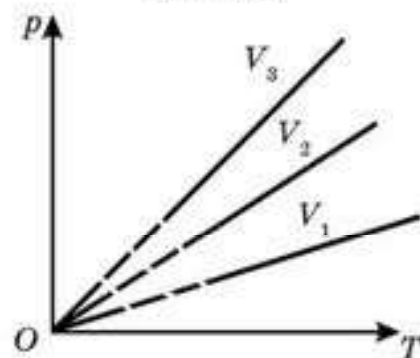
Бұл — *Шарль заңы*. Шарль өзінің заңын Гей—Люссактан ерте ашты, бірақ кеш жариялады. Шарль заңын да Менделеев—Клапейрон теңдеуін пайдалана отырып алуға болатыны анық. (Мұны өздерін орындап көріңдер.)

Изохоралық процесс кезіндегі газ қысымы мен температурасының арасындағы тәуелділік сызықты болып табылады. pT координаталарында бұл түзу *изохора* деп аталады. 32.5-суретте изохоралар тобы келтірілген, изохоралардың көлбеулігі неғұрлым аз болса, соғұрлым газдың көлемі үлкен болады.



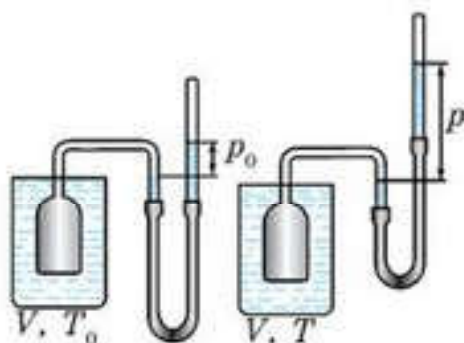
32.4-сурет

Шарль заңының негізінде ең дәл термометрлердің бірі — газ термометрі жұмыс істейді, ол азот, аргон немесе гелий толтырылған ыдыс. Ыдысқа майысқақ түтіктің көмегімен сынап манометрі қосылған, ол газдың қысымын өлшейді және газ көлемін тұрақты етіп ұстап отырады (32.6-сурет). Манометрдің көрсетуі бойынша газдың температурасын білуге болады. Газ термометрін көбіне басқа қарапайым термометрлерді градуирлеу үшін пайдаланады.



32.5-сурет

Біз үш түрлі изопроцестің өтуін қарастырдық, олардың графиктерін салдық және қолданылу шекарасын анықтадық.



32.6-сурет

Дальтон заңы. Осы үш заңмен қатар тағы да маңызды бір заңды атап өту керек. Оны ағылшын физигі әрі химигі Дж. Дальтон (1766—1844) ашқан. Бұл заң туралы біз ілгеріде айтып өткен болатынбыз. Енді оған толығырақ тоқталайық.

1801 жылы ашылған Дальтон заңы газ қоспасының қысымын және қоспаның жеке компоненттерінің жалпы қысымға беретін нақты “үлесін” анықтайды. Өмірде біз таза газды емес, газ қоспасын кездестіреміз.

Мысалы, ауа азоттан, оттектен, көмірқышқыл газынан және басқа да көптеген газдардың қоспасынан тұрады. Дальтон осындай газ қоспасының қысымын анықтауды мақсат етті. Бұл үшін ол парциал (үлестік) қысым деген жаңа ұғым енгізді. *Үлестік қысым деп газ қоспасының әрбір газы осы көлемді жалғыз өзі алатын кездегі қысымды атайды.* Дальтон газ қоспасының қысымы осы қоспаға кіретін барлық газдардың үлестік қысымдарының қосындысына тең болатынын тағайындады, яғни $p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$. Міне, бұл **Дальтон заңы** деп аталады. Оны молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуін пайдаланып оңай алуға болады:

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT = \frac{(N_1 + N_2 + \dots + N_n)}{V} kT = \frac{N_1}{V} kT + \frac{N_2}{V} kT + \dots + \frac{N_n}{V} kT = n_1 kT + n_2 kT + \dots + n_n kT = p_1 + p_2 + \dots + p_n. \text{ Демек,}$$

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n. \tag{32.4}$$

Дальтон заңы бойынша қоспаның құрамына кіретін газдардың мольдік массасын анықтауға болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай процестер изопрцестер деп аталады?
2. Изотермалық процеске анықтама беріндер және Бойль—Мариотт заңын қорытып шығарындар.
3. Изобаралық процеске анықтама беріндер және Гей—Люссак заңын қорытып шығарындар.
4. Изохоралық процеске анықтама беріндер және Шарль заңын қорытып шығарындар.
5. Изотермалық, изохоралық және изобаралық процестерді қалай жүзеге асыруға болады?
6. Дальтон заңы қалай тұжырымдалады?

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Бөлмедегі ауа температурасы $t_1 = 7^\circ\text{C}$ -тан $t_2 = 27^\circ\text{C}$ -қа дейін көтерілді. Қысым өзгермей қалуы үшін бөлмеден қандай ауа массасы шығуы тиіс? Бөлмедегі ауа көлемі $V = 60 \text{ м}^3$, $p = 10^5 \text{ Па}$.

Шешуі. Бөлмедегі ауаның екі күйі үшін Менделеев—Клапейрон теңдеуін жазайық:

а) қыздыруға дейін: $pV = \frac{m_1}{M} RT_1$, мұндағы $T_1 = (t_1 + 273)\text{К}$;

ә) қыздырғаннан кейін: $pV = \frac{m_2}{M} RT_2$, мұндағы $T_2 = (t_2 + 273)\text{К}$.

Онда бөлмеден шыққан ауаның массасы

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{pVM}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \text{ немесе}$$

$$\Delta m = \frac{pVM(T_2 - T_1)}{RT_1 T_2} = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 60 \text{ м}^3 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 20 \text{ К}}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \cdot 280 \text{ К} \cdot 300 \text{ К}} \approx 5 \text{ кг.}$$

Жауабы : 5 кг.

2-есеп. Екі жағы дәнекерленіп бекітілген түтікшенің ортасында ұзындығы $h = 10 \text{ см}$ болатын сынап бағаны бар. Түтікшенің екі бөлігіндегі ауаның қысымы $p_0 = 760 \text{ мм.сын.бағ.}$ Түтіктің ұзындығы $l = 1 \text{ м}$. Егер түтікті вертикаль қойсақ, сынап бағаны қандай қашықтыққа ығысады?

Шешуі. 32.7-суреттен көріп отырғанымыздай, түтікшенің төменгі бөлігіндегі ауаның p_2 қысымы түтіктің жоғары бөлігіндегі ауаның p_1 қысымы мен сынап бағанының ρgh гидростатикалық қысымының қосындысына теңескенге дейін ығысады, яғни

$$p_2 = p_1 + \rho gh. \quad (1)$$

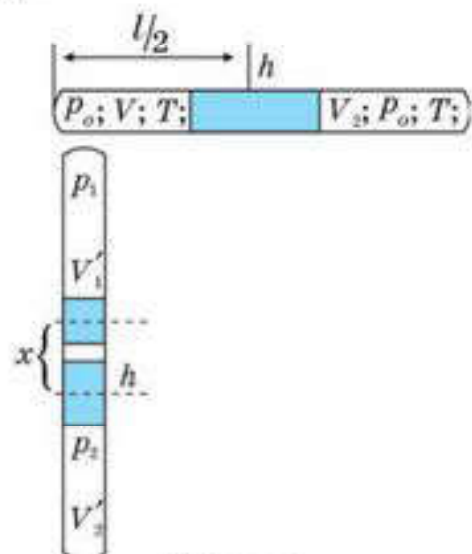
Менделеев—Клапейрон теңдеуін түтіктің сол жағындағы және оң жағындағы газдың екі күйіне қолданамыз:

$$p_0 s \left(\frac{l}{2} - \frac{h}{2} \right) = \nu RT \quad (2)$$

және

$$p_1 s \cdot \left(\frac{l-h}{2} + x \right) = \nu RT. \quad (3)$$

Екінші жағдайда түтіктің оң және сол жағындағы бөліктері үшін осыған ұқсас теңдеулер жазайық:



32.7-сурет

$$p_0 s \left(\frac{l-h}{2} \right) = \nu RT, \quad (4)$$

$$p_2 s \cdot \left(\frac{l-h}{2} - x \right) = \nu RT. \quad (5)$$

Онда

$$p_0 s \left(\frac{l-h}{2} \right) = p_1 s \left(\frac{l-h}{2} + x \right), \quad p_0 s \left(\frac{l-h}{2} \right) = p_2 \cdot s \left(\frac{l-h}{2} - x \right).$$

Бұдан $p_1 = \frac{p_0 \left(\frac{l-h}{2} \right)}{\frac{l-h}{2} + x}$; $p_2 = \frac{p_0 \left(\frac{l-h}{2} \right)}{\frac{l-h}{2} - x}$. p_2 және p_1 (1) теңдеуге қойып,

$$\frac{p_0 (l-h)}{l-h-2x} = \frac{p_0 (l-h)}{l-h+2x} + \rho gh$$

аламыз, өйткені $p_0 = \rho gH$, мұндағы $H = 760$ мм; онда

$$\frac{\rho gH(l-h)}{l-h-2x} = \rho g \left[\frac{H(l-h)}{l-h+2x} + h \right] \text{ немесе } \frac{H(l-h)4x}{(l-h)^2 - 4x^2} = h.$$

$$\text{Бұдан } x = \frac{2(l-h)(\sqrt{H^2 + h^2} - H)}{2h} = 1,6 \text{ см.}$$

Жауабы : 1,6 см.

3-есеп. Алматыда ауаның температурасы $+42^\circ\text{C}$ жетті. Осы жағдайда медициналық термометрмен адамның температурасын қалай өлшеуге болады?

Жауабы : термометрді әуелі тоназытқышта ұстап суыту керек немесе термометрді бірнеше рет сілкіп, сосын бірден қолтықтың астына салу керек.



Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Ұрттарыңды томпайтып ауа толтырыңдар. Сонда ауыз қуысындағы ауаның көлемі және қысымы да артады. Оны Бойль—Мариотт заңымен қалай үйлестіруге болады?

Түсіндіріңдер

1. Неліктен R универсал газ тұрақтысы деп аталады?
2. Газ заңдарына молекулалық-кинетикалық теория негізінде сапалық түсініктеме беріңдер.

Зерттеңдер

1. Идеал газдың изотермасын pV , TV және pT координаталарында салыңдар. Осы графиктерде газдың бір ғана массасы үшін түрліше температураларда изотерма қалай орналасады?
2. Идеал газдың изобарасын pT , TV және pV координаталарда салыңдар. Осы графиктерде газдың бір ғана массасы үшін түрліше көлемдерде изобаралар қалай орналасады?
3. Идеал газдың изохорасын VT , pT және pV координаталарда салыңдар. Осы графиктерде газдың бір ғана массасы үшін түрліше көлем кезінде изохоралар қалай орналасады?

Талдаңдар

1. Әуе шарын үрлеп толтырған кезде ондағы ауаның температурасы мен қысымы тұрақты қалады да, көлемі өзгереді. Мұны Бойль—Мариотт заңымен қалай үйлестіруге болады?
2. Дальтон заңын пайдаланып, массалары мен мольдік массалары сәйкесінше m_1 және M_1 , m_2 және M_2 болатын екі газ қоспасының мольдік массасын есептеуге қажетті формуланы қорытып шығарыңдар.

Шығарыңдар

1. Изотермалық сығылу процесінде газдың көлемі $\Delta V_1 = 2$ л кемиді. Осы кезде оның қысымы 20% артады. Егер көлем $\Delta V_2 = 4$ л кемісе, онда оның қысымы қанша пайызға артқан болар еді?

Жауабы: 50%

2. Цилиндрдің поршені астында көлемі 10 л газды изобаралық түрде $T_1 = 323$ К температурадан $T_2 = 273$ К температураға дейін суытады. T_2 температурадағы газдың көлемі қандай?

Жауабы: 8,5 л

3. Идеал газ $pV = \text{const}$ заңы бойынша ұлғаяды, мұндағы p — газ қысымы, V — алатын көлемі. Газдың көлемін 3 есе арттырғанда оның температурасы $T_2 = 100$ К болады. Газдың бастапқы T_1 температурасын табыңдар.

Жауабы: 300 К

■4. Егер газдың бір молекуласына $5,56 \cdot 10^5$ су молекуласы сәйкес келсе, онда көлемі 0,5 л бөтелкедегі лимонадта CO_2 көмірқышқыл газының қандай m массасы ерітілген?

Жауабы: 2,2 мг

5. Қалыпты жағдайдағы газ молекуласының орташа арақашықтығын анықтаңдар.

Жауабы: 3,35 нм

■6. Ауадағы су тамшысы 1,7 м/с орташа жылдамдықпен қозғалады. Тамшының радиусы 10^{-6} см. Ауаның температурасын табыңдар.

Жауабы: 290 К

7. Температурасы 37°C -тан 40°C -қа дейін арттырғанда су буы молекулаларының орташа квадраттық жылдамдығы қанша пайызға артады?

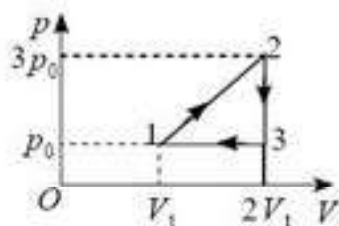
Жауабы: 48%

8. Газ изотермалық түрде 8 л көлеммен 6 л көлемге дейін сығылған. Осы кезде қысым $\Delta p = 4 \cdot 10^3$ Па артқан. Бастапқы қысымды анықтаңдар.

Жауабы: 12 кПа

9. Электр шамы 600 мм.сын.бағ. қысымда азотпен толтырылған. Шамның көлемі 500 см^3 . Егер қысымы 760 мм.сын.бағ. болатын суда оның ұшын сындырып алса, шамның ішіне қанша су кіреді?

Жауабы: 105 г



32.8-сурет

■10. 32.8-суретте көрсетілген процесті VT және pT -диаграммаларында өрнектеңдер. Зат — идеал газ.

■11. Көлемі 300 м^3 аэростат 300 К температурадағы қысымы 10^5 Па молекулалық сутекпен толтырылған. Егер баллондардан әрбір секунд сайын аэростатқа 25 г сутек өтетін болса, аэростаттың қабықшасын толтыру қанша уақытқа созылады? Толтырылғанға дейін аэростат қабықшасында сутек жоқ. Газ — идеал.

Жауабы: 16 мин

12. Сыйымдылығы 4 л колбада 0°C температурадағы оттегі мен азот бар. Егер газдың массалары $m_1 = m_2 = 1 \text{ г}$ болса, ыдыс қабырғасына түсірілетін қысым қандай?

Жауабы: 38 кПа

*13. Екі жағы да бітеу горизонталь жатқан түтіктің ішінде ұзындығы $h = 10 \text{ см}$ сынап бағаны бар. Түтіктің екі жағындағы қысым $p_0 = 760 \text{ мм.сын.бағ.}$ Түтіктің ұзындығы $l = 1 \text{ м}$. Егер түтікті вертикаль қойса, сынап бағаны қандай қашықтыққа жылжиды?

Жауабы: 3 см

*14. Шыны түтікшеде ұзындығы $l = 8 \text{ см}$ сынап бағанымен жабылған ауа бар. Егер түтіктің ашық жағын жоғары қаратып ұстаса, онда ауа бағанының ұзындығы $l_2 = 4 \text{ см}$ болады. Егер түтікті ашық жағымен төмен қаратып ұстаса, онда ауа бағанының ұзындығы $h = 5 \text{ см}$. Атмосфералық қысымды табыңдар.

Жауабы: 720 мм.сын.бағ.



Рефлексия

1. Сабақта қандай жаңа ақпарат алдыңдар?
2. Нені есте сақтау керек деп ойлайсыңдар?
3. Материалдың барлығы түсінікті болды ма?



$pV = \frac{mRT}{M}$ теңдеуі *идеал газ күйінің теңдеуі* деп аталады. Бұл теңдеуді орыс ғалымы Д.И. Менделеев пен француз физигі Бенуа Клапейрон алған, сондықтан ол *Менделеев—Клапейрон теңдеуі* деп аталады.

Изопроцестер — газдың берілген массасы үшін қандай да бір термопараметрдің тұрақты болып қалатын кезіндегі процестер.

Изотермалық процесс — тұрақты температура кезінде газдың берілген массасы үшін оның қысымының газ алып тұрған көлемге көбейтіндісі тұрақты шама болып қалады, яғни $pV = \text{const}$. Бұл заң *Бойль—Мариотт заңы* деп аталады.

Изобаралық процесс — тұрақты қысымда газдың берілген массасының көлемі температураға сызықтық тәуелді болады, яғни

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Бұл заң *Гей—Люссак заңы* деп аталады.

Изохоралық процесс — тұрақты көлемде берілген газ массасының қысымы оның температурасына тура пропорционал болады, яғни

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Бұл — *Шарль заңы*.

Барлық газ заңдары тәжірибе жүзінде ашылған, оларды Менделеев—Клапейрон теңдеуінен жеңіл қорытып шығаруға болады.

Үлестік қысым деп газ қоспасының әрбір газы осы көлемді жалғыз өзі алатын кездегі қысымды атайды. Дальтон газ қоспасының қысымы осы қоспаға кіретін барлық газдардың үлестік қысымдарының қосындысына тең болатынын тағайындады, яғни $p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$. Міне, бұл *Дальтон заңы* деп аталады. Дальтон заңы бойынша қоспаның құрамына кіретін газдардың мольдік массасын анықтауға болады.

8-тарау. ТЕРМОДИНАМИКА НЕГІЗДЕРІ

§ 33. Ішкі энергия



Тірек ұғымдар: термодинамика, термодинамикалық жүйе, термодинамикалық процесс, ішкі энергия, микробөлшектердің кинетикалық және потенциалдық энергиялары, идеал газ, универсал газ тұрақтысы, көпкомды газдар, еркіндік дәреже α молекуланың ілгерілемелі және айналмалы қозғалысы.

Бүгінгі сабақтан: жылу құбылыстарын зерттеудің екі әдісі туралы білесіңдер; дененің ішкі энергиясы ұғымы нені қамтитынын білесіңдер; идеал газдың ішкі энергиясын есептеуді үйренесіңдер.

Жылулық құбылыстар деп денелерді қыздыру немесе салқындату кезінде оларда жүретін физикалық процестерді атайтыны бізге мәлім. Жылулық құбылыстарды зерттеу үшін физикада тарихи қалыптасқан екі түрлі көзқарас пайдаланылады. Ол — термодинамикалық және молекулалық-кинетикалық теоремасы.

XIX ғасырдың аяғында **термодинамика** деп аталатын ғылым қалыптасты. Ол жылуды механикалық жұмысқа айналдырудың тиімді тәсілдерін зерттейтін физиканың бөлімі ретінде пайда болды. Термодинамика тәжірибелерде алынған орасан зор мөлшердегі мәліметтердің жалпыламасы болып табылатын принциптерге негізделген. Заттың ішкі құрылымына, молекулалардың жылулық қозғалысына және олардың өзара әсерлесуіне қатысы жоқ бұл принциптер жылу процестерінде энергияны түрлендіру кезіндегі сандық қатынастарды орнататын жалпы заңдар түрінде қалыптастырылды.

Термодинамиканың негізгі түсініктерінің бірі — **термодинамикалық жүйе** ұғымы көп мөлшердегі молекулалардан тұратын денені немесе денелер тобын қамтиды. Термодинамикалық жүйе ретінде, мысалы, цилиндрдегі поршень астындағы газды, ыдысқа құйылған суды, темір кесегін қарастыруға болады. Жүйеге кірмейтін және оның аумағынан тыс орналасқандардың барлығы қоршаған орта деп аталады. Термодинамикада затты тұтастай сипаттайтын, бірақ жеке молекулаларға қатысты мағынасы болмайтын шамаларға жүгінеді. Макроскопиялық параметрлер деп аталатын осындай шамаларға, мысалы, қысымды жатқызуға болады. Расында да, бір молекуланың қысымы туралы айтудың ешқандай мәні жоқ. Бірақ молекулалардың ыдыс қабырғаларымен шексіз көп соқтығысулар әсерінің орташа күшінен туындайтын бүкіл газдың қысымы туралы айтуға болады. Қысымды өлшейтін құрал — манометр.

Манометр ыдыс қабырғасының бірлік ауданына келетін молекулалар соққыларының дәл сол уақыт бойынша орташа күшін тіркейді.

Термодинамикалық жүйенің күйі макроскопиялық параметрлердің белгілі бір жиынтығымен сипатталады. Мысалы, “цилиндрдегі поршень астындағы газ” жүйесінің күйін сипаттау үшін мына үш параметр берілуі қажет: p қысым, V көлем, T температура. Термодинамикалық жүйенің бір күйден екінші күйге ауысуын *термодинамикалық процесс* деп атайды.

Сонымен қатар жылу құбылыстарын сипаттаудың **молекулалық-кинетикалық теория** деп аталатын тағы бір тәсілі бар екені бізге мәлім. Молекулалық-кинетикалық теорияда немесе оны теориялық физикадағы атымен атайтын болсақ — *статистикалық механикада* дененің ішіндегі жүретін барлық процестерді оның құрамына кіретін атомдар мен молекулалардың тәртібімен түсіндіреді. Мысалы, қатты дененің балку процесі дененің сырттан алатын энергиясы кристалл торының түйіндерінде орналасқан атомдардың тербелістер амплитудасының ұлғаюына әкеледі деп түсіндіріледі. Температураның кейбір мәнінде атомдардың тербелмелі қозғалыс энергиясының ұлғаюы соншалық, олардың арасындағы тартылу күштері атомдарды бұрынғыдай тор түйіндерінде ұстап тұра алмайды да, сол себептен кристалл торы бұзылады.

Аталған екі тәсілдің әрқайсысы термодинамикалық та, молекулалық-кинетикалық та жылулық құбылыстарды зерттеу үшін кең қолданылады. Сонымен қатар олар бір-біріне қайшы болмайды, керісінше көптеген жағдайда бірін-бірі толықтырып отырады.

Ішкі энергия. Кез келген макроскопиялық дене өзінің механикалық энергиясымен қоса, оның ішкі күйіне тәуелді энергияға да ие болады. Ол энергия түрін *ішкі энергия* деп атайды. Бізге белгілі білімді қолдана отырып, дененің ішкі энергиясы қандай параметрлерге тәуелді екенін зерттеп көрейік.

Молекулалық-кинетикалық теорияның негізгі қағидаларына сәйкес, барлық денелер микробөлшектерден (атомдар мен молекулалардан) тұрады. Микробөлшектер дене ішінде үздіксіз және хаосты қозғалады, демек, олар кинетикалық энергияға ие. Сонымен қоса дене ішіндегі микробөлшектер өзара әсерлеседі, яғни олар потенциалдық энергияға да ие болады. Олай болса, *дененің ішкі энергиясы дененің массалар центрімен байланысқан санақ жүйесіндегі оның барлық микробөлшектерінің хаосты қозғалысының кинетикалық энергиялары мен олардың өзара әсерлесуінің потенциалдық энергияларының қосындысына тең* деп айтуға болады. Ішкі энергияның жоғарыда берілген анықтамасынан бұл ұғымға не дененің өз қозғалысының кинетикалық энергиясы, не оның қандай да бір сыртқы күштер өрісінде

орналасуына байланысты потенциалдық энергиясы кірмейтіні анық. Олардың орнына дененің ішкі энергиясына мына энергиялар кіре алады: молекулалардың ілгерілемелі, айналмалы және тербелмелі қозғалыстарының кинетикалық энергиясы, молекулалардың құрамындағы атомдардың өзара әсерлесуінің потенциалдық энергиясы және молекулалардың өздерінің өзара әсерлесуінің потенциалдық энергиясы.

Идеал газдың ішкі энергиясы. Егер макроскопиялық дененің молекулалар саны шексіз көп екенін ескерсек, онда оның ішкі энергиясын теориялық жолмен есептеу мүмкін еместігі бізге түсінікті. Шынымен, бұл бізден әрбір жеке молекула үшін орасан зор мөлшердегі қозғалыс теңдеулерін жазуды және оларды шығаруды талап етеді. Тіпті заманауи компьютерлердің шапшаңдығымен шамасы мұндай мәселені шеше алмайтын еді.

Дегенмен, макроскопиялық денелердегі молекулалар санының аса зор көптігінің нақ өзі бізді әрбір жеке молекуланың қозғалысын ескерудің әуресінен құтқарады. Оның орнына 6-тарауда біз қарастырған *орташа жылдамдық* немесе *орташа кинетикалық энергия* сияқты молекулалардың қозғалысын сипаттайтын шамалардың тек орташа мәндерін білу жеткілікті. Молекулалық-кинетикалық теорияда статистикалық деп аталатын мұндай әдіс термодинамикалық жүйенің ішкі энергиясын есептеу мәселесін едәуір жеңілдетеді.

Мысалы, идеал газдың ішкі энергиясын есептейік. Еске түсірсек, *идеал газ* дегеніміз — молекулалары іс жүзінде бір-бірімен әсерлеспейтін материялық нүктелер болып табылатын газ. Идеал газ молекулаларының арасындағы өзара әсерлесудің жоқ болуы оның ішкі энергиясы газдың құрамына кіретін молекулалардың тек кинетикалық энергияларының қосындысымен ғана өрнектелетінін білдіреді. Егер жеке i -ші молекуланың кинетикалық энергиясын W_{ki} белгілесек, онда қосудың \sum таңбасын пайдаланып, ішкі энергияны былай өрнектеуге болады:

$$U = \sum W_{ki} \quad (33.1)$$

Идеал газдың ішкі энергиясының (33.1) формуласын одан әрі де жеңілдету үшін барлық молекулалар орташа есеппен бірдей $\overline{W_k}$ кинетикалық энергияға ие болады дейік. Сонда олардың жалпы энергиясының өрнегін газ молекулаларының N санын бір молекуланың $\overline{W_k}$ орташа кинетикалық энергиясына көбейтіндісі арқылы жазуға болады:

$$U = N \overline{W_k} \quad (33.2)$$

Алдыңғы тараудан белгілі болғандай, біратомды молекуланың $\overline{W_k}$ орташа кинетикалық энергиясы мына формуланың көмегімен өрнектеледі:

$$\overline{W_k} = \frac{m_0 \overline{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad (33.3)$$

Массасы m газдың молекулалар саны мынаған тең:

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A. \quad (33.4)$$

(33.3) және (33.4) формулаларын және тұрақтылардың арасындағы $R = kN_A$ байланысты ескере отырып, онда біратомды идеал газдың ішкі энергиясын есептеудің өрнегін былайша жазуға болады:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (33.5)$$

Алынған формуладан идеал газдың белгілі массасы үшін ішкі энергиясы температураға ғана тәуелді, ал оның қысымы мен көлеміне тәуелсіз екенін көруге болады.

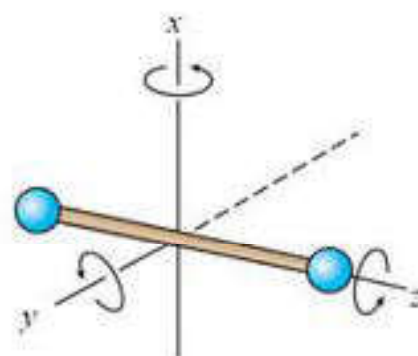
Көпатомды газдардың ішкі энергиясы. Ішкі энергия үшін біз алған (33.5) теңдеу тек біратомды идеал газы үшін жарамды, себебі оның молекуласы материялық нүкте тәрізді болғандықтан, кеңістікте тек ілгерілемелі қозғала алады. Демек, оның тек үш *ілгерілемелі еркіндік дәрежелері* бар. Көпатомды молекула, біз білетіндей, қозғалыстың басқа да түрлерін жасай алады. Мысалы, пішіні кішкентай гантель тәрізді екіатомды газдың (O_2 , N_2 , H_2) молекуласын қарастырайық. Ондай молекула тікбұрышты координаталар жүйесінің x , y , z үш осінің бойымен ілгерілемелі қозғалысымен қоса, молекуланың массалар центрі арқылы өтетін үш өзара перпендикуляр осьтің айналасында айналмалы қозғалыс жасай алады (33.1-сурет).

Осыған байланысты көпатомды молекулада басқа тағы үш айналмалы *еркіндік дәрежелері* бар дейді. Барлық энергиясы оның үш ілгерілемелі еркіндік дәрежелеріне келетін біратомды молекулаға қарағанда көпатомды молекуланың толық энергиясы оның үш ілгерілемелі және үш айналмалы еркіндік дәрежелері арасында бөлінеді. Алайда екіатомды молекуланы алып қарасақ, оның айналмалы еркіндік дәрежелерінің біреуіне келетін энергияны елемеуге болатынын ескеру керек. Жоғарыдағы 33.1-суретте көрсетілгендей, мұнда молекуланың екі атомы арқылы өтетін z осіне қатысты молекуланың айналу энергиясы туралы айтылғанын байқауға болады.

Біз білетіндей айналмалы қозғалыстың энергиясы $W_{\text{аіп}} = \frac{1}{2} J \omega^2$ формуласымен анықталады.

Сонда z осіне қатысты молекуланың J инерция моменті өте аз болғандықтан, сол оське қатысты молекуланың айналу энергиясы да елеусіз аз болады.

Сол себепті екіатомды молекуланың орташа кинетикалық энергиясы қалған бес еркіндік дәрежелері арасында бөлінетін болады. Ал молекулалардың жылулық қозғалысы мүлде



33.1-сурет

хаосты болады, сондықтан молекуланың әр еркіндік дәрежесіне, оның ілгерілемелі немесе айналмалы екеніне қарамастан, бірдей энергия келетініне болжам жасауға негіз бар. Ол энергияны $\frac{1}{2}kT$ тең деп санауымыз дұрыс, себебі үш еркіндік дәрежесі бар біратомды молекуланың орташа кинетикалық энергиясы $\frac{3}{2}kT$ формуласымен өрнектеледі. *Тең таралу заңы* деп аталатын молекула энергиясының оның еркіндік дәрежелері бойынша біртекті таралуы туралы болжамды Больцман дәлелдеген.

Сөйтіп, екіатомды молекуланың орташа кинетикалық энергиясы $\overline{W}_k = \frac{5}{2}kT$ формуласымен есептеледі. Олай болса, массасы m екіатомды идеал газдың ішкі энергиясын мына формуланың көмегімен анықтаған дұрыс:

$$U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (33.6)$$



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Жытулық құбылыстарды зерттеудің термодинамикалық тәсілінен молекулалық-кинетикалық тәсілдің айырмашылығы неде?
2. Термодинамикалық жүйе деген не?
3. Термодинамикалық процесс деген не?
4. Қандай энергия ішкі деп аталады? Заттың микроқұрылымы бойынша ішкі энергия деген не?
5. Неліктен pV диаграммасындағы нүкте идеал газдың белгілі бір мөлшерін толық сипаттайды?
6. Идеал газдың берілген массасының ішкі энергиясы оның температурасына қалай тәуелді?
7. Зат мөлшерін азайтса, идеал газдың ішкі энергиясы өзгере ме?
8. Неліктен идеал газдың ішкі энергиясы газ молекуласындағы атомдар санына тәуелді болады?
9. Берілген температурада қай газдың бір молінің ішкі энергиясы көп болады: идеал газ ба, нақты газ ба?



Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

Білеушеге күш түсіріп, оны кедір-бұдыр тегіс беттің бойымен тұрақты жылдамдықпен жылжытуға болады. Бұл жағдайда білеушенің орын ауыстыруына кететін жұмыс оның кинетикалық және потенциалдық энергияларын өзгертпейді. Олай болса, күштің жұмысы қайда жұмсалады?

Шығарыңдар

1. Баллондағы массасы 5 кг аргонның температурасы 300 К. Газдың ішкі энергиясын есептеңдер.

Жауабы: 470 кДж

2. 27°C температурадағы 2 моль екіатомды газдың ішкі энергиясы неге тең?

Жауабы: 6,2 кДж

3. 2 л көлемді алатын және ішкі энергиясы 300 Дж біратомды газдың қысымын анықтаңдар.

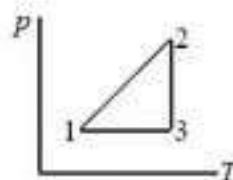
Жауабы: 105 Па

4. Сыйымдылығы 2 л ыдыста тұрған, температурасы 27°C, ал ішкі энергиясы 300 Дж біратомды идеал газ молекулаларының концентрациясын анықтаңдар.

Жауабы: $2,4 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$

5. Идеал газдың жасайтын циклдік процесінің p T координаталарындағы графигі көрсетілген (33.2-сурет). Циклдің әр бөлігінде газдың ішкі энергиясы қалай өзгереді? Толық циклде ол қалай өзгерді?

Жауабы: 1—2 артты; 2—3 өзгермеді; 3—1 кемиді. Өзгермеді



33.2-сурет

Рефлексия

1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 34. Термодинамикалық процестер кезіндегі атқарылатын жұмыс



Тірек ұғымдар: газдың атқаратын жұмысы, изобаралық процесс кезінде газдың атқаратын жұмысы, күй функциясы, процесс функциясы.

Бүгінгі сабақта: изобаралық процесс кезінде газдың атқаратын жұмысын есептеуді, газдың атқарған жұмысын график арқылы табуды үйренесіңдер; күй функциясы және процесс функциясы түсініктерімен танысасыңдар.

Механикадағы және термодинамикадағы жұмыс. (33.5) және (33.6) формулаларына сәйкес, массасы берілген идеал газдың температурасын өзгертудің жалғыз жолы — ол оның ішкі энергиясын өзгерту.

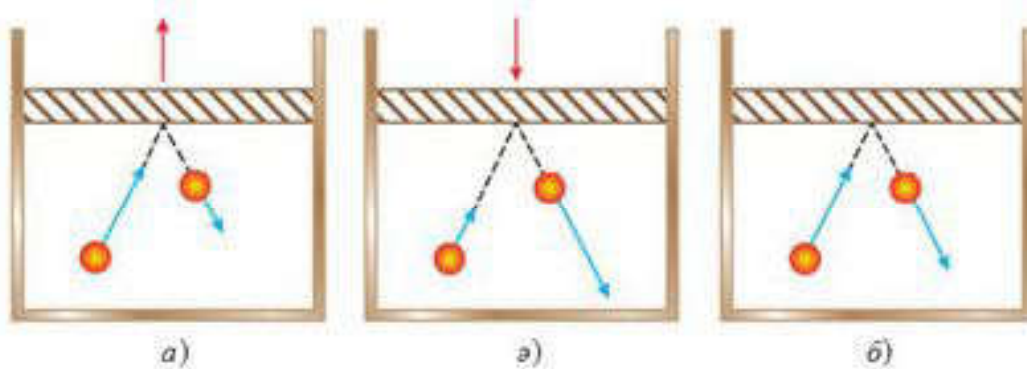
Ал газдың ішкі энергиясын өзгертудің қандай жолдары бар?

Механикадан дене энергиясының өзгеруі әрқашан дене жұмыс атқарған немесе денемен жұмыс атқарған жағдайларда болатынын білесіңдер. Бірінші жағдайда дененің энергиясы азаятыны, ал екіншісінде ұлғаятыны да сендерге мәлім. Мәселен, егер серпімді деформацияланған серіппе жұмыс атқарса, оның потенциалдық энергиясы азаяды. Ал егер де сыртқы күш денені үдемелі қозғалуға мәжбүрлеп оның үстінен жұмыс атқарса, онда оның кинетикалық энергиясы ұлғаяды.

Термодинамикалық процестерде де жасалатын жұмыс дененің энергиясын өзгертуге алып келеді. Бірақ дененің тұтастай қозғалысы кезінде атқарылатын механикалық жұмыспен салыстырғанда термодинамикадағы жұмыс дене микробөлшектерінің бір-біріне қатысты қозғалысымен байланысты болады да, дене көлемі өзгерген жағдайда ғана атқарылады. Демек, мысалы, цилиндрдегі поршень астындағы газдың ішкі энергиясын азайтқымыз келсе, оны ұлғаюдың механикалық жұмысын жасауға мәжбүрлеуіміз керек. Ал егер газдың температурасын ұлғайту қажет болса, онда біз газды сығып жұмыс атқаруымыз керек.

Жұмыс атқару кезіндегі ішкі энергия өзгеруінің молекулалық көрінісі. Неліктен ұлғаю жұмысын атқару кезінде газдың ішкі энергиясы азаятынын, ал сыртқы күштің газ үстінен сығып жұмыс атқарған кезде газдың ішкі энергиясы керісінше артатынын түсіндіріп көрейік.

Газдың ұлғаю процесінде өзінен алыстап бара жатқан поршеньмен соқтығысқа ұшыраған молекула өз жылдамдығы мен кинетикалық энергиясын азайтады (34.1, *a*-сурет). Керісінше газдың сығылу процесі кезінде өзіне жақындап келе жатқан поршеньмен соқтығысқаннан кейін молекула өз жылдамдығын және кинетикалық энергиясын арттырады (34.1, *ә*-сурет). Ал егер молекула қозғалмайтын поршеньмен серпімді соқтығысатын болса, онда ол өз жылдамдығының шамасын мүлде өзгертпейді (34.1, *б*-сурет). Бұл жерде қарастырылған барлық үш



34.1-сурет

жағдайлар мен футболшының ойын кезінде жасайтын іс-әрекеттерінің арасындағы ұқсастықты айтқан жөн. Бірінші жағдайда футболшы өзіне ұшып келе жатқан допты тоқтатуға тырысатын болса, екінші жағдайда ол допқа одан әрі үлкен жылдамдықты беруді көздейді. Ал үшінші жағдайды футболшы өзінің серігімен “тосқауыл” тәсілін пайдаланған кезде жүзеге асырады.

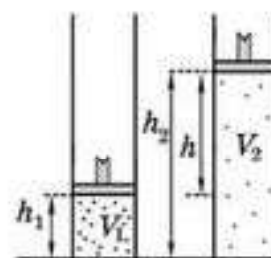
Жалпы алғанда, дененің ішкі энергиясы ұғымына оның құрамындағы молекулалардың қосынды кинетикалық энергиясынан басқа, молекулалардың бір-бірінен арақашықтығына тәуелді болатын олардың өзара әсерлесуінің қосынды потенциалдық энергиясы да кіретіні бізге белгілі. Сонда дененің ішкі энергиясының өзгерісін денені сығу немесе ұлғайту жұмысы атқарылған кезде молекулалардың арақашықтықтары, демек, олардың потенциалдық энергиялары өзгеретіні арқылы да түсіндіруге болады.

Газ жұмысын есептеу. Механикада макроскопиялық денелердің қозғалысы қарастырылады. Біз білетіндей, егер тұрақты F күштің әсерінен дене s арақашықтыққа орын ауыстыратын болса, онда күштің ақпаратын жұмысын өрнектейтін формуланың көмегімен өрнектеуге болады:

$$A = F s \cos \alpha, \quad (34.1)$$

мұндағы α — F күштің және s орын ауыстырудың арасындағы бұрыш.

Бет ауданы S поршеньнің астындағы қысымы p газды алып қарастырайық (34.2-сурет). Қысымның $p = \frac{F}{S}$ анықтамасынан поршеньге әсер ететін газдың қысым күші $F = pS$. Осы күштің әсерінен поршень күштің әсер ету бағыты бойымен өте аз Δh арақашықтыққа ығысады делік. Поршеньнің мұндай азғантай ығысуы кезінде газдың қысымын тұрақты деп есептеуге болатындықтан, газдың ұлғаюы изобаралық түрде жүреді деуге құқығымыз бар. Демек, бүкіл процесс кезінде газдың поршеньге әсер ететін күші тұрақты болып қалады. Олай болса, газдың



34.2-сурет

поршеньді көтеру кезінде атқаратын жұмысын есептеу үшін біз (34.1) формуланы пайдалануымызға болады:

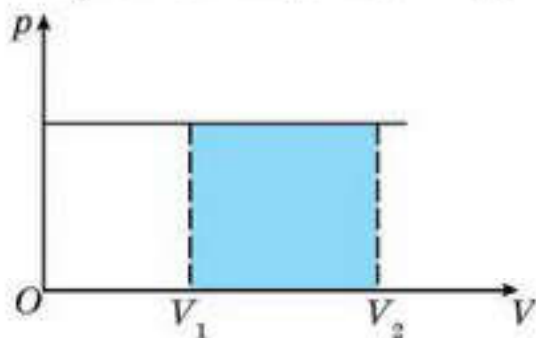
$$A = Fh = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1) = p(V_2 - V_1) = p\Delta V, \quad (34.2)$$

мұндағы ΔV — газ көлемінің өзгеруі, ал газдың қысым күші мен поршеньнің орын ауыстыруының арасындағы бұрыш нөлге тең болғандықтан, $\cos\alpha = 1$.

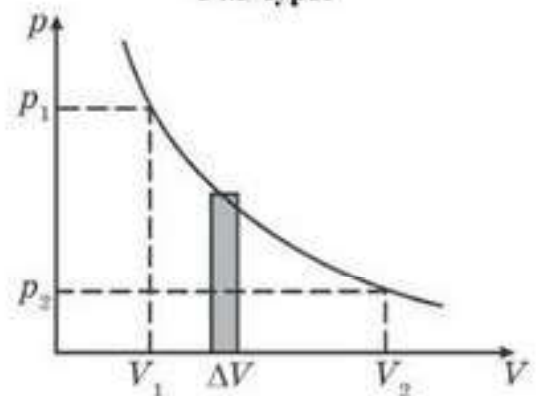
(34.2) формуладан, егер газдың соңғы көлемі оның бастапқысынан артық болса ($V_2 > V_1$, $\Delta V > 0$), онда жұмыс оң болатынын көруге болады. Бұл жағдайда газдың өзі жұмыс атқарады дейді. Ал егер газдың соңғы көлемі оның бастапқы көлемінен аз болса ($V_2 < V_1$, $\Delta V < 0$), онда жұмыстың таңбасы теріс болады да, бұл жағдайда сыртқы күштер газдың үстінен жұмыс атқарады дейді. Ньютонның үшінші заңына сәйкес, газдың поршеньге әсер етуші F күші шамасы жағынан сыртқы күштер тарапынан газға әсер етуші F' күшіне тең, ал бағыты жағынан оған қарама-қарсы $F = -F'$. Сонда сыртқы күштердің бірінші жағдайдағы атқаратын жұмысы теріс $A' < 0$, ал екінші жағдайда оң болады $A' > 0$.

Тағы да бір айта кететін жайт, (34.2) формуланы біз тек газдың қысымы тұрақты, яғни изобаралық процестер үшін ғана пайдалана аламыз. Газдың жасайтын процесі изобаралық болмаған жағдайлар үшін газдың атқаратын жұмысын қалай есептеуге болатынын қарастырайық.

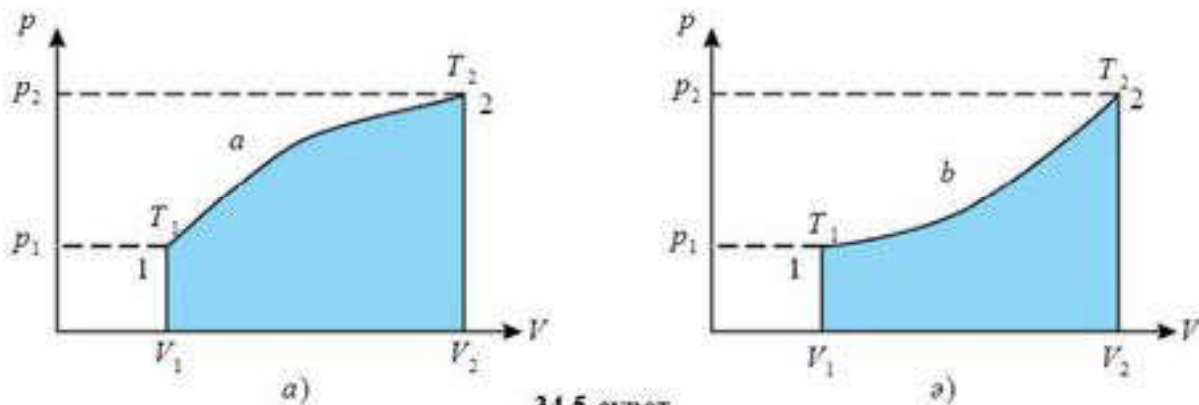
Жұмысты процестің $p(V)$ графигі арқылы есептеу. pV координаталарында изобаралық процестің графигін тұрғызайық (34.3-сурет). Графиктен $p\Delta V$ көбейтіндісінің сандық мәні үстінен $p(V)$ графигінің қисығымен, астынан V осімен және екі жағынан оське жүргізілген перпендикулярлармен шектелген тік төртбұрыштың ауданына тең екенін көруге болады (штрихталған аудан). Жұмысты есептеудің мұндай графикалық әдісін жалғыз ғана изобаралық процесс үшін емес, басқа да процестер үшін де пайдалануға болатынын дәлелдеп көрейік. Ол үшін pV координаталарындағы графигі 34.4-суретте көрсетілген қандай да бір термодинамикалық процесті алып қарастырайық. $V_1 - V_2$ көлемдер интервалын көптеген шексіз аз ΔV бөліктерге бөлейік. Көлемнің әрбір осындай бөлігі үшін газдың қысымын тұрақты деп алуға болады. Изобаралық процеске арналған (34.2) формуланы пайдалана отырып, әр бөліктің элементар (шексіз



34.3-сурет



34.4-сурет



34.5-сурет

аз) ΔA жұмысын (боялған аймақтың ауданы) есептеп алайық та, бүкіл $V_1 - V_2$ көлем интервалындағы жұмысты есептеу үшін оларды қосайық. Төртбұрыштардың ΔV ендері өте аз екенін ескерсек, барлық кішкентай тік төртбұрыштардың қосынды ауданы мен графиктің астында жатқан ауданы арасында көп айырмашылық болмайтынын түсіну қиын емес.

p_1, V_1, T_1 параметрлері 1-күйден параметрлері p_2, V_2, T_2 екінші күйге газ екі әртүрлі а) 1-а-2; ә) 1-б-2 процестер арқылы ауысты дейік (34.5, а, ә-суреттер). Графиктік әдісті қолдана отырып, осы екі процестің әрқайсысында газдың атқарған жұмысын салыстырайық. Штрихталған $V_1 1 a 2 V_2$ және $V_1 1 b 2 V_2$ аудандарды салыстыру арқылы, $A_{1-a-2} > A_{1-b-2}$. Көріп отырғандай, газдың атқаратын жұмысы $p(V)$ графигінде газдың 1-күйден 2-күйге ауысқандағы жолына тәуелді. Осыған байланысты, термодинамикада жұмысты *процесс функциясы* деп қарастырады. Термодинамикада жүйе жұмыстың кейбір мөлшеріне ие болады деп айтудың мағынасы жоқ. Оның орнына жүйенің ішкі энергиясының өзгеруіне әкелетін жүйенің атқаратын немесе сыртқы күштердің жүйемен атқаратын жұмысы туралы айтқан дұрыс болады.

Егер а) және ә) процестердегі газдың ішкі энергиясының өзгерісін салыстыратын болсақ, онда $\Delta U_{1-a-2} = \Delta U_{1-b-2}$, себебі, біз білетіндей, газдың ішкі энергиясы тек оның бастапқы және соңғы күйдегі макропараметрлері арқылы ғана анықталады. Демек, ішкі энергия *күй функциясы* болып табылады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Газ көлемін өзгерткенде оның атқаратын жұмысының неліктен поршеньге әсер ететін сыртқы күштердің жұмысынан таңбасы бөлек те, ал модулі бойынша бірдей болады?
2. pV диаграммадағы қандай да бір процестің графигін пайдалана отырып, газдың атқаратын жұмысын қалай анықтауға болады? Қандай жағдайда бұл жұмыс оң, қандай жағдайда теріс?
3. Үш процесс берілген: изохоралық, изобаралық және изотермалық. Қандай процесс кезінде газдың атқаратын жұмысы көлемнің бірдей өзгерісі кезінде максимал және минимал болады?

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

Газ сығылған кезде оның температурасының жоғарылауын молекулалық көзқарас тұрғысынан түсіндіріңдер.

Талдаңдар

Термодинамикадағы жұмыс процесс функциясы болып есептелінеді. Осы тұжырымның мәні қандай?

Шығарыңдар

1. Массасы 10 г көмірқышқыл газының температурасы тұрақты қысымда 20°C шамасынан 30°C шамасына дейін артты. Газдың атқарған жұмысын және оның ішкі энергиясының өзгерісін табыңдар.

Жауабы: $A = 18,9$ Дж; $\Delta U = 83$ Дж

2. Массасы 3,47 кг газдың температурасын изобаралық қыздыру кезінде 159 К арттырғанда 144 кДж жұмыс атқарылды. Газдың мольдік массасын анықтаңдар.

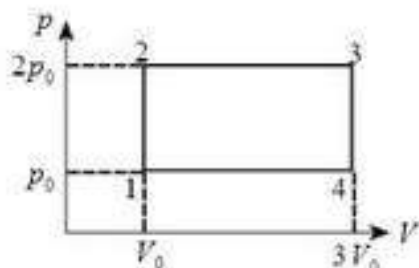
Жауабы: $32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль

3. Массасы m , температурасы T идеал газды изохоралық суытқанда оның қысымы n есе кеміді. Содан кейін газ тұрақты қысымда ұлғаяды. Соңғы күйде газдың температурасы бастапқы күйдегіге тең болды. Газдың атқарған жұмысын анықтаңдар. Газдың молярлық массасы M .

Жауабы: $A = \frac{(n-1)}{n} \frac{m}{M} RT$

4. Газдың кейбір мөлшерін $T_1 = 300$ К температурадан $T_2 = 400$ К температураға дейін қыздырады. Сол кезде газдың көлемі оның температурасына тура пропорционал өзгереді. Газдың бастапқы көлемі 3 дм³. Процестің соңындағы газдың қысымы 10^5 Па. Процесс кезінде газ қандай жұмыс атқарады?

Жауабы: 100 Дж



34.6-сурет

5. Бір моль бір атомды идеал газдың графигі 34.6-суретте көрсетілген. Идеал газ 1—2—3—4—1 циклдік процесс жасайды. Газдың 1 күйдегі температурасы 100 К. Бүкіл циклдегі газдың атқарған жұмысы 16,6 кДж. Газдағы мольдер санын табыңдар.

Жауабы: 2 моль

Рефлексия

1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 35. Жылу мөлшері. Ішкі энергияны өзгерту әдістері. Жылу сыйымдылығы



Тірек ұғымдар: жылу берілу, жылу тегі, жылу мөлшері, жылу сыйымдылығы, меншікті жылу сыйымдылығы, мольдік жылу сыйымдылығы, жылу балансының теңдеуі.

Бүгінгі сабақта: жылу берілу не екенін, заттың меншікті жылу сыйымдылығының физикалық мағынасын білесіңдер; заттың мольдік жылу сыйымдылығы түсінігімен танықасыңдар; дене температурасын өзгерту үшін жылу мөлшерін есептеп үйренесіңдер.

Жылу берілу кезіндегі ішкі энергияның өзгеруі. Алдыңғы параграфта біз жұмыс атқару арқылы газдың ішкі энергиясын өзгертудің механизмімен таныстыңдар. Бірақ денелердің ішкі энергиясын жұмыс жасамай-ақ өзгертуге болатын тағы бір әдіс бар. Оны толығырақ цилиндрдегі поршень астындағы орналасқан газ мысалында қарастырайық. Бұл жолы поршеньді қозғалмайтындай етіп бекітейік. Енді газ көлемі өзгермейтіндіктен, жұмыс атқарылмайды. Егер осы шарттарда газды қыздырсақ, мысалы, оны одан көбірек қыздырылған денемен байланыстыру арқылы, онда газдың температурасы мен ішкі энергиясы артады. Біздің байқайтынымыз, қарастырылған жағдайда қыздырылған денеден газға энергияның берілуіне жұмыс атқарылуы емес, бір-бірімен байланысқан денелер арасындағы температуралар айырмасы түрткі болып отыр.

Екі дененің температуралар айырмасының нәтижесінде олардың біреуінен екіншісіне энергияның берілуі жылу берілуі деп аталады.

Жылу тегі теориясы. Егер температуралары әртүрлі екі денені бір-бірімен байланысқа келтіретін болсақ, онда денелердің ыстығы салқындай бастайтынын, ал салқыны қыза бастайтынын тәжірибеден бақылауға болады. Жылу берілу процесі екі дененің температуралары теңескенге дейін жалғасын табады. XIX ғасырдың ортасына дейін ғалымдар жылу берілу механизмін *жылу тегі* деп аталатын кейбір салмақсыз сұйықтың бір денеден екіншіге ағылуы арқылы түсіндіруге тырысқан. Алайда кейін бір-бірімен байланысқан денелер температураларының өзгеру себебі жайлы бұл көзқарастың жалған және табиғатта ешқандай жылу тегінің жоқ екенін анықтады.

Жылу берілу туралы молекулалық көзқарас. Шын мәнінде, бір-бірімен байланысқан температуралары әртүрлі екі дененің арасындағы жылудың берілуін былайша түсіндірген жөн: денелердің шекарасындағы өзара соқтығысу кезінде көбірек қыздырылған дененің молекулалары салқын дененің молекулаларына өздерінің кинетикалық энергияларының бір бөлігін береді. Осының нәтижесінде қыздырылған дене молекулаларының жылдамдықтары азаяды, ал салқын дене молекулаларының жылдамдықтары артады.

Жылу мөлшері және жылусыйымдылығы. Жылутегі теориясы жалған болып табылғанына қарамастан, оны жақтаушылардың енгізген ұғымдары физикада осы күнге дейін кең пайдаланылады. Солардың біреуі — жылу мөлшері.

Жылу мөлшері дегеніміз — жылу берілу процесінде бір денеден екінші денеге берілетін энергия.

Жұмыс ұғымы сияқты термодинамикалық жүйенің күйіне қолданғанда емес, термодинамикалық процеске қолданғанда ғана жылу мөлшері ұғымының мағынасы болады. Мысалы, жүйенің жинаған жылу мөлшері туралы айтудың мағынасы жоқ. Температуралар айырмасының нәтижесінде бір денеден екіншіге берілетін энергияға қатысты ғана жылу мөлшері туралы айтуға болады.

Ішкі энергияны өзгертудің екі тәсілі. Сонымен, термодинамикалық жүйенің ішкі энергиясын өзгертудің екі әртүрлі әдісі бар: 1) жұмыс атқару арқылы; 2) жылу берілу үдерісінде. Мысалы, қозғалтқыштың цилиндріндегі қыздырылған газ ешқандай жұмыс атқармай, қоршаған ортаға жылу беру нәтижесінде өзінің ішкі энергиясын жоғалтып, салқындауы мүмкін. Бірақ ол, жылудан оқшауланған, яғни қоршаған ортамен жылу алмасуы болмаған жағдайда да, поршеньнің орнын ауыстыру жұмысын атқара отырып та өзінің ішкі энергиясын және температурасын азайта алады.

Жылусыйымдылығы. Денені 1 К қыздыру үшін қажетті жылу мөлшері әр дене үшін әртүрлі екенін сендер 8-сыныптың физика курсынан білесіңдер. Сондықтан денелердің жылудық қасиеттерін сипаттау үшін жылусыйымдылығы деп аталатын шаманы қолданады.

Дененің жылусыйымдылығы деп оның температурасын 1 К өзгерту үшін денеге берілетін немесе денеден алынатын жылу мөлшерін айтады.

Заттарды сипаттау үшін меншікті жылусыйымдылық деп аталатын шаманы қолданады.

Меншікті жылусыйымдылығы деп температурасын 1 К өзгерту үшін 1 кг затқа берілетін немесе одан алынатын жылу мөлшерін айтады. Заттың меншікті жылусыйымдылығын c әрпімен белгілейді.

Меншікті жылусыйымдылықтың анықтамасынан оның өлшем бірлігін $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ және формуласын анықтауға болады:

$$c = \frac{Q}{m\Delta t} \quad (35.1)$$

Газдар үшін мольдік жылусыйымдылығын пайдаланған қолайлы. Заттың молярлық жылусыйымдылығын C әрпімен белгілейді.

Мольдік жылусыйымдылығы деп температурасын 1 К өзгерту үшін 1 моль затқа берілетін немесе одан алынатын жылу мөлшерін айтады.

Меншікті жылусыйымдылығы мольдік жылусыйымдылығымен мына қатынаспен байланысты:

$$c = \frac{C}{M}, \quad (35.2)$$

мұндағы M — заттың мольдік массасы.

Мольдік жылусыйымдылық $\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{К})}$ бірлігімен өлшенеді де, мына формуланың көмегімен өрнектеледі :

$$C = Mc = \frac{M}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T}. \quad (35.3)$$

(35.1) және (35.3) формулалары арқылы берілген зат массасының температурасын ΔT өзгерту үшін қажетті Q жылу мөлшерін есептей аламыз:

$$Q = mc \Delta T, \quad Q = \frac{m}{M} C \Delta T. \quad (35.4)$$

Тұйық термодинамикалық жүйедегі жылу алмасу. Денелер температуралары теңесіп, жылулық тепе-теңдік орнағанда денелердің арасында жылу алмасуы тоқтайтыны бізге мәлім. Сыртқы ортадан оқшауланған термодинамикалық жүйе денелерінің арасындағы жылу алмасуды қарастырайық. Мұндай жүйені *тұйық* деп атайды. Егер жүйеге кіретін денелер ешқандай жұмыс атқармаса, онда жүйенің кез келген денесінің ішкі энергиясының өзгерісі жүйеде жылулық тепе-теңдік орнамай тұрғандағы дененің алған немесе берген жылу мөлшерінен туындайды. Ал денелердің қосынды ішкі энергиясы өзгермейтіндіктен, тұйық жүйенің әр денесінің алған немесе берген жылуларының қосындысы да өзгермейді:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0. \quad (35.5)$$

Бұл теңдеуді *жылу баланс теңдеуі* деп атайды. Теңдеудегі жылу мөлшерлері (35.1) және (35.2) формулалармен есептеледі және олардың таңбалары оң да, теріс те болуы мүмкін.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай құбылыс жылу берілуі деп аталады?
2. Жылу берілудің қандай түрлері бар?
3. Жылу мөлшері деп біз нені түсінеміз?
4. Неліктен жүйенің жинаған жылу мөлшері туралы айтудың мағынасы жоқ?
5. Жылу мөлшері күй функциясына жатады ма?

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

1. Термометр және мензурканы қолдана отырып, судың жылусыйымдылығын анықтаңдар. Алынған шешімді кестелік мәнімен салыстырыңдар және олардың арасындағы айырмашылықты түсіндіріңдер.

2. 200 см³ стақанның төрттен үш бөлігін қайнаған сумен толтырыңдар. Қалған бөлігін температурасы 10°C суық су құйыңдар. Судың температурасын өлшеңдер. Жылулық баланс теңдеуін қолдана отырып, температураның есептік мағынасын анықтаңдар. Алынған нәтижелерді салыстырыңдар. Арасындағы айырмашылықты түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

1. Неліктен зеңбірек ұңғысы снарядпен атылғанына қарағанда оқсыз ату кезінде қатты қызады?

2. Заттың микроқұрылымы туралы біліміне сүйене отырып, жылу берілу механизмін түсіндіріңдер.

Талдаңдар

Изотермиялық процесс кезінде газдың жылусыйымдылығы неге тең?

Шығарыңдар

1. Массасы 12 кг жез ыдыстағы 19 л суды 211°C температураға дейін қыздыру үшін қанша жылу мөлшері қажет? $c_x = 380 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$

Жауабы: 6,7 МДж

2. 1073 К дейін қыздырылған массасы 0,5 г темір болатты қатайту үшін температурасы 288 К массасы 10 кг суға салынды. Темір болат қандай температураға дейін салқындайды?

Жауабы: 292,3 К

3. Температурасы 37°C болатын қоспа алу үшін температурасы 10°C тең 200 кг суға температурасы 100°C қанша су құю керек?

Жауабы: 85,7 К

Рефлексия

1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 36. Термодинамиканың бірінші заңы



Тірек ұғымдар: энергияның сақталу және түрлену заңы, термодинамиканың бірінші заңы.

Бүгінгі сабақта: термодинамиканың бірінші заңының мағынасын механикалық және жылулық энергияға қолданылатын энергияның сақталу заңы ретінде түсінесіңдер.

XIX ғасырдың ортасына таяу энергияның әр түрлерінің өзара айналулары туралы көптеген тәжірибелік деректер алынды. Мысалы, ауыр тақтамен соқтығысқаннан кейін ұшып келе жатқан қорғасын оқтың механикалық (кинетикалық) энергиясы жылуға айналады. Маятниктің тербелмелі қозғалысының энергиясы ауаның кедергісін жеңуге кетіп, маятник пен оны қоршаған ауаның ішкі энергиясына айналады. Мұнымен қатар денелердің тұйық жүйесінде энергияның қандай да болмасын түрленулері болса да, жүйенің толық энергиясы өзгеріссіз қалатындығы анықталды.

Сөйтіп, сансыз көп бақылаулар мен тәжірибелер нәтижелерінің негізінде энергияның сақталу және түрлену заңы тағайындалды:

Табиғатта энергия жоқтан пайда болмайды және жоғалып кетпейді; ол тек бір түрден басқа түрге, бір денеден басқа денеге ауысады, ал денелердің тұйық жүйесіндегі толық энергия өзгеріссіз қалады.

Энергияның сақталу және түрлену заңын тағайындауға занның теориялық қағидаларын ұсынған неміс дәрігері және табиғат зерттеушісі Р. Майер (1814—1878), тәжірибелік зерттеулер жүргізген ағылшын ғалымы Дж. Джоуль (1818—1889), энергияның сақталу заңының математикалық өрнегін тапқан және алынған нәтижелерді табиғаттың барлық құбылыстарына жалпыланған нәтижелерін талдаған неміс ғалымы Г. Гельмгольц (1821—1894) зор үлес қосты.

Термодинамикада тұтастай алынған дененің механикалық энергиясын қарастырмайды. Мұнда дененің ішкі энергиясының өзгерісін қарастыру маңызды. Біз білетіндей, бұл өзгеріс жұмыс атқару немесе жылу берілу процестерінің нәтижесінде жүзеге асады. Термодинамикалық жүйенің ішкі энергиясының өзгерісі осы екі процестің әр қайсысы бірдей уақытта жүрген жағдайда да орын алуы мүмкін. Мұндай жағдайлар үшін қолданылатын энергияның сақталу және түрлену заңы термодинамиканың бірінші заңы болып табылады.

Бір күйден екінші күйге ауысу кезінде термодинамикалық жүйенің ішкі энергиясының өзгеруі жүйемен атқарылатын жұмыс және жүйеге берілген жылу мөлшерінің қосындысына тең:

$$\Delta U = A' + Q, \quad (36.1)$$

мұндағы A' — сыртқы күштердің жүйемен атқарған жұмысы.

Сыртқы күштердің жүйемен атқарған A' жұмысы мен жүйенің сыртқы денелерге қарсы атқаратын A жұмысы $A' = -A$ теңдігімен

байланысқанын ескерсек, термодинамиканың бірінші заңын келесі түрде жазуға болады:

$$Q = \Delta U + A. \quad (36.2)$$

Термодинамикалық жүйеге берілетін жылу мөлшері оның ішкі энергиясының өзгеруі және жүйенің сыртқы денелерге қарсы атқаратын жұмысына шығындалады.

Сонымен, термодинамиканың бірінші заңы жылу құбылыстарына арналған энергияның сақталу және түрлену заңының жалпы өрнегі болып табылады.

Бірінші текті мәңгі қозғалтқышты жасаудың мүмкінсіздігі. Термодинамиканың бірінші заңынан бірінші текті мәңгі қозғалтқышты, яғни өзіне берілетін энергиядан артық жұмыс атқара алатын және циклді режимде жұмыс істейтін қияли механизмді жасаудың мүмкінсіздігі жайлы маңызды тұжырым туындайды. Шынымен, қозғалтқыштың циклдік режимде жұмыс істеуі оның жұмыс денесі периодты түрде бастапқы күйге оралатындығын білдіреді. Олай болса, дененің ішкі энергиясының бастапқы және соңғы күйдегі мәндері бірдей: $U_2 = U_1$, демек, ішкі энергияның өзгерісі нөлге тең: $\Delta U = U_2 - U_1 = 0$. Онда (36.2) теңдеуге сәйкес $Q = A$. Яғни, қозғалтқыштың атқарған жұмысы оған берілетін жылудан, мысалы, отынның жануы кезінде қозғалтқыштың алатын жылуынан ешқашан үлкен бола алмайды.

Париж Ғылым академиясының шешімі бойынша мәңгі қозғалтқыш жобалары қарастырылмайтын болды.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Неліктен энергияның сақталу және түрлену заңы әмбебап сипатта болады?
2. Термодинамиканың бірінші заңы қалай тұжырымдалады?
3. Термодинамикада бірінші текті мәңгі қозғалтқыш деп нені түсінеді?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

1. Аяз қатты емес күні үздіксіз автомобиль қозғалысының әсерінен жолдардағы қардың қалай еритінін бақылаңдар. Бұл құбылысты түсіндіріңдер.
2. Қыс мезгілінде далада тұрған бос бөтелкенің аузын тығынмен жауып, жылы бөлмеге кіргізейік. Біраз уақыттан соң бөтелкедегі тығын ұшып шығады. Не себепті тығын да кинетикалық энергияға ие болады?

Түсіндіріңдер

1. Неліктен бұрғымен ағашты бұрғылағанда бұрғы қызады?
2. Неліктен арқан жібімен арқылы төмен жылдам түскен кезде қолыңды күйдіріп алуға болады?

Ойлап табыңдар

Энергияның бір түрден екіншісіне түрлену құбылыстары туралы мысал есептер ойлап табыңдар.

Шығарыңдар

1. Массасы 10 т автокөлік 28,8 км/сағ жылдамдықпен қозғалып келеді және тежелу нәтижесінде тоқтайды. Егер автокөліктің барлық кинетикалық энергиясы ішкі энергиясына айналса, тежелу кезінде қанша жылу бөлінеді?

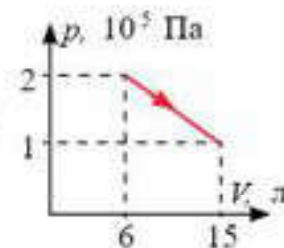
Жауабы: 320 кДж

2. Температурасы 0°C бұршақ температурасы 0°C -қа жолға құлады. Ауаның температурасы биіктікке қарай өзгермейді және ол да 0°C тең. Толығымен еріп кету үшін бұршақ қандай биіктіктен құлауы керек? Ауа кедергісін ескермеңдер. Мұздың меншікті балқу жылуы $3,34 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Жауабы: 54 км

3. 36.1-суретте көрсетілгендей, көмірқышқыл газы екі мольге ұлғаяды. Есептеңдер: газдың атқарған жұмысын; ішкі энергияның өзгеруін; газға берілген жылу мөлшерін.

Жауабы: $A = 1350$ Дж; $U = 750$ Дж; $Q = 2100$ Дж



36.1-сурет

Рефлексия

1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 37. Термодинамиканың бірінші заңын изопрцестерге қолдану



Тірек ұғымдар: изохоралық процесс, изобаралық процесс, изотермиялық процесс, универсал газ тұрақтысы, Майер формуласы.

Бүгінгі сабақта: термодинамиканың бірінші заңын әртүрлі изопрцестерге қолдануды үйренесіңдер; универсал газ тұрақтысының физикалық мағынасын білесіңдер; изобаралық және изохоралық процестегі идеал газдың мольдік жылу сыйымдылықтарының арасындағы байланысты орнатасыңдар.

Термодинамиканың бірінші заңын әртүрлі изопрцестерге қолданып көрейік.

Изохоралық процесс. Газды жүретін изохоралық процесс кезінде газ көлемі өзгеріссіз қалады. Олай болса, бұл процесте жұмыс атқарылмайды ($A = 0$). Мұны ескеретін болсақ, термодинамиканың бірінші заңының $Q = \Delta U + A$ теңдеуі мына түрде жазылады:

$$Q = \Delta U. \quad (37.1)$$

(37.1) теңдеуден газды изохоралық қыздырғанда ($Q > 0$) оның ішкі энергиясы артатынын ($\Delta U > 0$) көруге болады. Ал егер газды суытатын болсақ ($Q < 0$), онда оның ішкі энергиясы кемиді ($\Delta U < 0$).

Сонымен қоса (37.1) теңдеу бізге изохоралық процестегі газдың мольдік жылу сыйымдылығын анықтауға мүмкіндік береді. Біратомды идеал газының изохоралық процестегі C_V мольдік жылу сыйымдылығын анықтайық. Мольдік жылу сыйымдылықтың анықтамасына сәйкес

$$C = \frac{M}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T},$$

Бұл өрнекте Q жылу мөлшерін (37.1) теңдеуіне сәйкес ішкі энергияның ΔU өзгерісіне алмастырайық:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Сонда

$$C_V = \frac{M}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T} = \frac{M}{m} \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T}{\Delta T} = \frac{3}{2} R. \quad (37.2)$$

Екі атомды идеал газы үшін ұқсас есептеулер келесі өрнекті береді:

$$C_V = \frac{5}{2} R. \quad (37.3)$$

Изобаралық процесс. Изобаралық қыздыру кезінде газдың көлемі тұрақты болып қалмайтындықтан, газ жұмыс атқару мүмкіндігіне не болады. Сондықтан, термодинамиканың бірінші заңын бұл жағдайда

онын толық түрінде жазу керектігі түсінікті: $Q = \Delta U + A$. Идеал газдың $pV = \frac{m}{M}RT$ күй теңдеуін ескере отырып, изобаралық процестегі $A = p\Delta V$ жұмысты температураның өзгерісі арқылы жазуға болады:

$$A = p\Delta V = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1) = \frac{m}{M}R\Delta T.$$

Бұл өрнектен R универсал газ тұрақтысының физикалық мағынасын түсіну қиын емес: *универсал газ тұрақтысы деп сан жағынан, 1 моль идеал газды тұрақты қысымда 1 К қыздырғандағы ұлғаю жұмысына тең физикалық шаманы айтады.*

Изобаралық және изохоралық процестері үшін газдың температурасын 1 К өзгертуге кететін жылу мөлшерлерін салыстырайық. Бірінші жағдайда көбірек жылу мөлшері қажет екені айқын. Оны түсіндіру оңай: қысымның тұрақты болу шарты көлемге еркін ұлғаю, яғни жұмыс атқару мүмкіндігі берілгенін талап етеді. Олай болса, газға берілетін жылу мөлшері изохоралық процестегідей тек оның ішкі энергиясының өзгерісіне ғана емес, сонымен қоса газдың ұлғаю жұмысына да кетеді. Демек, газдың изобаралық процестегі жылусыйымдылығы оның изохоралық процестегі жылусыйымдылығынан үлкен болуы тиіс.

Тұрақты қысымдағы біратомды идеал газының C_p мольдік жылусыйымдылығын анықтайық. Бұл процесте жылу мөлшері $Q = \Delta U + A$ болғандықтан,

$$Q = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M}R\Delta T + \frac{m}{M}R\Delta T = \frac{5}{2} \cdot \frac{m}{M}R\Delta T.$$

Олай болса

$$C_p = \frac{M}{m} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{M}{m} \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M}R\Delta T}{\Delta T} = \frac{3}{2}R. \quad (37.4)$$

Екіатомды идеал газ үшін

$$C_p = \frac{7}{2}R. \quad (37.5)$$

Изохоралық (37.2), (37.3) және изобаралық (37.4), (37.3) процестердегі газдың мольдік жылусыйымдылықтарын салыстыра отырып, олардың арасындағы байланысты табуға болады:

$$C_p - C_v = R. \quad (37.6)$$

Майер формуласы деп аталатын бұл байланысты алғаш рет Р. Майер алған болатын.

Изотермиялық процесс. Изотермиялық процесс кезінде газ температурасы, демек, оның ішкі энергиясы өзгермейді $\Delta U = 0$. Сондықтан

газға берілген жылу мөлшерінің барлығы толығымен газдың атқаратын жұмысына кетеді:

$$Q = A. \quad (37.7)$$

(37.7) өрнегінен изотермиялық ұлғаю кезінде газ оған беретін жылу мөлшері ($Q > 0$) есебінен оң жұмысты ($A > 0$) атқаратынын көруге болады. Ал изотермиялық сығылу кезінде газ теріс жұмыс атқарады да ($A < 0$), одан жылу алынады ($Q < 0$).

Изотермиялық процесс кезінде газдың жылусыйымдылығын шексіз үлкен деп санауға болады. Шынымен, газға қандай болмасын жылу мөлшері берілсе де, ол қызбайды, себебі оның температурасы өзгермеуі тиіс.

Изотермиялық процесс кезінде газдың жылусыйымдылығының шексіздігін математикалық жолмен де көрсетуге болады:

$$C_T = \frac{M}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T} = \frac{M}{m} \cdot \frac{Q}{0} = \infty,$$

мұндағы $\Delta T = 0$ болғандықтан бөлшектің бөлімі нөлге тең.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Не себептен кейбір мөлшерде алынған газдың жылусыйымдылығы онымен жасалатын процеске тәуелді болады?
2. Изотермиялық процесс кезінде газдың жылусыйымдылығының мәні неге тең?
3. Идеал газдың бірдей массасын 1 К қыздырайық: бірінші рет тұрақты көлемде, екінші рет – тұрақты қысымда. Осы жағдайлардың қайсысы көбірек жылу мөлшерін қажет етеді?



Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

Неліктен тұрақты қысымдағы газдың жылусыйымдылығы оның тұрақты көлемдегі жылусыйымдылығынан үлкен болады?

Зерттеңдер

Идеал газ жылусыйымдылығының таңбасы теріс мәнге ие болатындай процеске мысал келтіріңдер.

Талдаңдар

Газдың жылусыйымдылығы тұрақты болатын процестерді политроптық деп атайды. Бізге белгілі изопроцестердің барлығы политроптық процестерге жататынын дәлелдендер.

Шығарыңдар

1. Тұрақты қысымда массасы 1 кг гелийді 100 К қыздырайық. Мыналарды анықтаңдар: а) газға берілген жылу мөлшерін; ә) газдың ұлғаю жұмысын; б) газдың ішкі энергиясының ұлғаюын.

Жауабы: а) 520 Дж; ә) 208 Дж; б) 312 Дж

2. Изобаралық ұлғаю кезінде азот 2,0 Дж жұмыс атқару үшін газға қанша жылу мөлшерін беру керек?

Жауабы: 7 Дж

3. Ұлғаю кезінде сутек 6 кДж жұмыс атқарды. Газдың ұлғаюы: а) изобаралық; ә) изотермиялық болған жағдайлар үшін газға берілген жылу мөлшерін анықтаңдар.

Жауабы: а) 21 кДж; ә) 6 кДж

4. Идеал екіатомды газды изобаралық қыздыру үшін оған 12 МДж жылу берілді. Газдың атқарған жұмысын және оның ішкі энергиясының өзгерісін анықтаңдар.

Жауабы: $A = 3,4$ МДж; $\Delta U = 8,6$ МДж

5. Зат мөлшері 1 моль, температурасы 300 К оттекті изотермиялық ұлғайту үшін оған 2 кДж жылу мөлшері берілді. Газ көлемі неше есе артады?

Жауабы: 2,23 есе

*6. Кейбір екіатомды газдың қалыпты жағдайдағы тығыздығы $\rho = 1,43$ кг/м³ тең. Олардың меншікті жылусыйымдылығын табыңдар.

Жауабы: $2C_v = 650 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$; $C_p = 910 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$

Рефлексия

1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 38. Адиабаталық процесс



Тірек ұғымдар: адиабаталық процесс, Пуассон теңдеуі, адиабата көрсеткіші.

Бүгінгі сабақта: адиабаталық процесті және оның өту шарттарын білесіңдер, адиабаталық процесс теңдеуімен танысасыңдар.

Сендер изопроцестерде газдың макроскопиялық параметрлерінің біреуі өзгеріссіз қалып, ал қалған екеуі өзгеретінін білесіңдер. Алайда газдың p , V , T макроскопиялық параметрлерінің үшеуі де өзгертін процестер болады. Солардың ішіндегі біздің үлкен қызығушылығымызды тудыратын *адиабаталық процесс*.

Термодинамикалық жүйе мен қоршаған орта арасында жылу алмасу жүрмейтін процесті адиабаталық процесс деп атайды.

Адиабаталық процестегі газдың жұмысы. Анықтамаға сәйкес адиабаталық процесте $Q = 0$. Олай болса адиабаталық процесс үшін термодинамиканың бірінші заңын мына түрде жазуға болады:

$$A = -\Delta U. \quad (38.1)$$

(38.1) формуласына сәйкес, газ адиабаталық ұлғаюдың оң жұмысын атқару кезінде ($A > 0$) салқындайды, өйткені оның ішкі энергиясы өзгеруінің таңбасы теріс болуы тиіс ($\Delta U < 0$). Ал керісінше, адиабаталық сығылғанда ($A < 0$), газ қызды, өйткені оның ішкі энергиясы $\Delta U > 0$ атады. Молекулалық тұрғыдан газ температурасының өзгеруін алдыңғы параграфта қарастырдық.

Адиабаталық процесті енгізу әдісі. Табиғатта идеал адиабаталық процесс болмайды, өйткені жүйе мен қоршаған ортаның арасындағы жылу алмасуды мүлдем болдырмау мүмкін емес. Алайда, адиабаталық процеске жақын деп санауға болатын жағдайларды іс жүзінде жүзеге асыруға болатын жолдары бар:

1. Жылу алмасу үдерісі өтіп үлгермеу үшін, процесс өте жылдам өту қажет. Адиабаталық процесті жүзеге асырудың осы әдісі ретінде насостың көмегімен велосипед камерасына тез жел үрлеуді қарастыруға болады. Жылдам өтетін адиабаталық сығылуды кейбір жылу қозғалтқыштарда ауа мен жанармай қоспасын қыздыру үшін пайдаланады. Дизель қозғалтқышы деп аталатын солардың біреуінің жұмыс істеу принципімен сендер осы тараудың соңында танысасындар.

2. Процесс газдың өте үлкен массасымен өту тиіс. Жер атмосферасындағы ауа массаларының салқындау процестері, адиабаталық процесті жүзеге асырудың дәл осы әдісінің мысалы болып табылады.

Адиабаталық процестің теңдеуі. Адиабаталық процесте температура тұрақты болмағандықтан, газ қысымы мен оның көлемі арасындағы байланыс изотермиялық процестегідей ($pV = \text{const}$) болмайды. Есептеу

арқылы адиабаталық процесс кезінде $p(V)$ тәуелділігі *Пуассон теңдеуі* деп аталатын формуламен өрнектеледі:

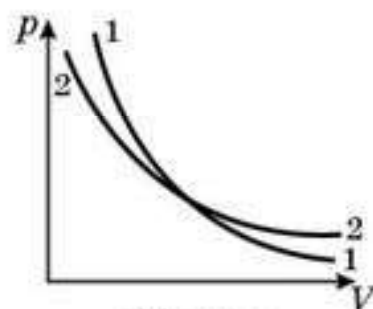
$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (38.2)$$

мұндағы γ — берілген газдың адиабата көрсеткіші, тұрақты шама.

Адиабата көрсеткіші γ идеал газдың тұрақты қысым кезіндегі мольдік жылу сыйымдылығының газдың тұрақты көлеміндегі мольдік жылу сыйымдылығы арасындағы қатынасына тең:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (38.3)$$

Адиабаталық процестің графигі. pV координаталарында Бойль—Мариотт ($pV = \text{const}$) заңын және ($pV^\gamma = \text{const}$) Пуассон теңдеуін пайдалана отырып, изотермиялық (изотерма) және адиабаталық (адиабата) процестердің графиктерін салыстыра аласыңдар. 38.1-суреттен *адиабата* деп аталатын адиабаталық процестің графигі (1) изотермиялық процестің графигіне (2) карағанда тіктеу болып келеді. Оны былай



38.1-сурет

түсіндіруге болады: изотермиялық ұлғаю кезінде газ қысымының төмендеуіне тек көлемнің артуы себепті болса, адиабаталық ұлғаю кезінде қысымның төмендеуіне екі фактор бірдей ықпал етеді: газ көлемінің артуы және температураның кемуі.

Екі графиктің арасындағы айырмашылықты математикалық жолмен де түсіндіруге болады. Біз изотермиялық процесс кезінде газдың қысымы оның көлемінің бірінші дәрежесіне кері пропорционал заң бойынша: $p \sim \frac{1}{V}$ (Бойль—Мариотт заңы), өзгертін білеміз, ал, жоғарыда адиабаталық процесте газ қысымының көлемге тәуелділігі, $p \sim \frac{1}{V^\gamma}$ заңына бағынатыны айтылған. Адиабата көрсеткіші $\gamma = \frac{C_p}{C_v} > 1$ екенін ескерсек, адиабаталық процесс үшін pV тәуелділігінің графигі тіктеу болатыны айқын.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Адиабаталық ұлғаю кезінде идеал газдың температурасы қалай өзгереді?
2. Жұмыс денесіне берілген толық жылу мөлшерін механикалық жұмысқа айналдыруға болатындай, тұйық процесті жүзеге асыру мүмкін бе?
3. Газ адиабаталық окшаулауда бола тұра, теріс жұмыс атқарсын. Оның ішкі энергиясы қалай өзгереді?
4. Жүйеге берілген жылу, әрқашан температураның жоғарылауына әкеледі ме? Неге Түсіндіріңдер.

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Аспандағы бұлттардың қозғалысын бақылау арқылы адиабаталық процестің бұлттардың түзілуіне қалай әсер ететінін түсіндіріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

Дьюар ыдысына (термос) қайнап тұрған ыстық су құйыңдар. Біраз уақыт өткен соң термостағы судың температурасын өлшеңдер. Судың салқындағаны арқылы дәлелденетін адиабаталық шарттардың бұзылуына қандай факторлар ықпал еткенін түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

Адиабата үшін $p(V)$ тәуелділігінің қисығы изотермамен салыстырғанда неліктен жылдам жүретінін түсіндіріңдер.

Зерттеңдер

Сыртқы ортамен жылу алмасуын елемеуге болатындай аз адиабаталық процесті жүзеге асырудың қандай екі тәсілін ұсынар едіңдер?

Талдаңдар

Адиабаталық процесте газдың жылусыйымдылығының мәні неге тең болу тиіс?

Шығарыңдар

1. 1 кг оттегі адиабаталық сығу кезінде 100 кДж жұмыс атқарады. Егер сығылғанға дейінгі оттектің температурасы 300 К болса, онда газдың соңғы температурасы неге тең?

Жауабы: 454 К

2. Біратомды идеал газ адиабаталық ұлғайған кезде оның температурасы екі есе артады. Газдың температурасы неше есе өзгереді?

Жауабы: 1,6 есе кемиді

3. Екіатомды идеал газдың адиабаталық ұлғаю кезінде оның бастапқы көлемі 40 есе артты. Газдың қысымы және температурасы неше есе өзгерді?

Жауабы: $\frac{p_1}{p_2} = 175$; $\frac{T_1}{T_2} = 4,4$

Рефлексия

1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 39. Жылу қозғалтқыш. Жылу қозғалтқышының пайдалы әсер коэффициенті



Тірек ұғымдар: жылу қозғалтқыштары, циклдік процесс, қыздырғыш, суытқыш, жұмыс денесі, жылу қозғалтқышының ПӘК.

Бүгінгі сабақта: жылу қозғалтқышының жұмыс істеу принципімен танысаңыздар; жылу қозғалтқышының ПӘК-і не екенін білесіңдер; әртүрлі циклдердің ПӘК-ін есептеуді үйренесіңдер.

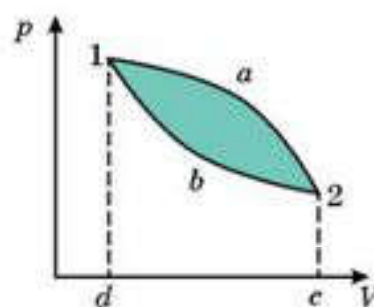
Адамзат механикалық жұмыс жасауға арналған қозғалтқыштарды ұзақ уақыт бойы қолданып келеді. Қандай энергияны механикалық энергияға айналдыратынына байланысты қозғалтқыштар жылулық, механикалық және электрлік болып бөлінеді. Әсіресе жылулық қозғалтқыштар кенінен қолданылады. *Ішкі энергияны механикалық энергияға айналдыратын қозғалтқыштарды жылу қозғалтқыштары деп атайды.*

Циклдік процесс. Жылу қозғалтқыштардың құрылысы алуан түрлі, алайда бәріне ортақ бір қасиет бар, ол — оның циклділігі. *Циклді процесс дегеніміз термодинамикалық жүйе бірқатар аралық күйден өте отырып, бастапқы күйіне қайтып оралуын айтады.* Циклдік процестің графигі тұйықталған қисық болып келеді (39.1-сурет). Циклдік процесте атқарылатын жұмыс тұйықталған қисықпен қамтылған фигураның ауданына тең болады. Осы тұжырымдаманың шындығын дәлелдеу үшін термодинамикалық жүйе ретінде кейбір газдың массасын аласыңдар.

Газ ұлғайғанда атқарылатын A_1 оң жұмыс $d1a2c$ фигураның ауданы болып табылады. Газ сығылғанда, газдың жұмысы теріс A_2 және $d1b2c$ фигураның ауданы болады. Онда газдың бір циклде жасайтын жұмысы $A = A_1 - A_2$ және $1a2b1$ тұйықталған фигураның ауданымен анықталады.

Жылу қозғалтқышының жұмыс істеу принципі. Кез келген жылу қозғалтқыштары қыздырғыш, жұмыс денесі және суытқыштан тұрады (39.2-сурет). Жылу қозғалтқышпен орындалатын цикл уақытында: (1) жұмыс денесі, әдетте газ қолданылады, қыздырғыштан Q_1 жылу мөлшерін алып, (2) ішкі энергиясының артуының әсерінен A жұмыс атқарады да, (3) суытқышқа Q_2 жылу мөлшерін береді.

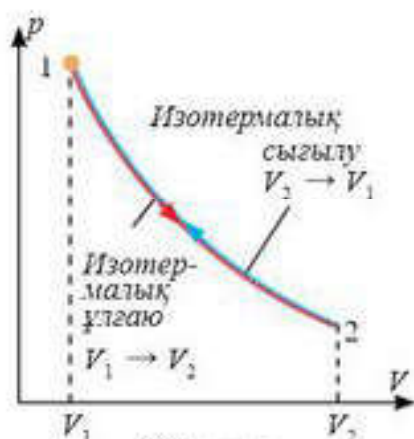
Суытқыштың қажеттілігі. Q_2 жылудың суытқышқа беру қажеттілігін қарастырайық.



39.1-сурет



39.2-сурет



39.3-сурет

Ол үшін жұмыс денесі ретінде қозғалатын поршеньнің астындағы газды алындар. Газ қыздырғыштан жылу алып, 1 күйден 2 күйге дейін изотермиялық ұлғайып, поршеньді көтеру жұмысын атқарады (39.3-сурет). Жүйе қозғалтқыш болады ма? Жок, себебі бұл процесс дөңгелек емес. Циклді аяқтау үшін газды бастапқы көлемге дейін сығып, бастапқы 1 күйге келтіру керек. Егер газды қыздырғыштың температурасындай температурада сығатын болсақ, онда газдың сыққан кездегі жұмысы оның ұлғаю кезіндегі жұмысына шамасы

бойынша тең, бірақ таңбасы бойынша теріс болады: $A_{2-1} = -A_{1-2}$. Сонында толық бір циклде газдың атқаратын жұмысы нөлге тең болып қалады. Демек, бір циклде пайдалы жұмыс нөлге тең болмау үшін, газды бастапқы күйге дейін сығу кезінде, газдың температурасы қыздырғыштың температурасынан төмен болу қажет. Міне, сол себептен сыққан кезде газдың температурасын төмендететін, екінші жылулық резервуарда — суытқыш болуы қажет.

Сонымен, жұмыс денесінің атқаратын процесі циклді болғандықтан, дененің бастапқы және соңғы ішкі энергиялары бірдей, демек, $\Delta U = 0$. Онда, термодинамиканың бірінші заңына сәйкес, жылу қозғалтқыштың бір циклде атқаратын A жұмысы цикл уақытында қыздырғышқа берілетін $Q_{\text{қос}}$ қосынды жылу мөлшеріне тең: $A = Q_{\text{қос}}$.

39.1-суреттен $Q_{\text{қос}} = |Q_1| - |Q_2|$ тең екенін көріп отырмыз. Q_1 және Q_2 модульмен алынған, олардың бағытын көрсету үшін “+” немесе “-” таңбалары қойылған. Олай болса, $A = |Q_1| - |Q_2|$.

Жылу қозғалтқышының ПӘК. Жылу қозғалтқыштың пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) деп қозғалтқыштың бір циклде атқаратын жатты жұмысының сол циклде газға берілетін жылу мөлшеріне қатынасын айтады:

$$\eta = \frac{A}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}. \quad (39.1)$$

(39.1) формуладан көріп отырғанымыздай, жылу қозғалтқыштарының ПӘК мәні 1 немесе 100%-ға тең болмайды.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай процесс циклдік процесс деп аталады?
2. Қандай қондырғыны жылу қозғалтқыш деп атайды?
3. Жылу қозғалтқышта суытқыштың рөлі қандай?
4. Пайдалы әсер коэффициенті дегеніміз не?
5. Неге жылу қозғалтқышының ПӘК мәні 100%-ға тең болмайды?



Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

Изотермалық ұлғаю кезінде газдың атқарған жұмысы сандық мәні бойынша, оған берілген жылу мөлшеріне тең. Ол ПӘК бірге тең болатын жылу қозғалтқышты жасауға мүмкін екенін білдіреді ме?

Шығарыңдар

1. Жылу қозғалтқышының ПӘК-і 40%. Егер жылу қозғалтқышының жұмысын жақсарту мақсатында жылу қозғалтқышынан алатын жылу мөлшерін 20%-ға арттырып, ал суытқышқа беретін жылу мөлшерін 20%-ға төмендетейік. Осыдан кейін қозғалтқыштың ПӘК-і қалай өзгереді?

Жауабы: 60%

2. Бір моль екіатомды идеал газ графигі 39.4-суретте көрсетілгендей 1—2—3—4—1 циклді процесс жасайды. P_0V_0 белгілі деп есептеп, циклдің ПӘК-ін табыңдар.

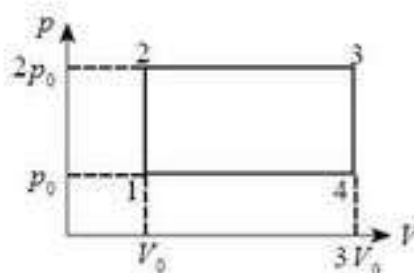
Жауабы: 12%

3. Бір моль біратомды идеал газ графигі 39.5-суретте көрсетілгендей 1—2—3—4—1 циклді процесс жасайды. V_0T_0 белгілі деп есептейік, циклдің ПӘК-ін есептеңдер.

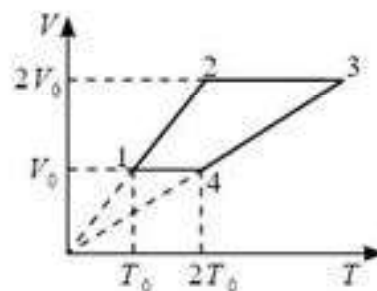
Жауабы: 15%

4. Егер циклде қысым 2 рет өзгертін болса, екі изобара және екі адиабатадан тұратын циклдің ПӘК-ін табыңдар. Жұмыс денесі ретінде азот алынған.

Жауабы: 18%



39.4-сурет



39.5-сурет

Рефлексия

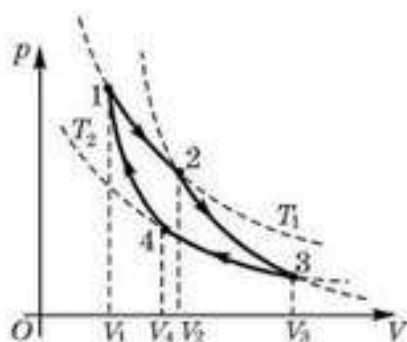
1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 40. Карно циклі. Карно циклінің ПӘК



Тірек ұғымдар: Карно жылу қозғалтқышы, Карно циклінің ПӘК.

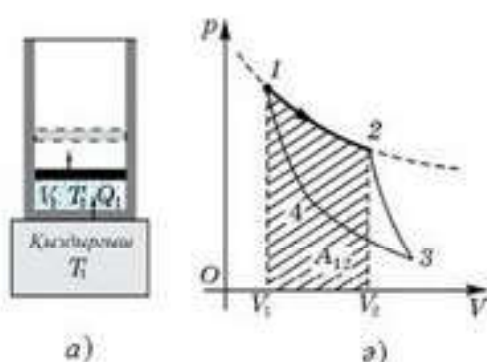
Бүгінгі сабақта: Карно жылу қозғалтқышымен, Карно циклімен танысаңыздар; Карно циклінің ПӘК-ін есептеуді үйренесіздер.



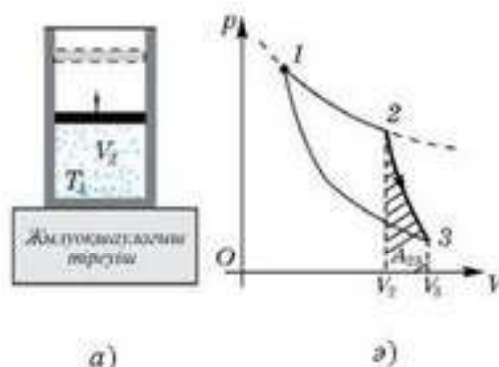
40.1-сурет

Сади Карноның идеал жылу машинасы. XIX ғасырдан бастап жылу машиналары кең тарай бастады. Бірақ бұл машиналардың ПӘК-і өте төмен болды. Бу машиналарында ПӘК бар болғаны 8—9%, ал алғашқы поршеньді іштен жаңу қозғалтқыштарында 12—20%. Жылу машиналарының ПӘК-ін қалай көтеруге болады деген мәселе туды. Бұл мәселені шешуде француз физигі Сади Карно көп еңбек етті. Ол өзінің зерттеулерінің нәти-

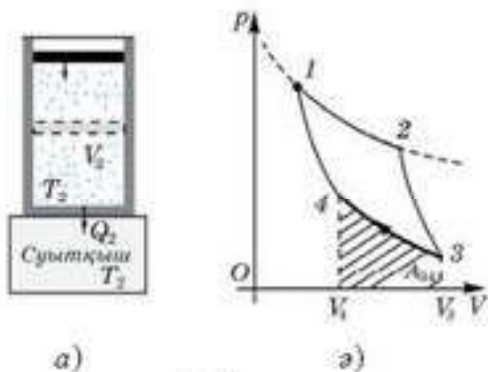
жесін 1824 жылы “Оттың қозғаушы күші және осы күшті пайдалана алатын машиналар туралы ойлар” деген еңбегінде жария етті. С. Карно максимал мүмкін ПӘК бар идеал машина жасамақ болды (теориялық жолмен). Оның идеал жылу машинасы идеал газбен және ешқандай шығынсыз жұмыс істейтін еді. Мұндай теориялық машинаның жұмыс істейтін циклі *Карно циклі* деп аталды. Ол екі изотермадан және екі адиабатадан тұратын тұйықталған және төмендегідей ретпен өтетін процесс (40.1-сурет). Түбі жылуды жақсы өткізетін цилиндрдің ішіндегі поршень астындағы газ температурасы T_1 болатын қыздырғыштан жылу алады (40.2, а-сурет). Изотермалық түрде ұлғая отырып, газ A_{12} жұмыс атқарады (40.2, ә-сурет). Осыдан кейін цилиндр түгелдей жылулық окшауланады да (40.3, а-сурет), газ адиабаталы ұлғая отырып, A_{23} жұмыс атқарады (40.3, ә-сурет). Осы кезде газдың температурасы T_2 дейін түседі, себебі бұл жолы жұмыс газдың ішкі энергиясы есебінен жүреді. Енді жылу окшаулағышты алып тастайды да, газды суытқышқа жанастырған күйде, изотермалық түрде сығып, газ температурасы өзгермеу



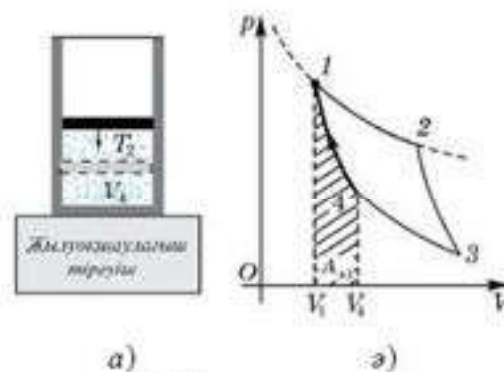
40.2-сурет



40.3-сурет



40.4-сурет



40.5-сурет

үшін одан Q_2 жылуды алып, оны суытқышқа береді (40.4, а-сурет). Газ сығыла отырып, A_{34} теріс жұмыс жасайды (40.4, б-сурет). Сонында цилиндрдің түбін тағы да жылудан окшаулап (40.5, а-сурет), газды адиабаталы түрде сығады да (бұл кезде A_{41} теріс жұмыс жасалады), оны бастапқы температурасы T_1 күйге әкеледі (40.5, б-сурет).

Карно циклінің ПӘК-і. Бір циклде газбен атқарылған жиынтық жұмыс $A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}$ тең болса, ал газ жылу мөлшерін Q_{12} , изотермиялық ұлғаю бөлігінде алса, Карно циклі бойынша жұмыс атқаратын жылу қозғалтқыштың ПӘК-і $\eta = \frac{A}{Q_{12}}$ өрнегімен анықталады.

Есептер көрсеткендей, ПӘК қыздырғыш пен суытқыштың температураларына ғана тәуелді болады:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (40.1)$$

Осылайша Карноның идеал машинасы үшін де ПӘК мәні 1 аз.

Жылу қозғалтқыштың ПӘК-ін арттыру жолдары. (40.1) формуласы жылу машинасының максималды мүмкін ПӘК-ін алу үшін не істеу керектігін көрсетеді: мүмкіндігінше қыздырғыш температурасын жоғарылатып, суытқыштың температурасын азайту қажет. Алайда максимал ПӘК алу мүмкіндіктерінде қыздырғыш температурасын шексіз жоғарылата алмаймыз (материалдың балқу қаупінен) және де суытқыш температурасын төмендете (температураның абсолют нөлге жеткізу мүмкін емес) алмаймыз.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Карно циклі қандай этаптардан тұрады?
2. Карно циклінің ПӘК-і немен анықталады?
3. Неліктен Карно циклі үшін бірге тең болатын ПӘК ала алмаймыз?
4. Жылу машиналарының ПӘК-ін қалай арттыруға болады?

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

Изотермиялық ұлғаю кезінде газ сан жағынан берілген жылу мөлшеріне тең жұмыс атқарады. Бұл дегеніміз бірге тең ПӘК бар жылу қозғалтқышты жасау мүмкіндігін білдіре ме?

Талдаңдар

1. Карно циклімен жұмыс атқаратын жылу қозғалтқышты идеал жылу машинасы деп атайды. Неліктен?
2. Неліктен жұмыс атқарып тұрған тоңазытқыштың (холодильник) есігін ашық қойып, бөлмедегі температураны төмендетуге болмайды?

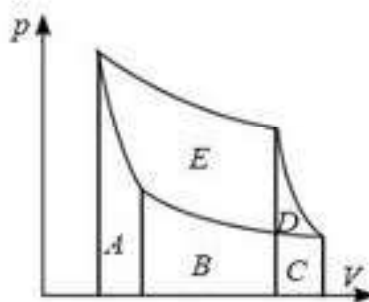
Шығарыңдар

1. Идеал газ Карно циклін атқарады. Қыздырғыштың температурасы суытқыштың температурасынан үш есе жоғары. Қыздырғыш газға 42 кДж жылу мөлшерін берді. Газ қандай жұмыс атқарды?

Жауабы: 28 кДж

2. Суретте Карно циклі көрсетілген (40.6-сурет). Мұнда A , B , C , D және E әріптерімен белгіленген аудандарға мынадай энергиялар сәйкес келеді: A – 50 Дж; B – 45 Дж; C – 40 Дж; D – 10 Дж; E – 150 Дж. Цикл сағаттың тілшесі бойынша жүреді деп, мыналарды табыңдар: а) газға берілген жылу мөлшері; ә) циклдің жұмысы; б) циклдің ПӘК-ін.

Жауабы: а) 245 Дж; ә) 160 Дж; б) 65%



40.6-сурет

Рефлексия

1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 41. Қайтымды және қайтымсыз процестер. Энтропия. Термодинамиканың екінші заңы



Тірек ұғымдар: қайтымды процесс, қайтымсыз процесс, термодинамиканың екінші заңы, энтропия, екінші текті мәңгі қозғалтқыш.

Бүгінгі сабақта: қайтымды және қайтымсыз процестердің айырмашылығын, термодинамиканың екінші заңы ұғымымен, энтропия түсінігімен танысасыздар.

Қайтымды процесс. Термодинамикада қайтымды және қайтымсыз процестерді ажырата білу керек. *Термодинамикалық жүйенің 2 күйден 1 күйге өту процесі кезінде жүйенің өзі не қоршаған орта өзгеріссіз қалатын болса, 1 күйден 2 күйге ауысу процесі орын алса, осы процесті қайтымды деп атаймыз.* Қайтымды процестің мысалы ретінде үйкеліссіз ортадағы маятник тербелісін айтуға болады. Бір толық тербеліс жасап маятник бастапқы калпына келеді, орын алған өзгерістерден із қалмайды. Маятник температурасы қоршаған орта температурасы сияқты өзгеріссіз қалады.

Қайтымсыз процесс. Табиғатта үйкеліс әрқашан болады, онда серпімді дене мен соқтығыстар мүлдем жоқ. Демек, табиғатта барлық механикалық процестер қайтымсыз. Термодинамикалық жүйеде орын алатын барлық процестер, яғни молекулалары көп денелер қайтымсыз. Қайтымсыз процестердің бірнеше мысалдарын келтірейік.

1. Егер әртүрлі температуралы екі денені бір-бірімен байланыстыратын болсақ, онда әрқашан жылу қатты қызған денеден аз қызған денеге беріледі. Табиғатта ешқашан салқын денеден қызған денеге жылу берілудің кері процесі өздігінен орын алмайды.

2. Биіктіктен құлайтын резеңке доп жермен бірнеше соқтығыс жасаған соң тыныштық жағдайына келеді. Дегенмен жерде жатқан доп жерден ішкі энергияны алып ешқашан қайтадан секіре алмайды.

3. Тербеліс жасап жатқан маятник ақыр соңында ауа молекулаларымен соқтығысқаннан кейін және ілу нүктесіндегі үйкелістен кейін тоқтайды. Жүйенің механикалық энергиясы ауаның, маятниктің және ілгіштің ішкі энергиясына ауысады, бірақ басқа кедергілерсіз энергияның кері ауысуы болмайды.

Барлық айтылған процестер *табиғи түрде, яғни өз бетімен бір бағытта орындалатындықтан қайтымсыз* болып табылады. Осындай қайтымсыздықтың мысалдары табиғатта жетерлік. Сондықтан табиғаттағы *орын алатын барлық макроскопиялық процестер қайтымсыз* деп қорытындылауға болады.

Термодинамиканың екінші заңы. Бізбен қарастырылған барлық қайтымсыз процестер мысалында кері процестер энергияның сақталу заңымен рұқсат етілген. Демек, жерде жатқан доп жерден жылу алып

бұрынғы биікке көтерілсе, термодинамиканың екінші заңы бұзылмас еді. Ол ешқашан болуы мүмкін емес деген факт табиғаттағы кейбір процестердің жүзеге аспайтынын түсіндіру үшін термодинамиканың бірінші заңының жеткіліксіздігін айқындайды және де табиғатта болатын энергетикалық түрленулердің мүмкін бағытын тағайындайтын тағы бір заңның қажеттігін меңзейді. Ондай заң *термодинамиканың екінші заңы* болып табылады. Ол көптеген фактілерді қорытындылау арқылы тағайындалған және теориялық түрде енгізіле алмайды.

Екінші заңның бірнеше тұжырымы бар. Неміс ғалымы Р. Клаузиустың (1822—1888) бізге мәлім жылу берілу бағытына қатысты тұжырымдамасын келтірейік: жылу өз бетімен салқын денеден қыздырылған денеге берілмейді.

Екінші текті мәңгі қозғалтқыш құрастырудың мүмкін еместігі. Термодинамиканың екінші заңының тағы бір тұжырымдамасы өткен жылу машинасының жұмысындағы суытқыштың болу қажеттілігінен туындайды. Барлық жылу мөлшерін жұмысқа айналдыратын қияли механизм *екінші текті мәңгі қозғалтқыш* деп аталады. Сызбалық түрде ол 41.1-суретте берілген. Онда термодинамиканың екінші заңын келесі түрде тұжырымдауға болады: *екінші текті мәңгі қозғалтқыш жасау мүмкін емес*. Сыртқы айырмашылықтарға карамастан термодинамиканың екінші заңының екі тұжырымдамасы да оның мәнін бірдей көрсетеді және теңқұқықты болып табылады.



ол 41.1-суретте берілген. Онда термодинамиканың екінші заңын келесі түрде тұжырымдауға болады: *екінші текті мәңгі қозғалтқыш жасау мүмкін емес*. Сыртқы айырмашылықтарға карамастан термодинамиканың екінші заңының екі тұжырымдамасы да оның мәнін бірдей көрсетеді және теңқұқықты болып табылады.

Қайтымсыз процестерде энергияның құнсыздануы. Жоғарыда қарастырылған қайтымсыз процестер мысалдарында бүкіл жүйенің энергиясы сақталғанмен, оның сапасы нашарлайды, себебі сол энергияның кейбір бөлігі оны механикалық энергияға ауыстыруға жарамсыз болып қалады. Энергияның механикалық, электр, жарық түрлерінің барлығы өздігінен жылуға айналуы мүмкін, ал жылу болса өз бетімен энергиясының басқа түрлеріне айнала алмайды.

Энтропия. Жылу энергиясының осындай “құнсыздануының” сандық өлшемі ретінде термодинамикада *энтропия* $[S]$ деп аталатын физикалық шама қолданылады. Термодинамикалық жүйелерде орын алатын процестерде S шаманың өзі емес, жүйенің бір күйден екіншісіне ауысуы кезіндегі энтропияның ΔS өзгеруі қызығушылық тудырады.

Энтропияның өзгеруі мына формуламен анықталады:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}, \quad (41.1)$$

мұндағы Q — денеге берілетін жылу мөлшері, T — жылу берілу кезіндегі температура.

(41.1) формуласы бойынша энтропияның өлшем бірлігі — Дж · К⁻¹.

Қайтымсыз процестерде жылудан оқшауланған термодинамикалық жүйенің энтропиясы тек қана ұлғаятынын тәжірибе мен теория көрсетеді.

Энтропия өзгеруін есептеу. Кейбір қайтымсыз процестердің мысалынан жүйенің энтропиясы шынымен тек артатынын көрсетейік. Жылудан оқшауланған температурасы 20°C бөлмедегі 1 кг мұзды еріту қажет болсын. “Мұз-бөлме” жүйесі үшін энтропияның өзгеруін есептейік. Мұздың балку температурасы $T_6 = 273$ К, ал меншікті балку жылуы $\lambda = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг екенін ескерсек, мұз энтропиясының ұлғаюы мынаған тең:

$$\Delta S_m = \frac{m\lambda}{T_6} = \frac{1 \cdot 3,35 \cdot 10^5}{273} = 1,23 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Бөлме температурасын $T_6 = 293$ К деп алсақ, бөлме энтропиясының кемуі былайша есептелінеді:

$$\Delta S_6 = \frac{-m\lambda}{T_6} = \frac{-1 \cdot 3,35 \cdot 10^5}{293} = -1,14 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Демек, мұз бен бөлме энтропияларының қосындысы болып табылатын жүйе энтропиясы шынымен артады:

$$\Delta S = \Delta S_m + \Delta S_6 = 1,23 \cdot 10^3 - 1,14 \cdot 10^3 = 90 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} > 0.$$

Энтропия және ретсіздік. Энтропия ұғымының физикалық мағынасы статистикалық физикада айқындалады. Қайтымсыз процестерде энтропиямен қатар жүйедегі ретсіздік те артып отырады. Мысалы, жоғарыда көрсетілген мұзды еріту кезіндегі энтропияның ұлғаюы мысалында мұздың кристалдық торындағы молекулалардың қатаң реттік орналасуы су молекулаларының реттілігі онша қатаң емес орналасуына ауысады. Бұл мағынада энтропияны *жүйе ретсіздігінің өлшемі* ретінде қарастыруға болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қайтымды және қайтымсыз процестердің айырмашылығы неде?
2. Неліктен механикалық процестер қайтымсыз?
3. Табиғатта болатын қайтымсыз процестерге мысал келтіріндер.
4. Термодинамиканың екінші заңының қандай тұжырымдамаларын білесіңдер?
5. Термодинамикада екінші текті мәңгі қозғалтқыш деген не?
6. Энтропияның өзгерісі қалай есептелінеді?

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Допты биіктіктен лақтырып, оның горизонталь жазықтықпен соқтығысуы кезіндегі механикалық энергияның ішкі энергияға айналуын бақылаңдар. Термодинамиканың бірінші заңы доптың ішкі энергиясының оның механикалық энергияға кері айналуына тыйым сала ма?

Тәжірибе жасаңдар

Жылу әрқашан қатты қыздырылған денеден аз қыздырылған денеге өз бетімен ауысатынын дәлелдейтін тәжірибе жасаңдар.

Түсіндіріңдер

Екінші текті мәңгі қозғалтқыш деген не екенін түсіндіріңдер. Неліктен оны құру мүмкін емес?

Талдаңдар

Үйдегі тоңазытқышта жылу мұздатқыш камерасынан алынып жылу ас бөлмесіне беріледі. Термодинамиканың екінші заңы бойынша жылу ыстық денеден салқын дене бағытында берілетінімен қалай үйлеседі?

Шығарыңдар

1. Температурасы 0°C болатын 1 кг мұздың балқуы кезіндегі энтропияның артуын табыңдар.

Жауабы: 1227 Дж/К

2. 100°C температурада 5л судың булануы кезіндегі энтропияның өзгеруін есептеңдер.

Жауабы: 30,3 кДж/К

3. Температурасы 293 К, массасы 10^3 кг тас, биіктігі 125 м жардан келге құлайды, ондағы судың температурасы да 293 К. Суға ену кезіндегі тастың барлық кинетикалық энергиясы судың ішкі энергиясына ауысады деп, көлдегі судың энтропиясының өзгеруін анықтаңдар.

Жауабы: 4,2 кДж/К

Рефлексия

1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?

§ 42. Жылу қозғалтқыштарының қолданылуы



Тірек ұғымдар: іштен жану қозғалтқышы, сығылу дәрежесі, дизель циклі, газ турбиналары, турбореактивті және турбобұрандалы қозғалтқыштар.

Бүгінгі сабақта: іштен жану қозғалтқышы және дизельдік жылу қозғалтқышы қалай жұмыс жасайтынын түсінесіңдер; бу және газ турбиналарының ерекшеліктерін білесіңдер; жылу қозғалтқыштарын қолданудың экологиялық аспектілерін қарастырасыңдар.

Жылу машиналарының түрлері және қолданылуы. Жылу қозғалтқыштарын дамытуда адамзат аса қомақты жұмыс атқарды. Осы күнгі жылу қозғалтқыштарының ПӘК 8—12% болатын алғашқы жылу машиналарынан айырмашылығы жер мен көктей. Бу машинасының орнына жұмысқа ыңғайлы әрі ПӘК жоғары іштен жанатын қозғалтқыштар келді. Отынның жаңа түрлері алынғаннан кейін (бензин мен керосин) карбюраторлы қозғалтқыш ойлап табылды, оның цилиндрінде бензин мен ауа қоспасы пайда болады да, жанғыш қоспа жану кезінде жұмыс денесіне жылу беріп, оның ішкі энергиясын арттыра түседі. Іштен жанатын поршеньді қозғалтқыштар үшін отынның толық жануын сипаттайтын әрі ПӘК күшті әсер ететін аса маңызды сипаттама жанғыш қоспаның сығылу дәрежесі болып табылады: $\varepsilon = \frac{V_2}{V_1}$, мұндағы V_2 және V_1 — сығылудың басындағы және соңындағы көлемдер. Сығылу дәрежесі жоғарылаған сайын сығылу тактісінің ақырында жанғыш қоспаның бастапқы температурасы артады да, бұл қоспаның толығырақ жануына ықпалын тигізеді. Осы күнгі карбюраторлық қозғалтқыштарда $\varepsilon \approx 8$. Сығылу дәрежесін одан әрі арттыруға *детонация* (өздігінен жану) мүмкіндік бермейді. Бұл қозғалтқыштың цилиндріне кері әсер етеді және қозғалтқыштардың қуатын және ПӘК төмендетеді. Мұнымен күресу үшін бензинге *антидетонациялық* қоспалар қосады.

Дизельдік жылу қозғалтқыш. Іштен жану қозғалтқыштарының ПӘК одан әрі жоғарылату мақсатында 1892 жылы неміс инженері Р. Дизель жұмыс денесінің сығылу дәрежесін одан әрі көтеруді және тұрақты қысым кезінде ұлғайтуды ұсынды. Дизельді қозғалтқышта сығылудың жоғары дәрежесі жанғыш қоспаны емес, ауаны сығу арқылы іске асырылады. Сығылу тактісі аяқталар мезетте цилиндрге жанғыш зат (отын) бүркіледі, оны жандыруға арнаулы қондырғы қажет емес (тұтатқыш шырақ сияқты), себебі адиабаталық сығылу кезінде цилиндрдегі температура 600—700°C жетеді. Отынның жануына бұл әбден жеткілікті. Қазіргі дизельді қозғалтқыштардың сығылу дәрежесі $\varepsilon \approx 16—21$ және ПӘК 40% шамасында. Осы күнгі дизель қозғалтқыштары байытылған қоспалармен жұмыс істейді, ал бұл отынның толық жануына және шығарылатын зиянды газды заттардың аз болуы-

на жол ашады. Дизель қозғалтқыштары карбюраторлық қозғалтқыштарға қарағанда қуаттырақ.

Қазіргі кезде инженерлер бұ турбиналарына қайта оралды, себебі оларды қызықтыратын нәрсе — қондырғының және оның жұмыс істеу принципінің қарапайымдылығы, сонымен қатар жұмыс денесі ретінде су буының пайдаланылуы. Бұл саладағы жұмыстар бұ турбинасының ПӘК-ін 40% дейін жеткізді. Бұ турбиналары конденсациялық электрстанцияларында, су транспорттарында кең қолданылады.

Газ турбиналары. Турбинасы бар жылу машинасында қазан мен отын жаққыштан арылу мақсатында, отын жағу орнын жұмыс денесіне көшіру арқылы газ турбиналарын жасауға алып келді. Мұнда үлкен көлемді бұ қазандары мен бұ турбиналары жоқ, сонымен қатар поршеньдер де, ілгерілемелі-қайтымды қозғалысты айналмалы қозғалысқа айналдыратын механизмдер де жоқ. Сондықтан газ турбиналық қозғалтқыштар қуаты дәл осындай дизель қозғалтқыштарына қарағанда үш еседей аз орын алады. Ықшам, қуатты газ турбиналық қозғалтқыштар авиацияда және су қатынасында қолдануға қолайлы.

Газ турбинасын реактивтік қозғалтқыш ретінде де қолдануға болады, себебі ауа және жану өнімдері одан аса үлкен жылдамдықпен ытқып шығады, сөйтіп үлкен реактивтік тарту күшін тудырады. Сондықтан мұндай реактивтік қозғалтқыштар ұшақтарда және теплоходтарда қолданылады. Реактивтік қозғалтқыштарды *турбореактивті* және *турбобұрандалы қозғалтқыштар* деп бөледі.

Жылу қозғалтқыштары шаруашылық салаларында кеңінен қолданылады. Жылу қозғалтқыштарының түрлерін атап өтудің өзі қыруар жұмыс. Миллиондаған автокөліктер, мотоциклдер, тепловоздарсыз өмірді көзге елестету мүмкін емес. Ұшақтар мен тікұшақтарда да түрліше жылу қозғалтқыштары қойылған (поршеньдік, турбореактивтік және турбобұрандалы және т.б.). Ауылшаруашылық техникасы (тракторлар, комбайндар және т.б.) түгелімен дерлік жылу қозғалтқыштарымен жұмыс істейді. Реактивтік қозғалтқыштарсыз ғарыш саласы да болмаған болар еді. Жылу электрстанцияларында да жылу машиналары қолданылады.

Жылу қозғалтқыштары және қоршаған ортаның ластануы. Өкінішке орай, жылу қозғалтқыштарды қолдану бізді қоршаған ортаға теріс әсерін тигізеді. Бұл жылу машиналарында көмірсутектік отынды жағу нәтижесінде пайда болатын әртүрлі факторлардың әсерінен туындайды.

Сол факторлардың ішінде ең негізгісі атмосфераға көмірқышқыл газдың шығарылуы болып табылады. Қазіргі таңда барлық елдердің атмосфераға шығаратын көмірқышқыл газының қосынды мөлшері жылына 30 млрд тоннадан асады. Атмосферадағы көмірқышқыл газ Күн сәулесі әсерінен қызған Жер бетінен шығатын инфрақызыл сәулелерді ұстап қалып, жылыжай эффектісін тудырады. Соның

нәтижесінде пайда болатын Жердің орташа температурасының үздіксіз өсуі жаһандық жылынудың нақты қаупін тудырады. Соның салдарынан мұздықтардың еруі әлем мұхиті деңгейінің артуына және басқа да климаттық өзгерістерге әкеліп соғады.

Бұдан басқа отынның жануы атмосферадағы оттектің көп мөлшерде шығындауымен қоса жүреді. Қазірдің өзінде өнеркәсіптік дамыған елдерде жылу қозғалтқыштардың тұтынатын оттек мөлшері өсімдіктердің өндіретін оттек мөлшерінен асып кетті.

Және де, жылу қозғалтқыштарында отынның толық жанбауының салдарынан ауа күлмен және азот пен күкірт қосылыстарымен ластанады. Детонацияға қарсы қоспаларды көлік жанармайына қосу атмосферада қорғасын концентрациясының едәуір жоғарылауына әкеліп соғады.

Қазіргі таңда әлем елдерінің атмосфераның ластануымен күресудегі негізгі әрекеттері CO_2 газының шығарылуын азайтуға бағытталған. Еуропаның дамыған елдерінде бензин және дизель қозғалтқыштарымен жабдықталған автомобильдерді сатуға толық тыйым салу жоспарланып отыр, ал олардың орнына электромобильдерді сатып алу үшін бұл мемлекеттер өз азаматтарына субсидия береді.

Көлік транспортынан басқа, қоршаған ортаны ластау көздеріне өнеркәсіп және жылу-энергетика кәсіпорындары да жатады. Бұл кәсіпорындарды, жел және күн электрстанциялары сияқты, баламалы энергия көздеріне көшіру және жылу электрстанцияларынан біртіндеп бас тарту жағымды қоршаған ортаны сақтап қалуға жағдай жасайды.

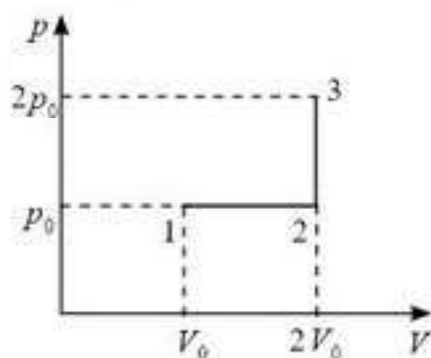
Болашақта, органикалық отынның дүниежүзілік қорының сарқылуына және әлемдегі экологиялық жағдайдың нашарлауына байланысты, жылу қозғалтқыштары біртіндеп экологиялық жағынан тазарақ энергия көздеріне орын беруі тиіс. Әлем елдерінің энергияның баламалы көздеріне арналған соңғы ғылыми-техникалық жетістіктері елімізде өткен “Экспо-2017” халықаралық көрмесінде ұсынылды.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Жылу қозғалтқыштарының қандай түрлерін білесіңдер? Олардың бір-бірінен қандай айырмашылықтары бар? Қандай кемшіліктері бар?
2. Жылу машиналарының проблемалары мен даму болашағы жайлы не айтасыңдар?

Есеп шығару үлгілері



42.1-сурет

1-есеп. 1 моль бір атомды идеал газдың 1-күйден 3-күйге 1—2—3 жолымен ауысуы үшін қажетті жылу мөлшерін анықтаңдар (42.1-сурет). 1-күйінде газдың температурасы $T_1 = 300$ К.

Шешуі. 1—2—3 аралығындағы жылу мөлшерін есептеу кезінде изобаралық 1—2 температурада және 2—3 изохоралық бөлігіндегі жылу мөлшерінің қосындысы есептелсе, есепті оңай шешуге болады. 1—2 бөлікте газға берілген жылу мөлшерін

$$Q_{1-2} = nC_p(T_2 - T_1) = n\frac{5}{2}R(T_2 - T_1)$$

формуласы бойынша анықтауға болады.

Мұнда біз бір атомды газ үшін $C_p = \frac{5}{2}R$ екенін ескердік. 2-күйіндегі T_2 температурасы Гей—Люссак заңымен анықталады: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$, осыдан

$$T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1} = 300 \cdot 2 = 600 \text{ К.}$$

$$\text{Сонда } Q_{1-2} = 1 \cdot 2,5 \cdot 8,31(600 - 300) = 6233 \text{ Дж.}$$

Изохоралық 2—3 бөлікте жылу мөлшері мына формула бойынша анықталады:

$$Q_{2-3} = nC_v(T_3 - T_2) = n\frac{3}{2}R(T_3 - T_2),$$

өйткені біратомды газ үшін $C_p = \frac{3}{2}R$. 3-күйіндегі T_3 температурасы

Шарль заңымен анықталады: $\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}$, осыдан

$$T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2} = 600 \cdot 2 = 1200 \text{ К.}$$

$$\text{Сонда } Q_{2-3} = 1 \cdot 1,5 \cdot 8,31(1200 - 600) = 7479 \text{ Дж.}$$

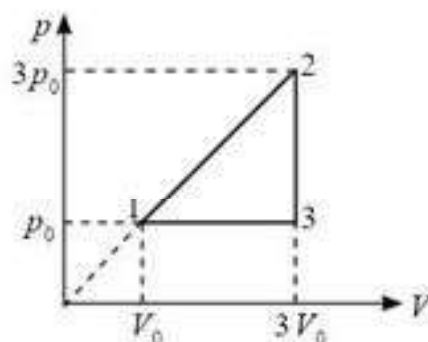
1—2—3 күйлеріндегі жылу мөлшері мынаған тең:

$$Q_{1-3} = Q_{1-2} + Q_{2-3} = 6233 + 7479 = 13712 \text{ Дж} = 13,7 \text{ кДж.}$$

2-есеп. Біратомды идеал газ 1—2—3—1 циклдік процесс орындайды, оның графигі p, V координаттарында 42.2-суретте көрсетілген. Циклдің ПӘК анықтаңдар.

Шешуі. Циклдің ПӘК келесі формула бойынша табамыз: $\eta = \frac{A}{Q_1}$, мұнда A — циклдегі газ жасаған жалпы жұмыс, Q_1 — цикл ішінде газға

берілген жылу мөлшері. A жұмысты 123 үшбұрыштың ауданы арқылы есептеу оңай:
 $A = \frac{1}{2}(3p_0 - p_0)(3V_0 - V_0) = 2p_0V_0$. Газға жылуы 1—2 бөлігінде ғана беріледі және ол осы бөлікке термодинамиканың бірінші заңын қолдану арқылы есептеледі:



42.2-сурет

$$Q_1 = Q_{1-2} = A_{1-2} + \Delta U_{1-2}.$$

Жұмыс A_{1-2} трапецияның ауданы арқылы есептеледі: $V_0 - 1 - 2 - 3V_0$, ол келесі өрнекпен есептеледі:

$$A_{1-2} = \frac{1}{2} (3p_0 + p_0)(3V_0 - V_0) = 4p_0V_0.$$

Ішкі энергияның өзгеруі төмендегідей есептеледі:

$$\Delta U_{1-2} = \frac{3}{2} \nu R(T_2 - T_1) = \frac{3}{2} (9p_0V_0 - p_0V_0) = 12p_0V_0.$$

Мұнда идеал газ күйінің теңдеуін қолданып, νRT көбейтіндіні pV -ге ауыстырдық. Осылайша жылу мөлшері $Q_1 = 4p_0V_0 + 12p_0V_0 = 16p_0V_0$. Сондықтан ПӘК үшін біз мына теңдеуді аламыз:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{2p_0V_0}{16p_0V_0} = \frac{1}{8} = 0,125 = 12,5\%.$$

3-есеп. Бір моль идеал газ 1,60 кДж жылу ала отырып, изобаралы 72 К қыздырылды. Оның ішкі энергиясының өзгеруін және γ шамасын табындар.

Шешуі. Изобаралық процесс үшін термодинамиканың бірінші заңы келесі формуламен есептеледі: $Q = \Delta U + A$. Осыдан $\Delta U = Q - A$. Изобаралық процесс кезіндегі газдың бір моль жұмысы мына формуламен есептеледі: $A = R\Delta T$. Демек,

$$\Delta U = Q - R\Delta T = 1,60 \cdot 10^3 - 8,31 \cdot 72 = 1,00 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Изобаралық процесс кезінде газдың 1 моле берілген жылу мөлшері мына формуламен есептеледі: $Q = C_p \Delta T$. Анықтама бойынша $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$. Көбейткіш пен бөлгішті ΔT көбейтеміз. Онда

$$\gamma = \frac{C_p \Delta T}{C_v \Delta T} = \frac{Q}{\frac{1}{2} R \Delta T} = \frac{Q}{\Delta U} = \frac{1,60 \cdot 10^3}{1,00 \cdot 10^3} = 1,6.$$

4-есеп. Массасы 20 г оттегі адиабаталық сығу кезінде оның ішкі энергиясы 8 кДж артады және температурасы 900 К дейін көтеріледі. Есептендер: 1) температураның артуын; 2) бастапқы қысымы 200 кПа деп соңғы қысымын.

Шешуі. 1) Оттектің ішкі энергиясының өзгеруін мына формуламен есептейді: $\Delta U = \frac{5}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T$. Осыдан

$$\Delta T = \frac{2M\Delta U}{5mR} = \frac{2 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^3}{5 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31} = 616 \text{ К шығады.}$$

2) Адиабаталық процесс үшін Пуассон теңдеуі қолданылады: $p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$. Идеал газ күйінің теңдеуінен газдың көлемін табамыз: $V = \frac{mRT}{pM}$ және оны адиабаталық процесс теңдеуіне қоямыз. Онда Пуассон теңдеуі келесі түрде жазылады: $p_1^{1-\gamma} T_1^\gamma = p_2^{1-\gamma} T_2^\gamma$. Теңдеудің екі жағын да $\frac{1}{1-\gamma}$ дәрежесіне көбейтеміз. Ол кезде $p_1 T_1^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = p_2 T_2^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$ аламыз. Осыдан $p_2 = p_1 \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = 2 \cdot 10^5 \left(\frac{900 - 616}{900}\right)^{1,4} = 11,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$. $\gamma = 1,4$, себебі оттек — екі атомды газ.

5-есеп. Идеал екіатомды газдың 1 моль Карно циклін жасайды. Қыздырғыштың температурасы 400 К. Егер газды адиабаталық сығу кезінде 2,0 кДж жұмыс атқарылатын болса, циклдің ПӘК табындар.

Шешуі. Адиабаталық процесс үшін термодинамиканың бірінші заңы ($Q = 0$) $A = -\Delta U$ түрінде жазылады. Есеп шарты бойынша газдың жұмысы кері, ал $A = \Delta U$. Екі атомды газдың ішкі энергиясының өзгерісі мына формуламен есептеледі: $\Delta U = \frac{5}{2} nR \Delta T$. Осыдан $\Delta T = \frac{2\Delta U}{5\nu R} = \frac{2A}{5\nu R} = \frac{2 \cdot 2,0 \cdot 10^3}{5 \cdot 1 \cdot 8,31} = 96 \text{ К шығады. Демек, Карно циклінің}$

$$\text{ПӘК } \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T_1} = \frac{96}{400} = 24\% \text{ тең.}$$



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Автокөлік қозғалтқышының жұмысын бақылаңдар. Іштен жану қозғалтқышының қыздырғышы, жұмыс денесі және суытқышы ретінде не пайдаланылады?

Талдаңдар

Ауа райы қандай болғанда (суық немесе ыстық) жеке бір автокөлік қозғалтқышының ПӘК жоғары болады?

Шығарыңдар

1. Мотороллердің қозғалтқышы 58 км/сағ жылдамдықта 3,31 кВт қуатты өндіреді. Егер мотороллердің бензин бағында 3,2 л бензин болса, ол қанша жол жүреді? Қозғалтқыштың ПӘК 20%.

Жауабы: 100 км

2. Қозғалтқыш ПӘК 20% реактивті ұшақ 1800 км/сағ жылдамдықпен ұшу кезінде 88,2 кН тарту күшін өндіреді. 1 сағ ұшу уақытындағы керосиннің шығынын және қозғалтқыштың өндіретін қуатын анықтаңдар.

Жауабы: 18,4 т; $4,41 \cdot 10^4$ кВт

Рефлексия

1. Параграфтың басында берілген мақсаттар түсінікті ме?
2. Қандай терминдер мен ұғымдар сендерге таныс болды?
3. "Шығармашылық шеберханада" берілген тапсырмалар тақырыпты меңгеруге көмектесті ме?
4. Қандай ақпарат сендерді қызықтырды? Неге?



Макроскопиялық денелер молекулалардың хаосты қозғалысының кинетикалық және олардың өзара әсер потенциалдық энергияларының қосындысына тең ішкі энергияға ие. Ішкі энергия дене температурасының бірмәнді функциясы болып табылады: $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$.

Жүйенің ішкі энергиясының өзгерісін жылу беру немесе жұмыс жасау арқылы өзгертуге болады. *Жылу берілу арқылы денеге берілген энергия жылу мөлшері деп аталады.*

Термодинамикалық процестер жылу процестері үшін энергияның сақталу заңы болып табылатын термодинамиканың бірінші заңына бағынады: *газға берілген жылу мөлшері оның атқаратын жұмысы мен ішкі энергиясының өзгерісіне жұмсалады: $Q = A + \Delta U$.*

Газдың жасайтын жұмысы өзі қатысатын процеске тәуелді: 1) изобаралық процесте $A = p\Delta V$; 2) изохоралық процесте $A = 0$; 3) изотермиялық процесте $A = Q$.

Газдың алатын жылуы да өтетін процестің түріне тәуелді: 1) изохоралық, $Q = \Delta U$; 2) изотермалық, $Q = A$; 3) изобаралық, $Q = A + \Delta U$.

Адиабаталық процесс — жылу алмасусыз өтетін процесс. Бұл процесс үшін $Q = 0$ және $A = -\Delta U$, яғни газ ішкі энергияның кемуі есебінен жұмыс істейді.

Окшауланған жүйеде жылу алмасу кезінде жылулық тепе-теңдік орнайды, оның теңдеуі $Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0$, мұндағы Q_1, Q_2, Q_3 — жылу алмасуға қатысқан денелерден алынған немесе оларға берілген жылу мөлшерлері.

Термодинамиканың екінші заңы : жылу өз бетімен неғұрлым ыстық денеден салқын денеге беріледі.

Жылу қозғалтқыштары дегеніміз — жұмыс денесінің ішкі энергиясын механикалық энергияға айналдыратын қозғалтқыштар.

9-тарау. СҰЙЫҚ ЖӘНЕ ҚАТТЫ ДЕНЕЛЕР

§ 43. Қаныққан және қанықпаған бу. Ауаның ылғалдылығы



Тірек ұғымдар: қаныққан бу, қанықпаған бу, қаныққан будың қасиеттері, қанықпаған будың қасиеттері, аса қаныққан бу, ауаның салыстырмалы ылғалдылығы, абсолют ылғалдылық, шық нүктесі.

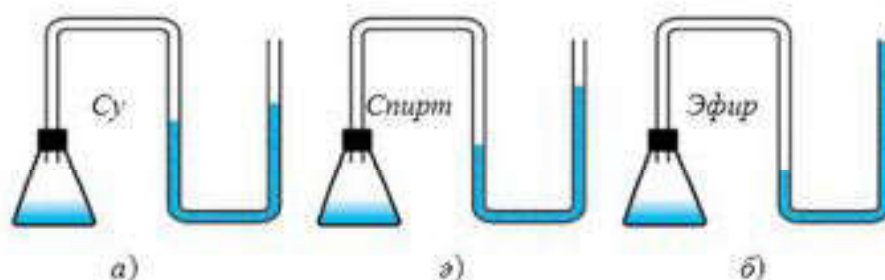
Бүгінгі сабақта: қаныққан және қанықпаған бу ұғымдарымен, олардың қасиеттерімен, ауаның абсолют және салыстырмалы ылғалдылығымен танысасыздар; ташықты және конденсациялы пирометрдің жұмыс істеу принципін, салыстырмалы ылғалдылықты табу формулаларын қолдануды үйренесіздер.

Қаныққан және қанықпаған булар. Егер ыдыстағы сұйықтың ашық беті атмосферамен шектесіп жатса, онда кебу процесі конденсацияға карағанда тезірек жүреді және сұйықтың деңгейі уақыт өткен сайын төмендейді. Мұның себебі қозғалыстағы ауа буды алып кетеді де, сұйықтың бетіндегі тығыздық төмендейді.

Тәжірибе жабық ыдыстағы сұйықтың деңгейі уақыт өтуімен өзгермейтінін көрсетеді. Бұл мұндай ыдыста сұйықтың кебу процесі толығымен конденсация процесімен теңесіп отыратынын білдіреді, яғни сұйықтан қанша молекула ұшып шықса, сонша молекула оған кері оралады. Басқаша айтқанда, бұл жағдайда сұйықтың да, оның бетіндегі будың да молекулаларының саны өзгеріссіз қалады, бірақ осы кезде сұйық пен будың арасында молекулалар алмасуы үздіксіз өтіп жатады. Сұйық пен оның буының арасындағы мұндай тепе-теңдікті *жылжымалы немесе динамикалық тепе-теңдік* деп атайды.

Өзінің сұйығымен динамикалық тепе-теңдікте болатын бу қаныққан бу деп аталады. Булану конденсациядан артық болса, онда сұйықтың бетіндегі бу және сұйық жоқ кездегі бу қанықпаған деп аталады.

Қаныққан будың тығыздығы мен қысымы заттың тегіне тәуелді болатын, болмайтынын білу үшін мынадай тәжірибе жасайық, манометрлерге қосылған су, спирт және эфир құйылған үш бірдей жабық колбаларды алайық (43.1-сурет).

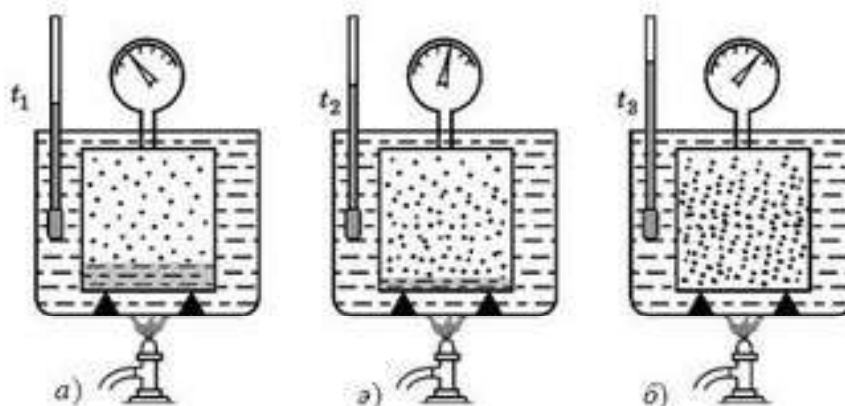


43.1-сурет

Жабық колбаларда қысымды ауамен бірге құйылған сұйықтардың қаныққан булары да тудырады. Ең үлкен қысым ішіне эфир құйылған колбада, ал ең аз қысым су құйылған ыдыста болып шығады екен, яғни ең үлкен қысымды тезірек кебетін сұйықтың қаныққан буы тудырады. Осындай тәжірибелерден мынадай қорытындыға келеміз: *меншікті булану жылуы неғұрлым аз болса, сұйық соғұрлым тезірек кебеді және оның буының қысымы және концентрациясы жоғары болады (осы кезде түрліше сұйықтардың температуралары бірдей болуы тиіс).*

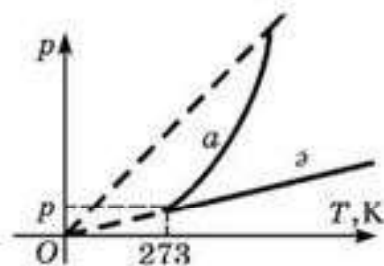
Қаныққан будың қасиеттері. Енді қаныққан будың изохоралық процесс кезіндегі қасиеттерін қарастырайық. Бұл үшін манометрі бар тығыз жабылған ыдысты аламыз. Ыдысты жаппастан бұрын оған сұйық құйып, ауаны сорып аламыз. Сұйықтың бетіндегі кеңістік тек оның буымен ғана толықтырылған болады. Қарастырылып отырған ыдысты суы бар ыдыстың ішіне салып, қыздыра отырып, ондағы қаныққан будың температурасы мен қысымын жазып отырамыз (43.2-сурет). Қыздыру аяқталғаннан кейін ыдысты салқындатып, тағы да температура мен қысымды жазып аламыз. Бірдей температуралар кезіндегі манометрдің көрсетулерін салыстырып, біз олардың бірдей болатынын көреміз. Бұл қаныққан будың қысымы мен тығыздығының оның температурасымен бірмәнді анықталатынын дәлелдейді.

Қаныққан будың қысымы оның табиғатына тәуелді және температура өскенде артып отырады. Егер тәжірибе барысында ыдыстағы сұйықтың деңгейін бақылап отырсақ, онда оның қыздырғанда төмендеп, ал салқындатқан кезде көтерілетінін көреміз. Демек, ыдыстағы будың массасы мен тығыздығының қыздырғанда артып, ал салқындатқанда төмендейтін болғаны. Осы айтылғандардан қаныққан бу қысымы қыздырған кезде екі себептен: біріншіден, бу молекулаларының \bar{W}_k орташа кинетикалық энергиясының артуынан, екіншіден, будың бірлік көлеміндегі молекулалар санының, яғни оның тығыздығының өсуінен артады деген қорытынды жасауға болады.



43.2-сурет

Идеал газды изохоралық түрде қыздырған кезде оның қысымы тек бірінші себептің әсерінен ғана артады, өйткені газдың массасы мен тығыздығы тұрақты болып қалады. 43.3-суретте қаныққан бу қысымының температураға тәуелділігінің типтік графиктері (*a* қисығы), ал төменде салыстыру үшін 0°C кезінде қысымы бұның қысымындай болатын идеал газдың изохоралық процесінің графигі келтірілген (*ә* түзуі).



43.3-сурет

Осы келтірілген тәжірибелерден Шарль заңын қаныққан буларға қолдануға болмайтыны шығады. Мұның негізгі себебін қаныққан бу массасының изохоралық процесс кезінде өзгеретінінен деп түсінуіміз керек.

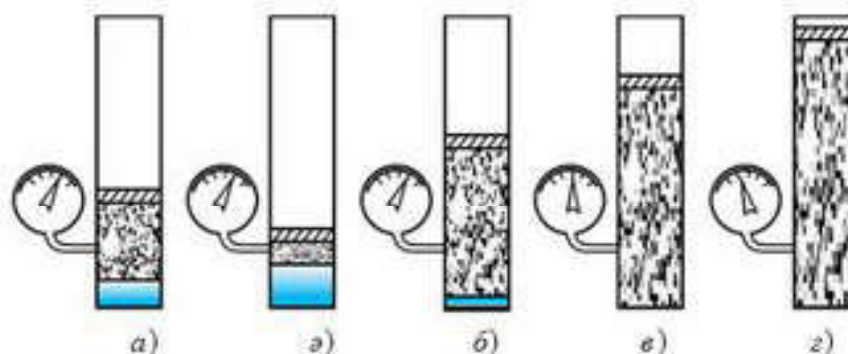
Енді изотермалық процесті қарастырайық. Бұл үшін жылжымалы поршені бар, ішіне аздап сұйық құйылып, манометрге қосылған цилиндр ыдысты қарастырамыз (43.4, *a*-сурет). Егер поршеньді жоғары-төмен қозғасақ, онда ыдыста әлі де сұйық бар кезде бу қысымының өзгермейтіні байқалады (43.4, *ә, б*-суреттер). Бұл тұрақты температурада қаныққан бу қысымының көлемге тәуелсіз болатынын көрсетеді. Демек, қаныққан бу Бойль—Мариотт заңына бағынбайды.

Ыдыстағы сұйық деңгейін бақылау изотермалық ұлғаюда қаныққан бу массасының артатынын, ал сығылғанда кемітінін көрсетеді. Осы кезде бу қысымының өзгеріссіз қалатынын ескере отырып, мынадай қорытынды жасауға болады:

- 1) изотермалық ұлғаю кезінде кеңейіп жатқан ыдыс көлемін қаныққан бумен толтыруға қажетті мөлшердегі сұйық буланады;
- 2) изотермалық сығылу кезінде көлемнің өзгерген бөлігінде қанша бу болса, сонша бу қайта конденсацияланады;
- 3) изотермалық процесте қаныққан бұдың тығыздығы өзгермейді;
- 4) қаныққан бұдың қысымы мен тығыздығы заттың температурасына және тегіне тәуелді.

Осы айтылғандардан идеал газ заңдарын қаныққан буға қолдануға келмейтінін көреміз. Себебі қаныққан бумен болып жатқан процестерде бу массасы өзгеріп отырады.

Қанықпаған бұдың қасиеттері. Егер 43.4-суреттегі ыдысты ондағы сұйық түгелдей буға айналып кеткенше қыздырсақ (43.4, *б*-сурет), онда бу қанықпаған буға айналады. Оның тығыздығы оны одан әрі қыздырғанда өзгеріссіз қалады және қысым да температура артқан кезде онша тез өзгермейді (43.3-сурет, *a* қисығының жоғары жағы). Бірақ бу қанығуға жақын кезде молекулалардың бір-бірімен өзара әсерлесулері әлі де жеткілікті. Молекулалардың өзара әсер күшін жоятын температураға дейін қыздырғанда ғана қанықпаған бу Шарль заңына бағына бастайды.



43.4-сурет

Жоғарыда сипатталған изотермалық ұлғаюдан будың қанықпаған жағдайында бұ қысымының өзгеретінін (43.4, в, г-суреттер) көреміз. Қанықпаған будың тығыздығы қаныққан будың тығыздығына жуықтаса, онда бұ молекулаларының өзара әсерлесу күшінің және меншікті көлемінің әсері үлкен болып, бұ қысымының көлемге тәуелділігі Бойль—Мариотт заңынан өзгеше болады. Тығыздықтың шамасы аз болса, онда қанықпаған бұ Бойль—Мариотт заңына бағынады. Демек, қанықпаған бұға идеал газ заңдарын тек бұ қанығудан алыс болатын кездерде ғана қолданады.

Жоғарыда айтылғандарды жинақтай келіп, мынадай қорытынды жасауға болады, қаныққан буды қанықпаған бұға изохоралық қыздыру не изотермалық ұлғайту арқылы не болмаса бір мезгілде қыздыру және ұлғайту арқылы айналдыруға болады. Керісінше қанықпаған буды қаныққан бұға әрқашанда изохоралық салқындату не изотермалық сығылу немесе бір мезгілде салқындату және сығу арқылы айналдырады.

Тәжірибе көрсеткендей, егер бұ сұйықпен жанаспаса, онда оны қаныққан бұға айналатын температурасынан да төмен температураға салқындатуға болады екен, ал бұл кезде сұйық пайда болмайды. Мұндай бұ аса қаныққан бұ деп аталады. Мұның себебі мынада: буды сұйыққа айналдыру үшін сұйық тамшыларына бастама болатын конденсациялану центрлері керек. Олардың рөлін көбіне шаң-тозаң түйірлері атқарады. Конденсация центрлері рөлін поңдар да атқара алады, олар будың молекулаларын өздеріне тартып алып, ұсақ тамшыларға айналады, міне, ұсақ тамшылар одан арғы конденсацияның центріне айналады.

Бұ молекулаларының меншікті көлемі будың алатын көлемімен салыстырғанда мардымсыз аз. Сондықтан қайсыбір сұйықтың бұы бар кеністікте басқа сұйықтың да булануы мүмкін. Осы кезде бұлардың жалпы қысымы екі сұйықтың бұларының қысымдарының қосындысына тең болады.

Ауаның салыстырмалы ылғалдылығы. Су буының атмосфераның түрлі бөліктеріндегі мөлшері ауаның ылғалдылығы деп аталады. Ауаның ылғалдылығын сандық мәндермен сипаттау үшін ауаның абсолют және салыстырмалы ылғалдылығы деген түсініктерді пайдаланады.

Ауаның абсолют ылғалдылығы ауадағы су буының ρ_a тығыздығымен немесе оның p_a қысымымен өлшенеді.

Ауаның ылғалдылығын ауаның салыстырмалы ылғалдылығы ұғымы дәлірек сипаттайды. Ауаның ϕ салыстырмалы ылғалдылығы ρ_a абсолют ылғалдылықтың берілген температура кезінде ауаны қанықтыру үшін қажетті ρ_x су буы тығыздығының қанша пайызын құрайтынын көрсететін санмен өлшенеді :

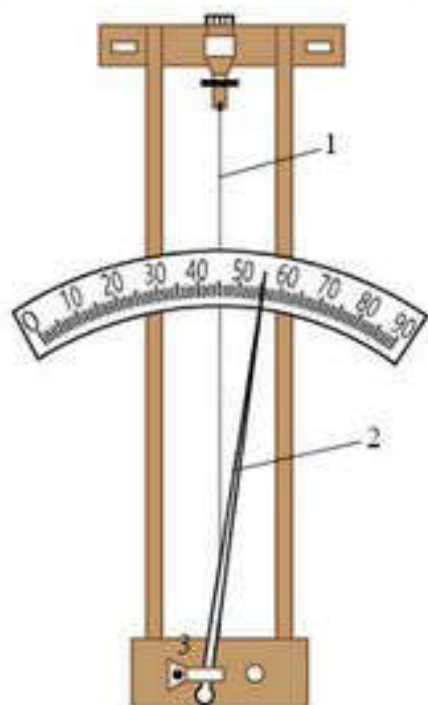
$$\phi = \frac{\rho_a}{\rho_x} \cdot 100\% \quad (43.1)$$

Сөйтіп, салыстырмалы ылғалдылық тек абсолют ылғалдылықпен емес, сонымен қатар ауаның температурасымен де анықталады. Салыстырмалы ылғалдылықты есептегенде ρ_a немесе ρ_x мәндерін кестеден алу керек.

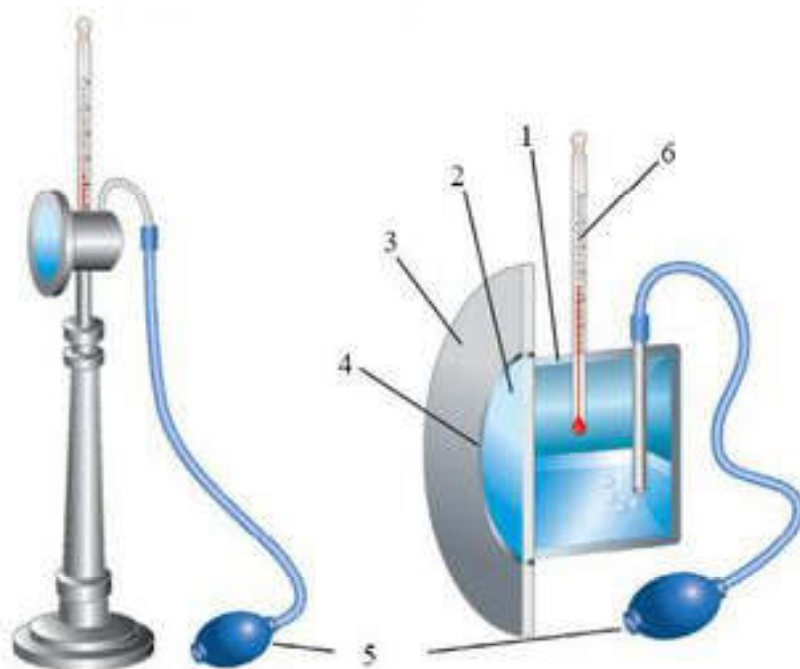
Салқындау процесінде ауаның, оның өзінде бар су буымен қанығу кезіндегі температурасы *шық нүктесі* деп аталады. Шық нүктесі белгілі болса, ауаның абсолют ылғалдылығын кестеден алады, өйткені ол шық нүктесіндегі қаныққан будың ρ_x тығыздығына тең. Содан кейін осы кестеден ауаның берілген температурасы үшін ρ_x мәнін тауып, (43.1) формула бойынша ϕ салыстырмалы ылғалдылықты есептейді.

Ауаның ылғалдылығын анықтауға арналған құралдардың көпшілігі — *гигрометрлер* (грекше *гигрос* — “ылғалдылық”) және *психрометрлер* (грекше *психриа* — “суық”).

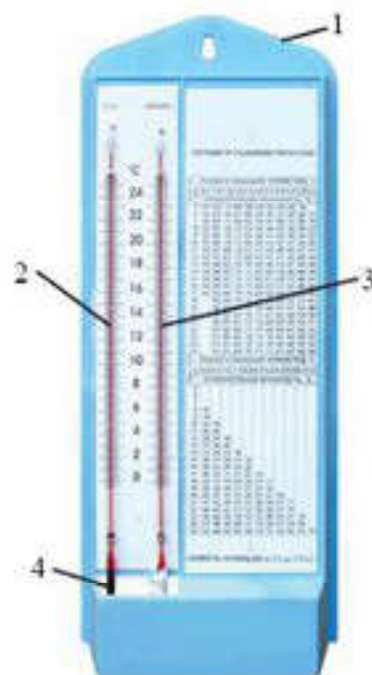
Гигрометр шашты (43.5-сурет) және конденсациялық (43.6-сурет) деп бөлінеді. Шашты гигрометрдің жұмыс істеу принципі адам шашының (жылқы жалының) ауа ылғалдылығы артқанда ұзаруына негізделген. Шашты гигрометрдегі (1) шаш ұзарған кезде (3) серіппеге бекітілген (2) тілшенің бағыты өзгереді (43.5-сурет). Конденсациялық гигрометрдің жұмысы абсолют ылғалдылықтың кестесі бойынша шық нүктесін анықтауға негізделген. Эфир толтырылған ыдысқа (1) ауаны груша (5) арқылы үрлеп енгізіп, эфирдің булануына қол жеткізеді (43.6-сурет). Сонда ыдыс салқындайды да, оның өңделген сыртқы металл бетінде (2) ауаның құрамындағы су буы конденсацияланады. Беткі қабаты (2) ауамен беттесетін (4) резенке аралық қабаттан бөлек, сондықтан (3) қабатта шық пайда болмайды. Гигрометрдің корпусында орналасқан (6) термометрдің көмегімен қоршаған ортаның



43.5-сурет



43.6-сурет



43.7-сурет

және шықтың пайда болу температурасын анықтайды. Қаныққан будың қысымының температураға тәуелділік кестесінен осы температураға сәйкес қысымды анықтауға болады. Содан кейін (43.1) формула бойынша ауаның салыстырмалы ылғалдылығын есептейді.

Психрометр (43.7-сурет) (2) құрғақ және (3) ылғал екі термометр бекітілген (1) корпуста тұрады. Корпусқа суы бар (4) ыдыс бекітілген. (3) термометрдің басы матамен оралып, суы бар ыдысқа батырылған. Су буланған кезде (3) термометр салқындайды. Психрометрлік кестенің көмегімен термометрлер көрсетіп тұрған температуралар айырымы бойынша ауаның ылғалдылығын табады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қаныққан және қанықпаған буларға анықтама беріндер.
2. Қаныққан будың қандай қасиеттерін білесіндер?
3. Қаныққан бу идеал газ заңдарына бағына ма? Түсіндіріндер.
4. Қанықпаған буды сипаттап шығындар.
5. Ауаның абсолют және салыстырмалы ылғалдылығы деген не?
6. Гигрометр мен психрометр қалай жұмыс істейді?
7. Неліктен адам құрғақ ауа кезінде 100°C және одан жоғары температураны онай көтереді?



Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Гигрометр және психрометрдің көмегімен ауаның салыстырмалы ылғалдылығын анықтаңдар.

Түсіндіріңдер

1. Неліктен температура артқан сайын көлемі тұрақты қаныққан будың қысымы идеал газдың қысымына қарағанда шапшаң артады?
2. Ауаның ылғалдылығын не үшін білу қажет?

Талдаңдар

1. Адамға ауаның қандай ылғалдылығы анағұрлым қолайлы? Неліктен? Жауаптарыңды негіздендер.
2. Ауаның температурасы 15°C болғанда салыстырмалы ылғалдылық 55% тең. Егер ауаның температурасы 10°C дейін төмендесе, шық түсе ме? Есептеп шығарыңдар.

Шығарыңдар

1. Бөлменің температурасы 16°C . Ауаның салыстырмалы ылғалдылығы 50% . Абсолют ылғалдылықты табыңдар.

Жауабы: $6,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$

2. Шық нүктесі 7°C , салыстырмалы ылғалдылық 50% тең. Ауаның температурасы қандай?

Жауабы: 18°C

3. Әрбір куб метрде $7,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ су буы болатын температурасы 15°C бөлмедегі ауаның салыстырмалы ылғалдылығы қандай?

Жауабы: $61,4\%$

4. Бөлмедегі ауаның салыстырмалы ылғалдылығы 60% . Бөлменің температурасы 16°C . Бетінде шық пайда болу үшін жалтырауық металл затты қандай температураға дейін салқындату керек?

Жауабы: 8°C

5. Ыдыста температурасы 17°C және салыстырмалы ылғалдылығы 70% болатын ауа бар. Егер ауаны 100°C дейін қыздырып, көлемін екі есе азайтсақ, ауаның ылғалдылығы қаншаға төмендейді?

Жауабы: 57%

Рефлексия

1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?

§ 44. Фазалық диаграммалар. Үштік нүкте. Заттың кризистік күйі



Тірек ұғымдар: фазалық диаграмма, сублимация, үштік нүкте, кризистік нүкте, кризистік күй, кризистік температура.

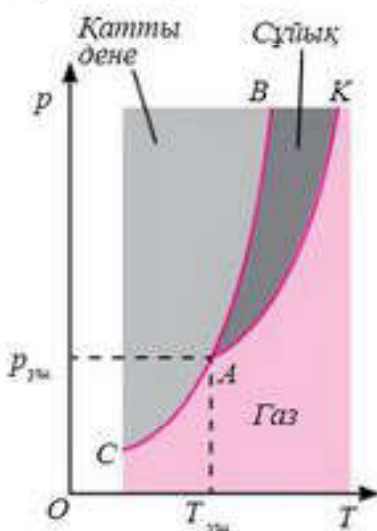
Бүгінгі сабақта: заттың фазалық күйлерімен және олардың диаграммаларымен танысасыздар; зат күйінің диаграммаларын оқуды үйренесіздер.

Фазалық диаграммалар. 44.1-суретте заттың үш фазалық күйінің диаграммалары бейнеленген. Сұйық пен оның буының арасындағы тепе-теңдік күйге AK булану қисығы сәйкес келеді. Заттың фазалық диаграммасындағы K — кризистік нүкте, A — үштік нүкте.

Заттың қатты және сұйық күйлері арасындағы тепе-теңдікті AB балку қисығы сипаттайды. Осы қисықтың нүктелеріне сәйкес келетін қысымдар мен температураларда, бір-біріне жанастырылған қатты дене мен балқыма динамикалық тепе-теңдікте болады. Бірлік уақытта сұйықтан қатты денеге қарай өткен молекулалар саны олардың арасын бөліп тұрған шекарадан қарама-қарсы бағытқа өткен молекулалар санына тең.

Балку қисығы мейлінше тік (вертикаль) кетеді, өйткені балку температурасы қысымға елеусіз ғана тәуелді (44.1-суретте ол оңға қарай сәл ауытқыған). Заттардың көпшілігінде байқалатын қысымның артуымен балку температурасының жоғарылауын осы арқылы көрнекі түрде көрсетуге болады.

Зат күйінің диаграммасындағы CA қисығы қысым мен температураның қатты дене молекулаларының (атомдарының) булану және олардың қатты дене бетіне конденсациялану процестерінің арасындағы тепе-теңдік орнайтын мәндеріне жауап береді. Қатты денелердің булану процесі *сублимация* деп аталады. Әрине, сублимацияға кері процесс — бұдан кристалдану қоса жүреді. Температура мен қысымның белгілі бір үйлесімінде “кристалл — бу” жүйесі динамикалық тепе-теңдікте болады. Кристалдың температурасының төмендеуімен оның қаныққан буының қысымы да азаяды (CA сублимация қисығы).



44.1-сурет

Үштік нүкте. Балку және бу түзілу қисықтары A нүктесінде қиылысады. Осы нүктені *үштік нүкте* деп атайды, өйткені, егер қысым p_{ym} және температура T_{ym} кезінде қатты, сұйық және газ тәрізді күйлердегі заттың қайсыбір мөлшері бір-бірімен жанасса, онда үш күйдің әрқайсысындағы заттың мөлшері жылу беруге немесе алуға қарамастан өзгеріссіз қалады.

Зат күйлерінің диаграммасынан қыздыру кезінде заттың қатты күйден сұйыққа айнамай, бірден газ тәрізді күйге өтуі мүмкін екені көрінеді. Қалыпты атмосфералық қысымда кристалл — сұйық — газ ауысуы үштік нүктеде қысымы осы қысымнан төмен болатын заттарда ғана болады. Үштік нүктеде қысымы атмосфералық қысымнан артық болатын заттар атмосфералық қысымда қыздыру нәтижесінде балқымайды, газ тәрізді күйге өтеді (сублимацияланады).

Мысалы, атмосфералық қысымда қатты көмірқышқыл қыздырған кезде балқымайды, сублимацияланады. Бұл CO_2 қосындысының үштік нүктесіне қалыпты атмосфералық қысымнан шамамен бес есе үлкен қысым сәйкес келетінімен түсіндіріледі.

Үштік нүктеге нақты айқын температура сәйкес келетіндіктен, ол термометрлік шкаланың тірек (негізгі) нүктесі қызметін атқара алады. Судың үштік нүктесінің температурасы $273,16 \text{ K}$ (яғни, $0,01^\circ\text{C}$) тең екен. Бұл ХБ жүйесіне термодинамикалық (абсолют) температураның өлшем бірлігінің (1 K) келесі анықтамасын енгізуге мүмкіндік берді: Кельвин судың үштік нүктесінің термодинамикалық температурасының $1/273,16$ бөлігіне тең.

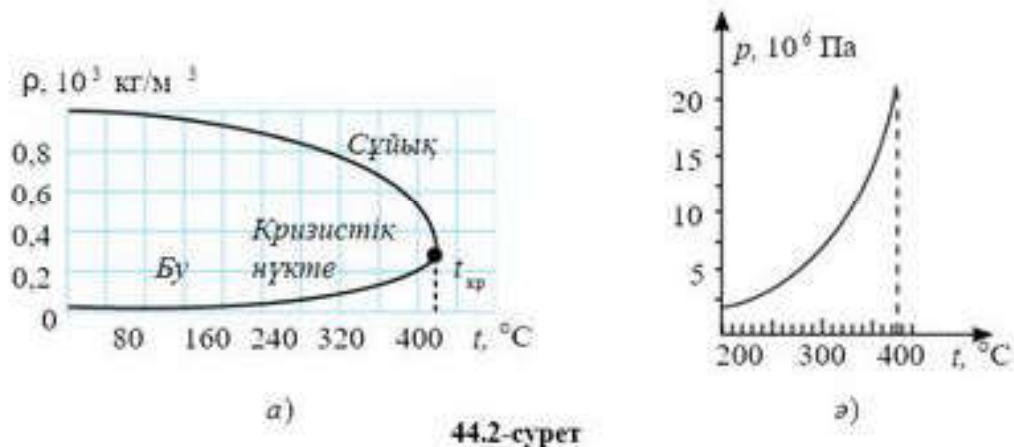
Кризистік нүкте. Бұды сұйыққа айналдыру үшін оның температурасын төмендетіп, қысымын арттыру керек екенін сендер білесіңдер.

1861 жылы Д.И. Менделеев әрбір сұйық үшін сұйық пен оның қаныққан буының арасындағы айырмашылық жоғалып кететін температураның болуы тиіс екенін тағайындады. Бұды сұйыққа және керісінше айналуын ағылшын ғалымы Т. Эндрюс (1813—1885) тәжірибелік жолмен зерттеді. Ол әрбір сұйық үшін осындай температураның болатынын көрсетті және ол үшін *кризистік температура* деген термин енгізді.

Заттың кризистік температурасы ($t_{кр}$) деп сұйық тығыздығы мен оның қаныққан буының тығыздығы бірдей болатын кездегі температураны айтады.

Судың және оның қаныққан буы тығыздығының температураға тәуелділігі 44.2, а-суретте көрсетілген. Тек тығыздық қана емес, сонымен қатар оның қаныққан буының қысымы да температурамен бізмәнді анықталады, олай болса, қаныққан бу үшін оның қысымының температураға тәуелділік графигін салуға болады (44.2, ә-сурет).

44.2, а-суреттен температураның жоғарылауымен изотерманың горизонталь бөлігі $t_{кр}$ кризистік температурада K нүктесіне қарай тартыла отырып қысқаратыны көрінеді. Соған сәйкес сұйық пен қаныққан бұдының меншікті көлемдеріндегі айырмашылық та, олай болса, олардың тығыздықтарындағы айырмашылық та азаяды. Кризистік температурада бұл айырмашылық толығымен жойылады. Онымен бірге сұйық пен оның буының арасындағы барлық айырмашылықтар жойылады.



44.2-сурет

Температураның кризистік мәнге $t_{кр}$ ұмтылуы кезіндегі изотермалардың горизонталь кесінділері жақындайтын және шекті болып табылатын K нүктесі *кризистік нүкте* деп, заттың K нүктесі арқылы бейнеленетін күйі *кризистік күй* деп, ал кризистік күйге сәйкес көлем $V_{кр}$, қысым $p_{кр}$ және температура $t_{кр}$ *кризистік шамалар* деп аталады.

Қаныққан будың қысымы температураға байланысты өсіп, кризистік температура кезінде $p_{кр}$ мәнге жетеді. Кризистік температурадан жоғары температураларда қаныққан бу ұғымы мағынасын жояды. Сондықтан қаныққан бу қысымының температураға тәуелділігінің қисығы кризистік нүктеде K аяқталады.

Кризистік температурадан жоғары температураларда зат кез келген қысымда біртекті болады. Бұндай температураларда затты ешқандай сығу арқылы сұйылту мүмкін емес.

Осы айтылғандардан газ бен бу арасында принциптік айырмашылық жоқ екені шығады. Әдетте, *газ деп заттың газ күйін, яғни температурасы кризистік температурадан жоғары кездегі, ал бу деп температурасы кризистік температурадан төмен кездегі заттың күйін айтады.*



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Су ыдыстың қақпағы ашық кезде тезірек қайнай ма, әлде жабық кезде ме?
2. Үштік нүкте деген не?
3. Кризистік температура деп нені түсінеміз? “Кризистік температура” терминін енгізген кім?
4. Сублимация деген не? Сублимацияға қандай процесс ілесе жүреді?
5. Абсолют қайнау температурасын кім тағайындады?
6. Заттың қандай күйі кризистік күй деп аталады?
7. Кризистік нүкте деген не? Кризистік шамалар деп нені айтады?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Қайнап жатқан шәугімнің аузына шыны жолақты қояйық. Қандай құбылысты байқайсыңдар? Жолақтың астында тұрған тәрелкеде не пайда болады? Неге?

Тәжірибе жасаңдар

Газдалған сусынның бетелкесіндегі сусынның $3/4$ бөлігін басқа ыдысқа құйыңдар. Содан кейін қақпағын жауып, шайқандар. Қандай құбылысты байқайсыңдар және оны түсіндіріңдер.

Талдаңдар

1. География пәнінен алған білімдеріңді пайдаланып, Жер бетіндегі және Қазақстанның қандай аймақтарында: а) ылғалдылық жоғары; ә) құрғақ климат екенін айтыңдар. Неге? Осы аймақтардың табиғаты қандай?

2. Күнделікті өмірде ылғалдылығы жоғары немесе керісінше төмен бөлмелерді кездестіресіңдер. Оны қалай реттеуге және болдырмауға болады?

3. Неге кризистік күйдегі сұйық және оның буының тығыздығы бірдей, ал булану жылуы нөлге тең?

4. Газ кризистік температурадан жоғары температурада сұйыққа айналмайды. Неге? Түсіндіріңдер.

Ойлап табыңдар

Қарапайым шашты гигрометр дайындаңдар. Сіріңкенің немесе тіс тазалағыштың ортасына бір тал шашты жабысқақ лентаның көмегімен жабыстырыңдар. Содан кейін шаштың екінші ұшын қарындаштың ортасына байлаңдар. Банка алып сіріңке түбіне жетпейтіндей етіп қарындашты банканың аузына көлденең қойыңдар. Бір апта бойы ауа райының өзгерісіне сәйкес сіріңкенің ауытқуын бақылаңдар. Дайындалған гигрометрмен ауаның ылғалдылығының өзгеруіне тәуелділігін анықтаңдар. Қорытынды жасаңдар.

Рефлексия

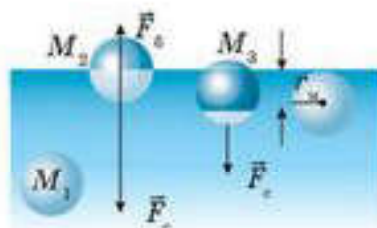
1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?

§ 45. Сұйықтың беттік қабатының қасиеттері



Тірек ұғымдар: сұйықтың беттік қабаты, беттік керілу, беттік керілу күші.

Бүгінгі сабақта: молекулалық физиканың негізгі ұғымдарымен таныласыңдар; температура мен молекуланың тұрақты қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы арасындағы байланысты анықтауды; идеал газ моделін құруды үйренесіңдер; молекулалық-кинетикалық тұрғыдан негізгі теңдеуді есеп шығаруда қолдануды үйренесіңдер.



45.1-сурет

Сұйықтың беттік қабаты. Сұйықтың ішіндегі молекулалық күштер әсерінің сұйықтың бетіндегі әсерінен қандай айырмашылығы бар екенін қарастырайық.

Молекулалық күштердің сұйықтың ішіндегі M_1 молекулаға түсірілген тең әсерлі күшінің орташа мәні нөлге жуық (45.1-сурет). Осы тең әсерлі күштің кездейсоқ ауытқулары M_1 молекуланы сұйық ішінде тек хаосты түрде қозғалуға ғана мәжбүр ете алады. Сұйықтың беттік қабатында орналасқан M_2 және M_3 молекулалардың жағдайы басқаша.

Молекулалардың төңірегінде r_m радиуспен молекулалық әсер сферасын сызайық (шамамен 10^{-9} м). Сонда M_2 молекула үшін төменгі жарты сферада жоғары жарты сфераға карағанда молекулалар саны көп, өйткені төменде сұйық, ал жоғарыда бу мен ауа ғана. Сондықтан M_2 молекула үшін молекулалық тартылыс күштерінің тең әсерлісі F_c төменгі жарты сферада жоғары жарты сферадағы молекулалық күштердің F_g тең әсерлісінен артық болады. F_g күші ескермеуге болатындай аз. M_3 молекулаға түсірілген молекулалық тартылыс күштерінің тең әсерлісі M_2 молекуламен салыстырғанда аз, себебі ол тек кара көк облыстағы молекулалардың әсерлерімен ғана анықталады. Ең бастысы M_2 және M_3 молекулаларға түсірілген тең әсерлі күштер сұйықтың бетіне перпендикуляр бағытта сұйық ішіне қарай бағытталған.

Сонымен, сұйықтың қалыңдығы молекулалық әсер радиусына тең болатын беттік қабатта орналасқан барлық молекулалары сұйықтың ішіне қарай тартылады екен (45.1-сурет). Бірақ сұйық ішіндегі кеңістіктің басқа да молекулалармен толуынан беттік қабат сұйыққа молекулалық қысым деп аталатын қысым тудырады. Теориялық есептеулер көрсеткендей, молекулалық қысымның шамасы соншалықты үлкен болады. Мысалы, су үшін ол $11 \cdot 10^8$ Па, эфир үшін $1,4 \cdot 10^8$ Па.

Беттік керілу. Сұйықтың бетінде орналасқан молекулалар оның ішіне тартылады да, олардың потенциалдық энергиясы сұйықтың ішіндегі молекулалардың потенциалдық энергиясынан артық болады. Мұндай қорытындыға молекулалардың өзара әсерлесуінің потенциал-

дық энергиясының теріс болатынын және сұйықтың беттік қабатындағы әсерлесетін молекулалар саны сұйықтың ішіндегі молекулаларымен салыстырғанда аз екенін ескерсек қана келеміз.

Сұйықтың беттік қабатындағы молекулалардың қосымша потенциалдық энергиясын *еркін энергия* деп атайды. Оның көмегімен сұйықтың еркін бетін азайтуға бағытталған жұмыс атқаруға болады. Керісінше сұйық ішіндегі молекуланы сұйықтың бетіне шығару үшін молекулалық күштерді жеңу керек, яғни жұмыс атқару қажет. Осы кезде еркін энергияның ΔW өзгерісі сұйықтың еркін бетіндегі ауданының ΔS өзгерісіне тура пропорционал болатыны анық:

$$\Delta W = \sigma \Delta S, \quad (45.1)$$

$\Delta W = A$ болғандықтан,

$$A = \sigma \Delta S. \quad (45.2)$$

Сонымен, сұйықтың еркін бетінің ауданының кемуі кезінде молекулалық күштердің A жұмысы ΔS шамасына тура пропорционал. Бұл жұмыс сұйықтың тегіне және сыртқы жағдайларға, мысалы, температураға тәуелді болуы тиіс. Осы тәуелділікті σ коэффициенті өрнектейді.

Сұйықтың еркін бетінің ауданы өзгергенде молекулалық күштер жұмысының сұйықтың тегіне және сыртқы шарттарға тәуелділігін сипаттайтын σ шамасы *сұйықтың беттік керілу коэффициенті* немесе *беттік керілу* деп аталады. σ шамасы *сұйықтың еркін бетінің ауданы бір бірлікке өзгергенде молекулалық күштердің атқаратын жұмысымен өлшенеді, яғни*

$$\sigma = \frac{A}{\Delta S}. \quad (45.3)$$

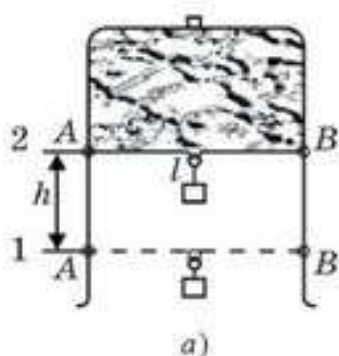
Беттік керілудің ХБ жүйесіндегі өлшем бірлігі — $\sigma = 1 \text{ Дж/1 м}^2 = 1 \text{ Н/м}$.

Кез келген жүйе өздігінен потенциалдық энергиясы минимал күйге өтетіні секілді, сұйық та өз бетінше өзінің еркін бетінің ауданы минимал болатын күйге өтуі тиіс. Мұны төмендегі тәжірибенің көмегімен дәлелдейік.

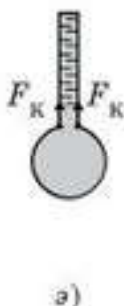
II әрпі түрінде іілген сымға жылжымалы AB белдікті бекітеді (45.2, *a*-сурет). Осындай раманы сабынды суға батырсақ, онда сабынның көпіршік қабыршағы пайда болады. Раманы сабынды судан шығарып алғаннан кейін AB белдік жоғары қарай көтеріледі, яғни молекулалық күштер сұйықтың еркін бетінің ауданын азайтады.

Бірдей көлем кезінде шар бетінің ауданы ең кіші мән қабылдайды, сондықтан салмақсыз күйде сұйықтың пішіні шар түріне ие болады. Осы себепті сұйықтың кішкентай тамшыларының пішіні шар тәрізді.

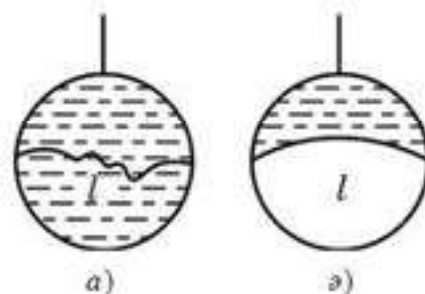
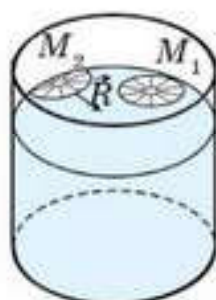
Беттік керілу күші. Сұйықтың бетінде орналасқан M_1 молекула сұйықтың ішінде орналасқан молекулалармен ғана емес, сонымен



45.2-сурет



45.3-сурет



45.4-сурет

қатар молекулалық әсер сферасының шегінде сұйық бетіндегі молекулалармен де әсерлеседі (45.3-сурет). Молекула үшін сұйық бетінің бойымен бағытталған молекулалық күштердің R тең әсерлісі нөлге тең, ал беттің жиегінде орналасқан M_2 молекула үшін ол нөлге тең емес. 45.3-суреттен көріп отырғанымыздай, күш еркін беттің шекарасына нормаль және беттің өзіне жанама бойымен бағытталған. Сұйық бетінің бойымен бағытталған молекулалық күштер сұйықтың еркін бетіндегі кез келген тұйық сызыққа нормаль бойымен, осы тұйық сызық қамтитын сұйық беті минимал болатындай бағытта әсер етеді.

Сымнан жасалған сақинаға ұзындығы l жіп байланған (45.4, а-сурет). Егер сақинада сабын қабыршағы болса, онда жіп қабыршақ үстінде қалай болса солай орналасады, өйткені молекулалық күштер жоғары контурмен шектелген беттің ауданын да, төменгі контурмен шектелген беттің ауданын да азайтуға тырысады. Енді қабыршақты жіптің астыңғы жағынан тесейік. Сонда молекулалық күштер жоғары контурмен шектелген бетті азайтып, жіп тартылады (45.4, б-сурет).

Сұйық молекулаларының өзара әсерлесуінен пайда болатын, сұйықтың еркін бетінің ауданын кемітуді тудыратын және осы бетке жанама бойымен бағытталған F_k күші **беттік керілу күші** деп аталады.

Енді белдікке әсер ететін F_k беттік керілу күшінің оның l ұзындығына пропорционал болатынын көрсетейік (45.2, а-сурет). Беттік керілу күшінің белдікті l -қалыптан 2 -қалыпқа алып өткенде атқаратын жұмысы $A = \sigma \Delta S$. Осы кезде сұйықтың ΔS еркін бетінің толық кемуі $2hl$, себебі еркін беттің саны екіге тең. Сондықтан $A = 2\sigma hl$.

Екінші жағынан, жұмысты күшті жолға көбейтіп те табуға болады ғой. Біздің жағдайымызда қабыршақ бетінің белдікпен екі жанасу сызығы болатындықтан (45.2, б-сурет), жалпы күш $2F_k$ және $A = 2F_k h$. Сонымен, $2F_k h = 2\sigma hl$ немесе

$$F_k = \sigma l. \quad (45.4)$$

Онда

$$\sigma = \frac{F_k}{l}. \quad (45.5)$$

Осыдан беттік керілу коэффициенті сұйықтың еркін беті шекарасының бірлік ұзындығына әсер ететін беттік керілу күшіне тең. σ өлшем бірлігі 1 Дж/м^2 екенін білеміз. Бірақ

$$1 \text{ Дж/м}^2 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м/м}^2 = 1 \text{ Н/м}.$$

Енді сұйықтың еркін бетінің ауданы минимал болатыны түсінікті. Молекулалық қысым күші сұйық бетінен молекулаларды сұйықтың ішіне қарай тартып алады, ал беттік керілу күші еркін беттің ауданын кішірейтеді, яғни осы бетте пайда болған “кемтіктің” (төмен кеткен молекуланың орнын) орнын жабады.

Сонымен, сұйықтың беттік қабаты әрқашанда керілу күйінде болады. Бірақ бұл күйді созылған серпімді қабыршақтың керілуімен салыстыруға болмайды. Керіліп тұрған қабыршақтың ауданы артқан кезде серпімділік күші де артып отырады, ал беттік керілу күші сұйық бетінің ауданына тәуелсіз. Мысалы, 45.4-суретте 1- және 2-калыптардағы күштер тең, себебі сұйықтың еркін бетінің бірлік ауданына келетін молекулалар саны бірдей.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Сұйықтың беттік қабатында өтіп жатқан процесті сипаттаңдар.
2. Еркін энергия дегеніміз не?
3. Беттік керілу коэффициентінің физикалық мағынасы қандай?
4. Беттік керілу күші дегеніміз не? Өлшем бірлігі қандай?

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Ыдысқа су құйып, оның бетіне тігін инесін қойыңдар. Бақыланған құбылысты түсіндіріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

1. Үстелдің бетіне бір тамшы су тамызыңдар. Тамшы а) үстелдің беті құрғақ; ә) үстелдің бір бөлігіне май жағылса, қандай пішін алады? Түсіндіріңдер.

2. Матаның бетіне май тамызыңдар. Бензиннің көмегімен дақты кетіріп көрейік. Оны центрінен бастап және шетінен сүртіндер. Нәтижесін қорытындылаңдар.

3. Үш терең емес ыдысқа құйылған судың бетіне пенопластың кішкене бөлігін, сіріңке, картонның қиындысын қойыңдар. Бірінші ыдысқа сабын, екіншісіне қант рафинадын, үшіншісіне бұрыш салыңдар. Осы ыдыстардағы денелерді бақылап, қозғалысын түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

Көйлекке тамған майдың дағын үтіктің көмегімен кетіруге бола ма? Неге?

Шығарыңдар

1. Диаметрі 0,14 м болатын сабын көпіршігін үрлеу үшін (изотермиялық процесте) қандай жұмыс жасалады?

Жауабы: 5 мДж

2. Өлшемдері 6 см және 8 см тең раманы судың бетіне қойыңдар. Егер раманың салмағы 2 г болса, онда оны қандай күшпен судың бетінен көтеріп алуға болады?

Жауабы: 61 мН

3. Диаметрі 0,4 мм тең тамшуырдың көмегімен 10 мг судың тамшыларын дәл тамызу үшін қажет судың беттік керілу коэффициентін есептеңдер.

4. Диаметрі 15,6 см, массасы 7 г болатын сақинаны сабынды судан алу үшін қандай күш атқарылады?

Жауабы: 109 мН

*5. Бір-бірінен 1 мм арақашықтықта орналасқан жіңішке жіптен жасалған радиусы 10 см болатын електен қанша суды алып кетуге болатынан анықтаңдар. Жіпке су жұқпайды.

Жауабы: 460 г

Рефлексия

1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?

§ 46. Жұғу және капиллярлық құбылыстар



Тірек ұғымдар: жұғатын сұйықтық, шеттік бұрыш, жұқпайтын сұйықтық, лап-ластық қысым, капиллярлық, капиллярлық құбылыстар.

Бүгінгі сабақта: сұйықтардың жұғатын және жұқпайтын қасиеттерімен, капиллярлық құбылыстармен және олардың табиғаттағы, техникадағы рөлімен танысаңыздар; есеп шығару кезінде лап-ластық қысымды өрнектейтін формуланы қолдануды үйренесіздер.

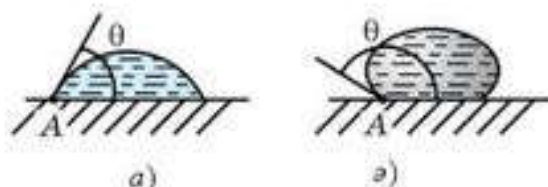
Жұғу. Шеттік бұрыш. Егер шыны таяқшаны сынапқа батырып алсақ, онда сынаптың жұғынын байқамаймыз. Ал егер осы таяқшаны суға батырып алсақ, онда оның ұшында су тамшысын байқаған болар едік. Бұл қарапайым тәжірибелер сынап молекулаларының бір-бірімен тартылу күшінің шыны молекулаларының тартылу күшінен артық болатынын көрсетеді, ал су молекулаларына келсек, олар бір-біріне шыны молекулаларына қарағанда әлсіз тартылады. Егер сұйық молекулаларының бір-біріне тартылу күші қатты дене молекулаларының өзара тартылғанына қарағанда әлсіз болса, онда *сұйық* осы затқа *жұғады*. Мысалы, су таза шыныға жұғады да, парафинге жұқпайды. Егер сұйық молекулаларының бір-біріне тартылу күші қатты дене молекулаларының тартылу күшінен артық болса, онда сұйық осы *затқа жұқпайды* дейді. Сынап таза шыныға жұқпайды, ал мыс пен мырышқа жұғады.

Қайсыбір заттан жасалған жазық пластинканы горизонталь орналастырып, оған зерттемек болып отырған сұйықты тамызайық. Сонда беттегі тамшы 46.1, *а*-суреттегідей не 46.1, *ә*-суреттегідей түрде орналасады. Бірінші жағдайда сұйық қатты денеге жұғады, ал екінші жағдайда жұқпайды. 46.1-суретте көрсетілген бұрыш θ *шеттік бұрыш* деп аталады.

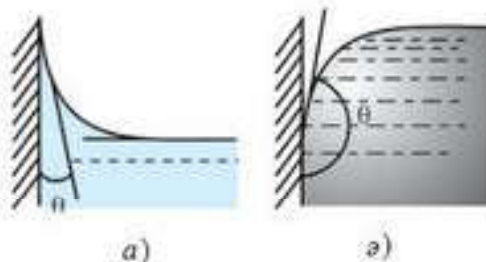
Ол қатты дененің жазық беті мен *A* нүктесі арқылы өтетін сұйықтың еркін бетіне жүргізілген жанама арасында пайда болады. Жұғатын сұйықтар үшін шеттік бұрыш әрқашанда сүйір, ал жұқпайтын сұйықтар үшін доғал.

Қатты бет вертикаль болғанда сұйық өзі құйылған ыдыстың шетіне жұғатын жағдайда көтеріледі де (46.2, *а*-сурет), ал жұқпайтын жағдайда төмен түседі (46.2, *ә*-сурет).

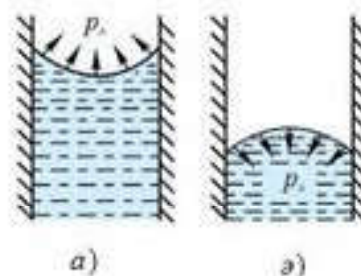
Сұйықтың майысқан бетінің тудыратын қысымы. Сұйық бетінің ыдыс жиегінде майысатынын жінішке түтіктерде жақсы бақылауға болады, өйткені бұл жерде сұйықтың беті түгел майысады. Қимасы дөңгелек түтікте бұл бет сфераның бір бөлігі болады да, ол *мениск* деп



46.1-сурет



46.2-сурет



46.3-сурет

аталады (грекше *менискос* — айдың орағы, доғасы). Жұғатын сұйықтың менискісі ойыс та, ал жұқпайтын сұйыктікі дөнес (46.3-сурет).

Мениск бетінің ауданы түтіктің ішкі қимасының ауданынан артық, сондықтан молекулалық күштердің әсерінен сұйықтың майысқан беті жазылуға тырысады да, қосымша p_π қысым тудырады, бұл қысым жұғатын сұйық үшін (ойыс мениск) сұйықтан тысқары, ал жұқпайтын сұйық үшін (дөнес мениск) сұйықтың ішіне қарай бағытталған. Сөз етіп отырған қысым оны анықтаған француз ғалымы П. Лапластың құрметіне *лапластық қысым* деп аталады. Сұйықтың радиусы R болатын сфералық бет үшін бұл қысым

$$p_\pi = \frac{2\sigma}{R} \quad (46.1)$$

формуласымен анықталады.

Капиллярлық құбылыстар. Егер суға жіңішке шыны түтікті батырсак, онда су түтікке тартылып, оның түтіктегі деңгейі түтіктің сыртындағы деңгейінен h биіктікте болады (46.4, *a*-сурет). Бұл түтіктегі p_π лапластық қысымының жоғары қарай бағытталатынымен түсіндіріледі. Ол суды жоғары қарай тартып, түтіктің h биіктіктегі су бағанының гидростатикалық $p_c = \rho gh$ қысымымен теңескенге дейін көтеріледі:

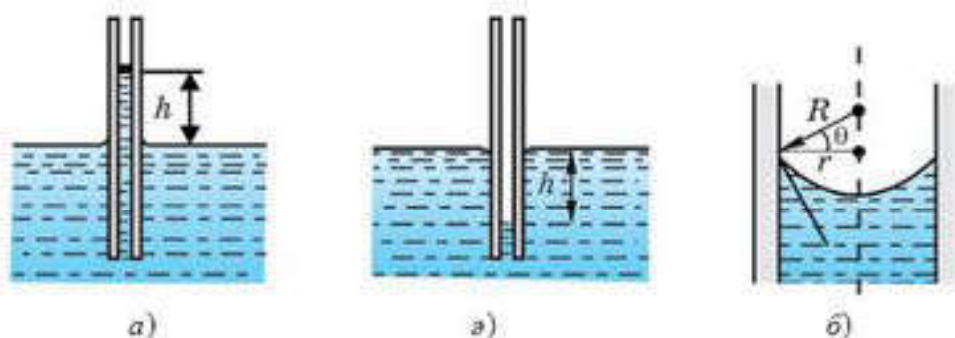
$$p_\pi = \frac{2\sigma}{R}, \text{ онда } p_\pi = p \text{ кезінде } \frac{2\sigma}{R} = \rho gh, \text{ осыдан} \\ h = \frac{2\sigma}{\rho g R}. \quad (46.2)$$

Толық жұғатын кезде ($\theta = 0$), жіңішке түтіктегі менискінің түрі жарты сфераны береді де, сфералық беттің R радиусы түтіктің ішкі r радиусына тең болады, сонда

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}. \quad (46.3)$$

Жартылай жұқпайтын кезде ($\theta \neq 0$) менискінің радиусы $R = \frac{r}{\cos \theta}$ (46.4, *b*-сурет) және

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{\rho g r}. \quad (46.4)$$



46.4-сурет

46.4. *a, б*-суреттерден түтіктің ішкі диаметрі неғұрлым кіші болса, соғұрлым h биіктіктің үлкенірек болатынын көреміз. Ішкі диаметрі шаштың диаметрімен шамалас (не одан да кіші) болатын түтіктерде судың көтерілуі біршама жоғары, сондықтан мұндай түтіктерді **капиллярлар** деп атайды (грекше *капиллярис* — шаштай жіңішке). Жұғатын сұйықтар капиллярларда жоғары көтеріледі (46.4, *a*-сурет), жұқпайтын сұйықтарда төмен түседі (46.4, *б*-сурет). Жұғатын сұйықтардың капиллярларға тартылуы немесе жұқпайтын сұйықтардың капиллярлардан итеріліп шығарылуы **капиллярлық құбылыстар** деп аталады.

Капиллярлық құбылыстар табиғатта және техникада үлкен рөл атқарады. Өсімдіктер көптеген капиллярлардан тұрады. Ағаштарда топырақтағы ылғал капиллярлардың бойымен көтеріліп, жапырақтар арқылы атмосфераға буланады. Топырақта да капиллярлар болады, топырақ неғұрлым тығыз болған сайын, олар соғұрлым жіңішке. Су осы капиллярлармен жер бетіне көтеріліп, тез буланып кетеді де, жер қатып қалады. Көктемде жер жыртқан кезде, осы капиллярлар бұзылып, топырақ бетіндегі ылғал сақталып қалады.

Техникада да көптеген жағдайларда осы капиллярлық құбылыстарды ескеруге тура келеді.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Сұйықтың қатты денеге жұғу-жұқпауының механизмі қандай?
2. Лапластық қысымы дегеніміз не? Ол қалай бағытталған?
3. Капиллярлық құбылысты түсіндіріңдер.
4. Капиллярлық құбылыстарға өмірден мысалдар келтіріңдер.
5. Күзде және көктемде жер жыртудың қандай тиімділіктері бар?
6. Неліктен суды (булануы, конденсациясы, қатуы, капиллярлармен көтерілуі) өмірмен, тіршілікпен қатар атайды?

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Суға бор түйіршіктерін салыңдар. Сонда бор түйіршіктерінен барлық бағытта көпіршіктер тарай бастайды. Бұл құбылысты түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

1. Егер кешкісін тұман болса, онда түнде суық болмайды. Неліктен?
2. Көктемде жерді жыртады және тырмалайды. Ол жердегі ылғалды сақтауға қалай көмектесетінін түсіндіріңдер.
3. Неге құрғақ ағаш дымқыл ағашқа қарағанда жақсы жанады?

Зерттеңдер

Суға сорғыш қағаздың жіңішке жолағын салып, судың қандай биіктікке көтерілетінін өлшеңдер. Судың көтерілу биіктігі арқылы қағаз талшықтарының капиллярлық түтігінің диаметрін анықтаңдар.

Шығарыңдар

1. Судың беттік коэффициентін анықтау үшін шығатын саңылауының диаметрі $d = 2$ мм болатын дәрі тамызғыш пайдаланды. $n = 40$ тамшының массасы $m = 1,9$ г болып шықты. Осы мәліметтер бойынша σ беттік керілу коэффициентін есептеңдер.
Жауабы: 74 мН/м

■2. Диаметрлері әртүрлі екі капиллярлық түтікті суға батырғанда олардың деңгейлерінің айырмасы $\Delta h_1 = 2,6$ см орнықты, ал осы түтіктерді спиртке батырғанда деңгейлер айырмасы $\Delta h_2 = 1$ см болды. Судың $\sigma_1 = 73$ мН/м беттік керілу коэффициентін біле отырып, спирттің σ_2 беттік керілу коэффициентін табыңдар.
Жауабы: 22 мН/м

3. Бір-бірінен $d = 0,2$ мм қашықтықта орналасқан екі параллель пластиналардың арасымен су қандай h биіктікке көтеріледі? Судың беттік керілу коэффициенті $\sigma = 73$ мН/м.
Жауабы: 7,3 см

Рефлексия

1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?

§ 47. Кристалл және аморфты денелер



Тірек ұғымдар: аморфты денелер, кристалдар, поликристалдар, монокристалдар, кристалдар анизотропиясы, кристалдық құрылым түрлері.

Бүгінгі сабақта: кристалдық және аморфты денелермен және олардың қасиеттерімен танысасыздар; әртүрлі қатты денелерді мысалға ала отырып, кристалдық және аморфты денелер құрылымдарын ажыратуды үйренесіңдер; қатты дене көзгісіне кристалл торларындағы ақаудың әсерін сипаттауды үйренесіңдер.

Ұқсастықтары мен айырмашылықтары. Физикада қатты дене деп тек кристалл денелерді ғана айтады. Аморфты денелердің сырт қарағанда көлемін және пішінін сақтауы оларды қатты дене етіп көрсеткенмен, бұл денелер өте тұтқыр сұйық деп қарастырылады. Температура жоғарылаған сайын олардың сұйыққа тән қасиеттері бірден көріне бастайды, бірте-бірте еріп, сұйықтың барлық қасиеттеріне ие болады. Аморфты денелердің белгілі балқу температурасы жоқ, қыздырған кезде олар бірте-бірте еріп, олардың тұтқырлығы азаяды. Кристалл денелердің белгілі балқу температурасы бар, тұрақты қысымда ол температура өзгермейді. Аморфты денелердің қасиеттері барлық бағыттар бойынша бірдей. *Аморфты денелер — изотропты*. Кристалдың қасиеттері әртүрлі бағыттарда түрліше болады. *Кристалдар — анизотропты*. Кристалда жарықтың таралу жылдамдығы, жылу өткізгіштік коэффициенті, серпімділік модулі және басқа да физикалық қасиеттері ондағы бағытқа тәуелді.

Аморфты денелер. Атомдарының ретті орналасуы алыс қашықтықтарда да қайталанып отыруымен сипатталатын кристалдық денелерден аморфты денелердің айырмашылығы, мұнда тек жуық тәртіп қана орын алады. Кейбір заттар кристалл және аморфтық түрде де бола алады.

Кристалл және аморфты денелердің айырмашылығы әсіресе жылулық қасиеттерінен қатты білінеді. Кристалл денелердің белгілі балқу температурасы болады. Кристалл заттың балқу графигінде горизонталь бөлік бар, ол балқу температурасының балқу процесінің барлық кезеңінде тұрақты екенін көрсетеді. Аморфты денелерде белгілі балқу температурасы жоқ. Қыздырған кезде аморфты дене жұмсараяды, оның молекулалары өз көршілерінен оңай айырыла бастайды, оның тұтқырлығы кемиді, ал жеткілікті жоғары температурада ол өзін тіпті тұтқырлығы аз сұйық тәрізді ұстайды. Аморфты денелердің балқу графигінде горизонталь бөлік жоқ. Сондықтан қатты аморфты денелерді өте тұтқыр сұйық деп қарастыруға болады. Олар толық изотропты.

Көптеген денелерді аморфтық күйден кристалдық күйге және керісінше өткізуге болады. Мысалы, кәдімгі шыныны белгілі темпе-

ратурада ұстап тұрса, онда ол ұсақ кристалдарға айналып, шыны бұлдырланып кетеді.

Кристалдар. Өзінің формасын да, көлемін де сақтайтын затты қатты дене деп атайтынымыз белгілі. Бірақ бұлар заттың қатты күйін тек сыртқы түріне қарап қана сипаттайды. Физикалық тұрғыдан алғанда, біз бұл белгілеріне қарап қатты күйді сұйық күйден айыра алмаймыз.

Қатты денелерді зерттеген кезде табиғатта олардың белгілі бұрыштармен орналасқан жазық беттерінің болатыны, кей жағдайларда олардың дұрыс көпбұрыштар түрінде кездесетіні белгілі. Мұндай қатты денелерді *монокристалдар* деп атайды (грекше *моно* — бір). Көпшілігінде монокристалдардың өлшемдері өте кішкентай, әйтсе де олардың арасында үлкендері де бар, мысалы, тау хрусталінің кейбір монокристалының өлшемі адам бойымен теңеседі.

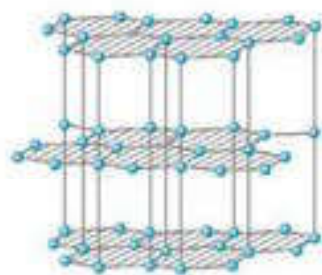
Кристалдардың ішкі құрылысын рентген сәулелерінің көмегімен зерттеулер олардағы бөлшектердің (молекулалар, атомдар және иондардың) дұрыс орналасатынын көрсетті, яғни олар *кристалдық (кеңістіктік) тор түзеді. Кристалдық тордағы қатты дененің бөлшектерінің ең орнықты тепе-теңдік қалтына сәйкес нүктелері тордың түйіндері* деп аталады.

Тордың түйіндері дұрыс орналасып, кристалл ішінде периодты түрде қайталанып отырады. Бөлшектердің кристалдық тор түйіндерінде дұрыс орналасуы *алыс реттілік* деп аталады.

Физикада қатты денелер деп кристалдық құрылымы бар денелер ғана аталады. Басқаша айтқанда, қатты дене бөлшектерінің орналасуында алыс реттілік болу керек.

Кеңістіктік тор. Кристалдағы бөлшектердің дұрыс орналасуынан кристалдардың кейбір қасиеттерінің бағытқа тәуелділігі, яғни *анизотропиясы* шығады.

Көптеген кристалдарда кристалдың механикалық беріктігінің бағытқа тәуелділігі айқын білінеді. Мысалы, су ішінде слюда қабыршықтарға жеңіл ыдыраса, ал тас тұзы кубиктерге ыдырайды. Бұл тәуелділік әсіресе графитте жақсы көрінеді. Графит кристалының әрбір қабатында көміртек атомдары дұрыс алтыбұрыштардың төбелерінде орналасқан, ал іргелес қабаттардың арақашықтығы іргелес орналасқан атомдардың арақашықтығынан 2,5 есе артық (47.1-сурет). Сондықтан графиттегі қабаттар бір-біріне қатысты жеңіл сырғып кетеді, оның бұл қасиетін біз қарындашпен жазған кезде пайдаланамыз. Сонымен, графиттің осы қасиетін майлағыш материал ретінде де пайдаланады (әсіресе жоғары температура кезінде).



47.1-сурет

Қатты қыздырылған сымның ұшын бетіне балауыз жағылған кварцты кристалл жағының ортасына

тигізсек, онда балауыз эллипс түрінде балқиды (47.2-сурет). Демек, кварц кристалының жылу өткізгіштігі бағытқа тәуелді. Тәжірибе басқа кристалдар үшін де олардың қасиеттерінің бағытқа тәуелді болатынын көрсетеді.



47.2-сурет

Анизотропия қасиетінің тек монокристалдарға ғана тән болатынын тағы да айта кетейік. *Қатты денелердің көпшілігінің құрылымы поликристалды* (грекше *поли* — көп), яғни олар микроскоппен ғана көруге болатын өте ұсақ кристалдардың жиынтығынан тұрады. Бұл шағын кристалдардың бір-біріне қатысты хаосты орналасуынан қатты дене тұтастай алғанда изотропты, яғни жеке шағын кристалдардың анизотропиясы болса да, дененің барлық бағыттардағы қасиеттері бірдей. Аморфты денелер де изотропты, себебі олардың кеңістіктік торы жоқ. Поликристалды денелер мен аморфты денелердің айырмашылығы мынада: *поликристалдық дененің анизотропия байқалатын өте кішкентай бөлігін бөліп атуға болады, ал аморфты денелердің кез келген бөлігін қарастырсақ та, ол әрқашан изотропты*.

Тәжірибе көрсеткендей, қатты зат бөлшектерінің орналасуында идеал алыс тәртіп еш уақытта іс жүзінде кездеспейді екен. Кристалдағы идеал тәртіптен кез келген ауытқуды *кристалдық тордың ақаулары (дефект)* деп атайды.

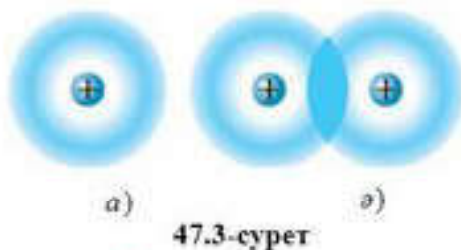
Тордың ең маңызды ақауларының бірі — кристалдағы бөлшектердің әрбір уақыт мезетінде жылулық қозғалысының әсерінен болатын бөлшектердің орналасуындағы тәртіптің бұзылуы. Шындығында, бөлшектер өне бойы тербеліп тұрады, сондықтан түйіндер тек әрбір бөлшектің орташа қалпын ғана анықтайды.

Кристалл тордағы кемтіктер қатты дененің көптеген қасиеттеріне, мысалы, беріктігіне, майысқыштығына, электр өткізгіштігіне және т.б. қасиеттеріне үлкен әсерін тигізеді.

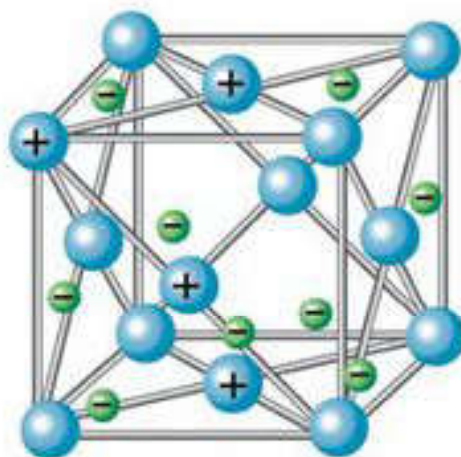
Кристалдық құрылымдардың түрлері. Кристалдардың әртүрлі типтерін және түйіндердің кристалдық торда орналасу мүмкіндіктерін кристаллография зерттейді. Физикада кристалдық құрылымдарды геометриялық тұрғыдан емес, кристалдағы бөлшектер арасындағы өзара әсерлесу күштерінің сипаты, яғни бөлшектер арасындағы байланыстардың түрлері бойынша қарастырады. Кристалл торының түйіндерінде орналасқан бөлшектер арасында әсер ететін күштердің сипаты бойынша кристалдық құрылымдарды төрт түрге бөледі: *иондық, атомдық, молекулалық және металдық*.

Иондық кристалдық құрылым тор түйіндерінде оң және теріс зарядталған иондардың болуымен сипатталады.

Тор түйіндерінде бейтарап атомдардың болуымен сипатталатын құрылым *атомдық кристалдық құрылым* деп аталады. Олар *кова-*



47.3-сурет



47.4-сурет

ленттік байланысқан. **Коваленттік байланыс** деп іргелес орналасқан екі атомның өзара екі валенттік электрондар алмасуы кезінде туатын, тартылыс күшінің салдарынан пайда болатын байланысты атайды. Әр атомнан бір-бірден алынған екі валенттік электрондар енді бір мезгілде екі атомға да тәуелді. Бұл электрондар атомдар арасында жүріп байланыстыру арқылы оларды молекулаға айналдырады (47.3, ә-сурет). Мұндай молекулаларға H_2 , N_2 және т.б. молекулалар жатады. Коваленттік байланыс әртүрлі атомдарды молекулаға біріктіре алады: H_2O , NH_3 , SO_2 , CH_4 , SiO_2 және т.б.

Молекулалық кристалдық құрылым кеністік торының түйіндерінде де заттың бейтарап молекулаларының орналасуы-

мен ерекшеленеді. Түйіндерде оларды молекулааралық күштер ұстап тұрады.

Металдың кристалдық торының түйіндерінде он зарядталған металл иондары бар (47.4-сурет). Барлық металдар атомдарының валенттік электрондары, яғни атом ядросынан ең алыс орналасқан электрондар атомдармен нашар байланысқан. Олар атомдарын тастап, кристалл торының бойында хаосты қозғалады, оларды жеке атомдар немденбейді. Мұндай электрондар атомдар арасында емін-еркін қозғалып жүре алады.

Бірінші жуықтауда металдағы еркін электрондардың қозғалысын идеал газ молекулаларының қозғалысына ұқсатуға болар еді. Сондықтан кейде металдағы еркін электрондар жиынын электрондық газ деп алып, есептеулер кезінде оларға идеал газ заңдарын қолданады. Металдарда электрондық газдың болуымен олардың жоғары жылу өткізгіштігі мен жақсы электр өткізгіштігі түсіндіріледі.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Аморфты денелердің қасиеттерін атаңдар. Мысал келтіріңдер.
2. Кристалды қасиеттерін атаңдар. Мысал келтіріңдер.
3. Монокристалл деген не?
4. Кристалл торында қандай нүктелер тордың түйіндері деп аталады? Олар қалай орналасқан?
5. Кристалл торларының қандай ақауларын білесіңдер?
6. Қандай денелер поликристалды құрылымды болып табылады?
7. Кристалдық құрылымның қандай түрлерін білесіңдер?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Үлкейткіш шыны арқылы әртүрлі металдардың: шойынның, мыстың және т.б. сынықтарын қараңдар. Олардағы осы металл кесегін құрайтын ұсақ кристалдардың қырларын табыңдар.

Тәжірибе жасаңдар

Үйде ас тұзының қаныққан ерітіндісін әзірлеңдер. Оны сүзгіден өткізіңдер де, бірнеше күнге жылы жерге қойып қойыңдар. Ыдыстың түбінде түзілген кристалдардың ішінен неғұрлым үлкен әрі мөлдірін таңдап алыңдар. Ерітіндіні тағы бір рет сүзгіден өткізіп, оған таңдап алған кристалды әрі қарай өсіру үшін салыңдар. Бірнеше күннен кейін алынған кристалды физика сабағында көрсету үшін алып келіңдер.

Түсіндіріңдер

1. Кристалл және аморфты денелердің ұқсастығы мен айырмашылығы неде?
2. Кристалдық құрылымдарының әрқайсысын түсіндіріп, мысал келтіріңдер.
3. Металл неге жылу мен электр тогын жақсы өткізеді?
4. Кристалдар іс жүзінде қайда қолданылады?
5. Кристалдық торлар құрылымындағы ақаулар кристалдардың қасиеттеріне қалай әсер етеді?
6. Кристалл денелердің беріктігін қандай тәсілдермен арттыруға болады?
7. Аязды күні қардың сықырлауын түсіндіріңдер.

Талдаңдар

1. Кристалдарда бөлшектердің ретпен орналасатыны туралы көзқарастың дұрыстығын қандай тәжірибелер дәлелдейді?
2. Жасанды кристалдарды не үшін өсіреді?
3. Кристалдың өсу жылдамдығы әртүрлі бағытталған. Осы тұжырым нені білдіреді?

Рефлексия

1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?

§ 48. Қатты денелердің механикалық қасиеттері



Тірек ұғымдар: деформация, абсолют және салыстырмалы деформациялар, механикалық кернеу, серпімді және пластикалық деформациялар.

Бүгінгі сабақта: деформация түрлерімен, серпімділік модулімен, Юнг модулімен танысасыздар; Гук заңының, механикалық кедірудің, серпімді деформацияланған дене энергиясының формулаларын есептер шығаруда қолдануды үйренесіздер.

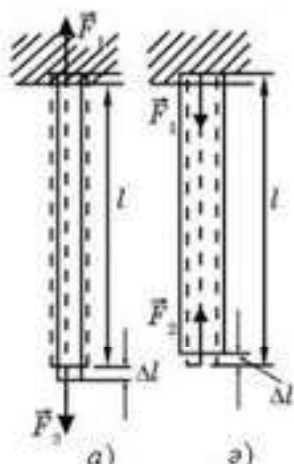
Деформацияның түрлері. Қайсыбір себептердің әсерінен дене пішінінің (формасының) немесе көлемінің өзгеруін *деформация* деп атайды.

Егер сырықтың (шыбық) ұштарына оның осі бойымен екі жаққа бағытталған F_1 және F_2 күштерді түсірсек, онда ол не созылады, не қысқарады. Түсірілген күштің әсерінен дене ұзындығының бір бағытта созылуын *бойлық созылу деформациясы* деп атайды (48.1, а-сурет). Өзін бір бағытта ығыстырып жатқан күштің әсерінен дене ұзындығының кемуі *бойлық сығылу деформациясы* деп аталады. Деформацияның екі жағдайында да дененің көлденең қимасының ауданы аздап өзгереді (48.1, ә-сурет).

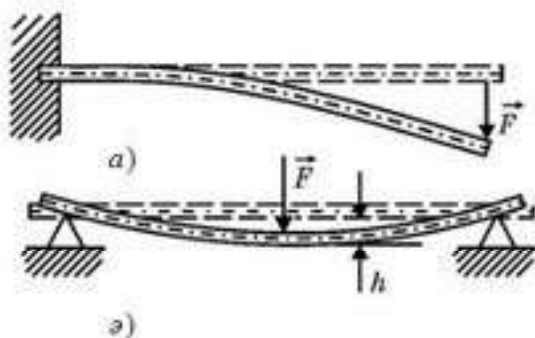
Денені барлық бағытта созып жатқан күштің әсерінен дене көлемінің ұлғаюы *барлық жаққа созылу деформациясы* деп аталады. Жан-жақтан сығатын күштің әсерінен дене көлемінің кемуі *барлық жақтан сығылу деформациясы* деп аталады.

Егер сырықтың (шыбық) бір ұшын бекітіп қойып, оның еркін ұшына сырықтың (шыбық) осіне перпендикуляр күш түсірсек, онда сырық майысады (48.2, а-сурет). Екі тұғырға бекітілген сырықтың ортасына көлденең F күшпен әсер етсек, онда ол иіледі (48.2, ә-сурет). Оське перпендикуляр күштің әсерінен сырықтың иілуі *көлденең иілу деформациясы* деп аталады. Иілу кезінде сырықтың дөңес жағы созылады, ойыс жағы сығылады.

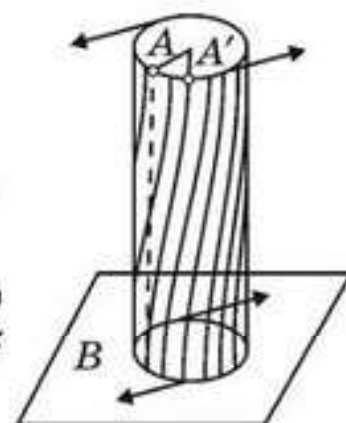
Сырықтың екі ұшына шеттерін екі жаққа қарай (карама-қарсы) бұратын қос күш түсірсек, онда сырықтың бұралғанын байқаймыз



48.1-сурет

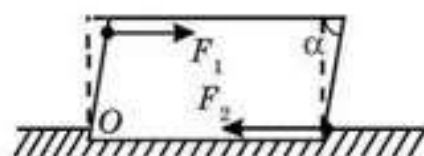


48.2-сурет



48.3-сурет

(48.3-сурет). Осы кезде оның жоғары қабаттары төменгі қабаттарға қатысты бұрылады. Дененің параллель қабаттарының бір-біріне қатысты қос күштің әсерінен бұрылуы *бұралу деформациясы* деп аталады.



48.4-сурет

Енді қатты білеушені бекітіп қойып, оны орнынан қозғауға тырысатын F_1 күшпен әсер етейік (48.4-сурет). Білеушенің бекітілген жерінде модулі жағынан дәл осындай, ал бағыты бұл күшке қарама-қарсы F_2 күш пайда болады. Осы күштердің әсері білеушені қайсыбір бұрышқа ығыстырады. Осы кезде білеушенің жоғары қабаттары төменгі қабаттарға қатысты орын ауыстырады. Дененің параллель қабаттарының бір-біріне қатысты салыстырмалы түрде параллель орын ауыстыруы *ығысу деформациясы* деп аталады.

Жоғарыда айтылып кеткен деформациялардың әрқайсысы кіші де, үлкен де бола алады. Олардың әрбіреуін Δa абсолют деформациямен бағалауға болады. *Абсолют деформация* деп күш әсерінен болған дененің қайсыбір өлшемінің сандық өзгерісін атайды. Мысалы, дененің біржақты созылуы (сығылуы) кезіндегі абсолют деформациясы дене ұзындығының Δl өзгерісі (48.1-сурет), жан-жақты созылу (сығылу) кезіндегі абсолют деформациясы дене көлемінің ΔV өзгерісі және т.с.с.

Дене көлемінің немесе пішінінің түсірілген күштер әсерінен болатын өзгерісін сипаттайтын шама ϵ (грекше “эпсилон”) *салыстырмалы деформация* болып табылады. ϵ *салыстырмалы деформация* деп дененің бастапқы a өлшемінің қандай бөлігін Δa абсолют деформация құрайтынын көрсететін санды атайды :

$$\epsilon = \frac{\Delta a}{a}. \quad (48.1)$$

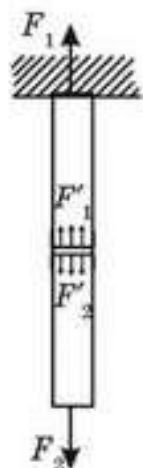
Мысалы, біржақты созылу (сығылу) кезінде

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (48.2)$$

Ығысу кезінде салыстырмалы деформация ретінде $\operatorname{tg} \alpha$ алынады:

$$\epsilon = \operatorname{tg} \alpha. \quad (48.3)$$

Механикалық кернеу. 48.1, a -суретте деформацияланған сырықта оның осіне перпендикуляр жұқа қабатты ойша бөліп алайық (48.5-сурет). Ол сырықты екі бөлікке бөледі. Сырықтың екі бөлігінің де тепе-теңдікте болуынан сырықтың жоғары жағы бөлініп алынған қабатқа F_1 күшке тең F_1' , ал төменгі жағына F_2 күшке тең F_2' күшпен әсер етеді. Деформацияланған дененің ішінде пайда болатын осы күштер *ішкі күштер* деп аталады. Олар дененің әрбір элементінің деформациясын (біздің жағдайымызда — созылу) тудырады.



Егер сырыққа біртекті F_1 және F_2 сыртқы күштер сырық осінің бойымен әсер етсе, онда F_1' және F_2' ішкі күштер көлденең қиманың S ауданы бойынша біркелкі таралады.

Деформацияланған қатты денедегі ішкі күштердің әсерін сипаттайтын шама механикалық кернеу деп аталады. Механикалық кернеу деформацияланған дене қимасының бірлік ауданына әсер ететін ішкі күшімен өлшенеді:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (48.4)$$

σ механикалық кернеудің ХБ жүйесіндегі өлшем бірлігі:

$$[\sigma] = [F/S] = 1 \text{ Н/1 м}^2 = 1 \text{ Па}.$$

48.5-сурет

ХБ жүйесінде σ бірлігі ретінде қимасының 1 м^2 ауданына 1 Н ішкі күш әсер ететін материалдың механикалық кернеуі алынады.

Серпімділік, пластикалық, морттық және қаттылық. Деформацияланған дененің сыртқы күштердің әсері тоқтағаннан кейін өзінің бұрынғы пішіні мен көлемін қабылдау қасиеті *серпімділік* деп аталады. Денеге түсірілген сыртқы күштердің әсері тоқтаған бойда жоғалатын дененің деформациясы *серпімді деформация* деп аталады.

Тәжірибе көрсеткендей, денені сыртқы күш әсері тоқтағаннан кейін өзінің бастапқы пішіні мен көлемін қалпына келтіре алмайтындай дәрежеге дейін деформациялауға болады екен. Денелердің сыртқы әсері тоқтағаннан кейін де деформацияны сақтап қалу қасиеті *пластикалық* деп аталады.

Дененің серпімділігі, негізінен, олар жасалған материалға байланысты анықталады. Мысалы, болат пен резенке серпімді, ал мыс пен балауыз пілгіш. Материалдарды серпімді және пілгіш деп бөлу шартты нәрсе, себебі көп жағдайларда әрбір материал әрі серпімді, әрі пластикалық. Мысалы, болат пружинаны қатты созып, енді қайтып орнына келе алмайтындай етуге болады, ал мыс спиральды аз созсақ, ол кері серпіледі. Тәжірибе көрсеткендей, материалға түсетін жүктемені бірте-бірте арттырған кезде әуелі серпімді деформация, кейін пілгіштік деформация пайда болады екен.

Сонымен бірге материалдың қасиеттері сыртқы шарттарға қатты тәуелді. Мысалы, әдетте пілгіш болып келетін қорғасын төменгі температуралар кезінде серпімді, ал серпімді болат жоғары қысым немесе жоғары температура кезінде пластикалық.

Машина жасау өндірісінде материалдардың ескеруді аса қажет ететін механикалық қасиеттеріне морттық және қаттылық жатады.

Іс жүзінде аз жүктемелер кезінде серпімді деформацияланатын, ал сыртқы жүктемені арттырған кезде қалдық деформация пайда болмас-

тан бұрын қирайтын материалдар кездеседі. Мұндай материалдар *морт материалдар* деп аталады (шыны, кірпіш, керамика).

Материалдың қаттылығын түрліше тәсілдермен анықтайды. Көбіне *қаттырақ материал* деп екінші материалдың бетіне сызған кезде із қалдыратын материалды атайды. Ең қатты материал — алмаз.

Гук заңы. Серпімділік модулі. Серпімді деформациялар мен материалдағы ішкі күштердің арасындағы байланысты тұңғыш тағайындаған — ағылшын ғалымы Р. Гук. Гук заңының тұжырымдамасы мынадай: *серпімді деформацияланған денедегі механикалық кернеу осы дененің салыстырмалы деформациясына тура пропорционал, яғни*

$$\sigma = k\varepsilon, \quad (48.5)$$

Гук заңы — ол тәжірибелік заң.

Материалдағы механикалық кернеудің зат тегіне және сыртқы шарттарға тәуелділігін сипаттайтын k шамасы **серпімділік модулі** деп аталады. Серпімділік модулі материалдағы салыстырмалы серпімді деформация бірге тең кезде пайда болатын механикалық кернеумен өлшенеді.

Серпімділік модулінің ХБ жүйесіндегі өлшем бірлігі — 1 Па (Паскаль).

Мысал ретінде, Гук заңын созылу (сығылу) деформациясына қолданып көрейік. Осы кезде (48.5) формула мына түрде жазылады:

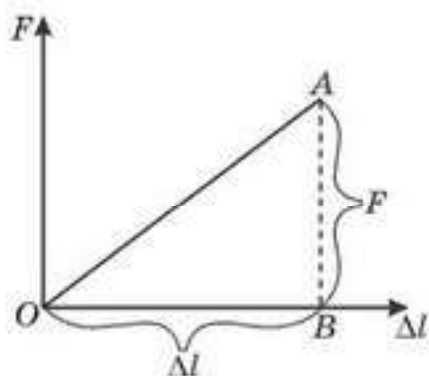
$$\sigma_k = E\varepsilon \text{ немесе } \sigma_k = E \frac{\Delta l}{l}, \quad (48.6)$$

мұндағы E — деформацияның осы түрі үшін серпімділік модулі, оны **Юнг модулі** деп атайды. Юнг модулі салыстырмалы деформация бірге тең болатын, яғни үлгінің ұзындығын екі есе арттырған кезде ($\Delta l = l$) пайда болатын материалдағы нормаль кернеумен өлшенеді. Юнг модулін тәжірибелік тәсілмен анықтап кестеге енгізеді.

(48.4) теңдеуден $\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$, осыдан $F = \frac{E \cdot S}{l} \Delta l$; $k = \frac{E \cdot S}{l}$ шамасын **қатаңдық** немесе дененің қатаңдық коэффициенті деп атайды. Ньютонның III заңы бойынша $F_{\text{серп}} = -F$, яғни

$$F_{\text{серп}} = -k\Delta l \text{ (Гук заңы)}. \quad (48.5)$$

Кернеу жоғалғаннан кейін дененің пішіні мен көлемі қалтына келетін материалдағы ең үлкен кернеу **серпімділік шегі** деп аталады. (48.5) және (48.6) формулалар тек кернеу серпімділік шегіне жетпегенде ғана орындалады. Кернеу серпімділік шегіне жеткен кезде денеде пілгіш деформация пайда болады. Бұл жағдайда, жүктеменің белгілі бір мәні кезінде деформация арта бастап, материалдың күйреуі мүмкін. Материалда ең үлкен мүмкін болатын механикалық кернеу тудыратын жүктемені **күйреткіш жүктеме** деп атайды.



48.6-сурет

Машиналарды құрастырғанда және құрылыстарды салған кезде *беріктік қорын* жасайды. **Беріктік қоры** деп конструкцияның ең күшті кернеуленген жеріндегі максимал жүктеменің күйреткіш жүктемеден қанша есе кем екенін көрсететін шаманы атайды.

Серпімді деформацияланған дененің энергиясы. Денені серпімді деформациялау үшін жұмыс атқару қажет. Осы жұмыстың есебінен деформацияланған дене W потенциалдық энергия алады да, A жұмыс атқару мүмкіншілігіне ие болады.

Серпімділік деформация шегінде $W_F = A$ деп ала аламыз.

(48.5) өрнектен шыбықты созатын немесе сығатын F күштің (48.6-сурет) Δl абсолют деформацияға пропорционал екені шығады:

$$F = k\Delta l. \quad (48.6)$$

Бұл тәуелділіктің графигі 48.6-суретте көрсетілген.

Шыбықты Δl шамасына созуға немесе сығуға кеткен A жұмысы сан жағынан 48.6-суреттегі AOB үшбұрышының ауданына тең:

$$A = \frac{F\Delta l}{2}, \quad W_F = \frac{F\Delta l}{2}, \quad (48.7)$$

себебі серпімді деформация кезінде $W_F = A$. (48.6) теңдеудегі F мәнін (48.7) теңдеуіне қояйық, сонда

$$W_F = \frac{k(\Delta l)^2}{2}. \quad (48.8)$$

Сонымен, *серпімді деформацияланған дененің потенциалдық энергиясы абсолют деформацияның квадратына тура пропорционал* болады екен.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Деформацияның қандай түрлерін білесіңдер? Мысал келтіріңдер.
2. Абсолют және салыстырмалы деформациялар деп қандай деформацияларды атайды?
3. Механикалық кернеу дегеніміз не?
4. Материалдардың қандай қасиеттерін білесіңдер?
5. Қандай шама серпімділік модулі деп аталады? Серпімділік модулі немен өлшенеді? Серпімділік модулінің өлшем бірлігі қандай?
6. Юнг модулі деп нені айтады? Юнг модулі немен өлшенеді?
7. Гук заңын тұжырымдаңдар.
8. Серпімділік шегі деген не?

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Бөлменің температурасы 20°C . Шық нүктесі 12°C . Ауаның абсолют және салыстырмалы ылғалдылығы қандай және көлемі 100 м^3 бөлмеде қанша су буы бар?

Берілгені:

$$t_1 = 20^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 12^{\circ}\text{C}$$

$$V = 100\text{ м}^3$$

$$\rho \text{ — ? } m \text{ — ?}$$

$$\phi \text{ — ?}$$

Шешуі. Қаныққан бу тығыздығының температураға тәуелділігі берілген кестеден абсолют ылғалдылықты ($t_2 = 12^{\circ}\text{C}$ үшін) табамыз, ол

$$\rho = 10,7 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3.$$

Ал 20°C температура кезінде ауадағы қаныққан су буы тығыздығы $\rho_x = 17,3 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$.

Осыдан салыстырмалы ылғалдылық

$$\phi = \frac{\rho}{\rho_x} = \frac{10,7 \cdot 10^{-3}}{17,3 \cdot 10^{-3}} = 0,62; \quad \phi = 62\%.$$

Ауадағы су буының массасы $m = \rho V$.

$$\text{Осыдан } m = 10,7 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3 \cdot 100\text{ м}^3 = 1,07\text{ кг}.$$

2-есеп. Шық нүктесі 5°C . Температурасы 23°C ауаның 1 м^3 көлемінде қанша су булануы мүмкін?

Берілгені:

$$t_1 = 5^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 23^{\circ}\text{C}$$

$$V = 1\text{ м}^3$$

$$\Delta m \text{ — ?}$$

Шешуі. 1 м^3 ауада қанша су буланатынын анықтау үшін ауадағы су буының m_1 массасын және осы ауаны t_2 температурада қанықтыра алатын су буының m_2 массасын білу керек:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = (\rho_2 - \rho_1)V = \Delta\rho V.$$

Қаныққан бу тығыздығының температураға тәуелділігін көрсететін кестеден $t_1 = 5^{\circ}\text{C}$ кезінде $\rho_1 = 6,8 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$; $t_2 = 23^{\circ}\text{C}$ кезінде $\rho_2 = 20,6 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$ шамаларын аламыз. Демек, $\Delta\rho = 13,8 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$, яғни 23°C температурада ауаның 1 м^3 көлемінде $\Delta m = 13,8\text{ г}$ су булана алады.

3-есеп. 10°C температурада салыстырмалы ылғалдылық 80% тең. Егер температураны 20°C дейін көтерсе, онда салыстырмалы ылғалдылық қалай өзгереді?

Берілгені:

$$t_1 = 10^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 20^{\circ}\text{C}$$

$$\phi_1 = 0,8$$

$$\phi_2 \text{ — ?}$$

Шешуі. $\phi_1 = \frac{\rho}{\rho_x}$ формуласынан $\rho = \phi_1 \cdot \rho_x$. Кестеден $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$ кезінде $\rho_x = 9,4 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$, олай болса, $\rho = 9,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 = 7,52 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$.

$t_2 = 20^{\circ}\text{C}$ кезінде $\rho_{x2} = 17,3 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$, сондықтан

$$\phi_2 = \frac{\rho}{\rho_{x2}} \Rightarrow \phi_2 = \frac{7,52 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{17,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 0,43. \quad \phi_2 = 43\%.$$

Салыстырмалы ылғалдылық $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = 37\%$ кемді.

4-есеп. Тұрақты температура кезінде радиусы 6 см болатын сабын көпіршігін түзу үшін канша энергия жұмсау қажет?

Берілгені:

$$r = 6 \text{ см} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\sigma = 0,04 \text{ Н/м}$$

W — ?

Шешуі. Көпіршікті түзуге жұмсала-тын энергия $W = \sigma S$, мұндағы σ — сабын қабыршағының (пленкасының) беттік керілу коэффициенті, S — қабыршақтың ішкі және сыртқы беттерінің қосындысы. Сабын көпіршігінің беті

$$S = 2 \cdot 4\pi r^2 = 8\pi r^2. \text{ Сонымен, } W = 8\pi\sigma r^2.$$

$$W = 8 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot 36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 3,6 \text{ мДж}.$$

5-есеп. Өлшемдері бірдей кішкентай су тамшыларын радиусы 4 мм болатын үлкен бір тамшыға айналдырғанда $1,4 \cdot 10^{-2}$ Дж энергия бөлінеді. Кішкене тамшының радиусын табындар.

Берілгені:

$$R = 4 \text{ мм} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta W = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$$

$$\sigma = 0,073 \text{ Н/м}$$

r — ?

Шешуі. Тамшылардың жиналу нәтижесінде беттің азаюы есебінен шығарылатын энергия мөлшері $\Delta W = \sigma(S_2 - S_1)$, мұндағы σ — судың беттік керілу коэффициенті; $S_2 = 4\pi r^2 n$ — барлық n кішкене тамшылардың жалпы беті; $S_1 = 4\pi R^2$ — үлкен тамшының беті.

$\frac{4}{3}\pi r^3 n = \frac{4}{3}\pi R^3$ қатынасынан (кішкене тамшылардың көлемдерінің қосындысы үлкен тамшының көлеміне тең) кішкене тамшылардың n санын табамыз: $n = \frac{R^3}{r^3}$. ΔW өрнегіне сәйкес мәндерді қойып,

$$\Delta W = 4\pi R^2 \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \cdot \sigma \text{ аламыз, осыдан}$$

$$r = \frac{4\pi R^3 \sigma}{\Delta W + 4\pi R^2 \sigma}; r = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 64 \cdot 10^{-9} \cdot 0,073}{1,4 \cdot 10^{-2} + 4 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-6} \cdot 0,073} \approx 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

6-есеп. 4 см^3 сұйық майды тамшуыр арқылы жібергенде 304 тамшы алынған. Тамшуыр ұшының диаметрі 1,2 мм, майдың тығыздығы $0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Майдың беттік керілу коэффициентін табындар.

Берілгені:

$$V = 4 \text{ см}^3 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$n = 304$$

$$d = 1,2 \text{ мм} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\rho = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

σ — ?

Шешуі. Тамшуырдан ағып шыққан сұйық тамшысы үзілер алдында “мойын” пайда болып, беттік қабықша жыртылады (48.7-сурет).



48.7-сурет

Тамшуыр ұшының диаметрі мойынның d диаметріне тең деп алып, $F_{\text{к}} = m_0 g$ жазамыз. $F = \sigma \cdot l = \sigma \cdot \pi d$ болғандықтан, $m_0 g = \sigma \pi d$.

Тамшы массасы $m_0 = \frac{m}{n} = \frac{\rho V}{n}$, мұндағы m — ағып шығатын сұйықтың массасы, ρ — оның тығыздығы, n — тамшы саны, V — ағып шығатын майдың көлемі. Сонымен,

$$\sigma = \frac{m_0 g}{\pi d} \text{ немесе } \sigma = \frac{\rho g V}{\pi d n}; \quad \sigma = \frac{0,9 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 304} = 0,03 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

7-есеп. Ішкі диаметрі 0,4 мм капилляр бензолға батырылған. Капиллярға енген бензолдың салмағын анықтау керек.

Берілгені:

$$r = 0,2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$\sigma = 0,03 \text{ Н/м}$$

P — ?

Шешуі. Капиллярға енген бензолдың салмағы $P = mg = g\rho V = \rho g \pi r^2 h$, мұндағы m — капиллярға енген бензолдың массасы, r — капиллярдың ішкі радиусы. Бензолдың капиллярдағы көтерілу биіктігі $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$.

Осы мәнді жоғарыдағы өрнекке қойып, мынаны аламыз: $P = 2\pi r \sigma$;

$$P = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,03 \approx 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Егер жүктемені өзгертпей, сымды дәл сондай материалдан жасалған, ұзындығы мен диаметрі одан екі есе ұзын басқа сыммен алмастырсақ, ұзаруы қалай өзгертетінін қарастырыңдар.

Тәжірибе жасаңдар

Екі тіреуге жалпағынан орналастырылған дәптерге және түтікше етіп оралған күйіндегі дәл сол дәптерге бірдей жүктеме қойған кезде байқалатын иілудегі айырмашылықты салыстырыңдар.

Түсіндіріңдер

1. Кристалл және аморфты денелердің ұқсастығы мен айырмашылығы неде?
2. Кристалдық құрылымдарды қандай типтерге бөледі? Олардың әрқайсысын сипаттаңдар.
3. Металдар неліктен электрді және жылуды жақсы өткізеді?

Зерттеңдер

Қолда бар материалдардың (болат, қорғасын, шыны, ағаш және т. с. с.) беріктігін тексеріңдер және оларды қаттылығының азаюына қарай орналастырыңдар.

Талдаңдар

Түтікше құрылымдардың техникада және табиғатта пайдаланылуына мысалдар келтіріңдер.

Ойлап табыңдар

Материалдың беріктік шегін анықтауға арналған практикалық мазмұнды есеп ойластырыңдар.

Шығарыңдар

1. Ұзындығы 4 м көлденең қимасы $0,5 \text{ мм}^2$ болат сымды 2 мм ұзарту үшін оның ұштарына қандай күш түсіру керек?

Жауабы: 52,5 Н

2. Егер жүктемені өзгертпей, сымды дәл сондай материалдан жасалған, бірақ екі есе ұзын және диаметрі екі есе үлкен басқа сыммен алмастырса, онда сымның абсолют ұзаруы қанша есеге өзгереді?

Жауабы: ұзару 2 есе азаяды

3. Ұзындығы 2 м және көлденең қимасының ауданы 4 мм^2 болатын алюминий сымға жүк ілінді, соның әсерінен ол 1 мм ұзарды. Сымда пайда болатын серпімділік күшін анықтаңдар. Алюминийдің серпімділік модулі $7,1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

Жауабы: 142 Н

4. Кірпіштен салынған ғимараттың максимал биіктігін табыңдар. Кірпіштің сығылу беріктігінің шегі $1,5 \cdot 10^7 \text{ Па}$, тығыздығы $1,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, ал қажетті беріктік қоры 6 тең.

Жауабы: 250 м

5. Диаметрі 0,8 мм жез сымның ұзындығы 3,6 м. 25 Н күштің әсерінен сым 2 мм ұзарады. Жез үшін Юнг модулін анықтаңдар.

Жауабы: $9 \cdot 10^{10} \text{ Па}$



Рефлексия

1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?



Табиғаттағы зат бес агрегаттық күйде бола алады: қатты, сұйық, газ тәрізді, плазмалық және нейтрондық.

Атмосфералық ауа әртүрлі газдар мен су буының қоспасы болып табылады. Ауаның ылғалдылығына сандық баға беру үшін абсолют және салыстырмалы ылғалдылық ұғымдары енгізілген.

Салыстырмалы ылғалдылық деп ρ_0 абсолют ылғалдылықтың берілген температура кезінде ауаны қанықтыру үшін қажетті ρ_k су буы тығыздығының қанша пайызын құрайтынын көрсететін физикалық шаманы айтады:

$$\phi = \frac{\rho}{\rho_k} \cdot 100\%$$

немесе

$$\phi = \frac{p}{p_k} \cdot 100\%,$$

мұндағы p — су буының парциал қысымы; p_k — берілген температурадағы қаныққан бу қысымы. Ылғалдылық деңгейін бақылап отыру кітапхана, кітап сақтау орындары, мұражайларда, жеміс-жидек пен астық сақтайтын қоймаларда және метеорологияда ауа райын болжау үшін өте маңызды.

Ауаның ылғалдылығын *гигрометр* және *психрометрдің* көмегімен анықтайды.

Кристалдық тордың болмауы, ішкі қабаттармен салыстырғанда

$$\Delta W = \sigma S$$

тен (σ — беттік керілу коэффициенті; S — беттік қабаттың ауданы), артық энергиясы бар беткі қабаттардың бар болуы сұйық фазада тұрған затқа тән қасиеттер.

Сұйық бетінің бойымен беттің ауданын кішірейтуге тырысатын

$$F = \sigma l$$

(мұндағы l — сұйықтың еркін бетінің ұзындығы) беттік керілу күші әсер етеді.

Беттік керілу күшінің әсерінен сұйық пен қатты дене арасында шекаралық қабатта *жұзу* немесе *жұқпау* құбылысы туындайды. Бұл құбылыстар қатты дене бетімен шектескен қабатта сұйық бетінің қисаюына әкеледі (мениск пайда болады). Қисайған сұйық бетінде *Лаплас қысымы*

($P_p = \frac{2\sigma}{R}$) деп аталатын қосымша қысым пайда болады.



Жұғу немесе жұкпау құбылысының негізінде жіңішке түтікшелердің (капиллярлардың) бойымен сұйық

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g R}$$

биіктікке көтеріле алады, мұндағы θ — шекті бұрыш.

Сыртқы күштердің әсерінен қатты денелер деформацияланады. Деформация *серпімді* және *пластикалық* болып бөлінеді.

Серпімді деформация Гук заңына бағынады: серпімді деформацияланатын дененің механикалық кернеуі осы дененің салыстырмалы кернеуіне тура пропорционал:

$$\sigma = E\varepsilon$$

немесе денеде туындайтын серпімділік күші дененің абсолют деформациясына тура пропорционал:

$$F_{\text{серп}} = -k\Delta l.$$

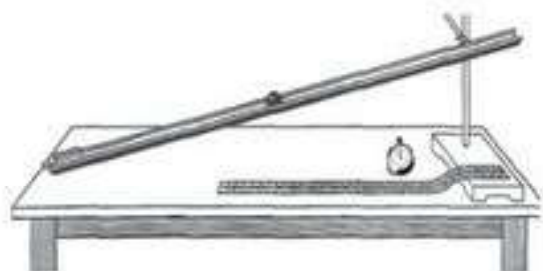


Зертханалық жұмыстар

1-зертханалық жұмыс. Көлбеу науа бойымен қозғалатын дененің үдеуін анықтау

Керекті құралдар : кішкене шар, зертханалық науа, секундомер, сызғыш, металл цилиндр.

Жұмыстың орындалу тәртібі



1-сурет

1. Құрал-жабдықтарды дайындаңдар.

- 1.1 Сызғыш бөліктерінің шамасын анықтаңдар.
- 1.2 Сызғыштың көмегімен ұзындықты өлшеудің абсолют қателігін табыңдар.
- 1.3 Секундомердің көмегімен өлшеудің абсолют қателігін табыңдар.
- 1.4 1-суреттегі құралды құрастырыңдар.

1.5 Науаның бойымен кішкене шар дөнгелегенде оны 31 с кем емес уақыт кететіндей етіп орналастырыңдар.

2. Дене қозғалысының түрін анықтау. Дененің түзусызықты үдемелі қозғалысын бақылаңдар.

- 2.1 Шардың науада 1 с, 2 с және 3 с орын ауыстыруларын белгілеңдер.
- 2.2 Шардың бірінші, екінші және үшінші секундағы орын ауыстыру модулін табыңдар.
- 2.3 Шардың бірдей уақыт аралығындағы орын ауыстыру модульдерін салыстырыңдар.
- 2.4 Сұраққа жауап беріңдер:
 - а) Шардың көлбеу науамен қозғалысы бірқалыпты ма, әлде бірқалыпсыз ба?
 - ә) Неліктен мұндай қорытындыға келдіңдер?

3. Дененің түзусызықты бірқалыпсыз қозғалысы кезіндегі орташа жылдамдығының модулін анықтаңдар.

- 3.1 Шардың науамен қозғалу уақытын өлшендер.
- 3.2 Шардың науамен салыстырғандағы орын ауыстыру модулін өлшендер.
- 3.3 Шардың орташа жылдамдығының модулін табыңдар.
- 3.4 Орташа жылдамдық модулінің абсолют және салыстырмалы қателіктерін табыңдар.
- 3.5 Алынған нәтижелерді кестеге енгізіңдер.

4. Көлбеу жазықтықпен қозғалатын дененің үдеуін анықтаңдар.

- 4.1 Шардың науамен қозғалу уақытын өлшендер.

- 4.2 Шардың науамен салыстырғандағы орын ауыстыру модулін өлшендер.
- 4.3 Шардың орташа үдеуінің модулін табындар.
- 4.4 Орташа үдеу модулінің абсолют және салыстырмалы кателіктерін табындар.
- 4.5 Алынған нәтижелерді кестеге енгізіндер.
5. Зертханалық жұмыстың нәтижесін қорытындыландар.

2-зертханалық жұмыс. Ұшу қашықтығының лақтыру бұрышына тәуелділігін зерттеу

Керекті құралдар : баллистикалық зертханалық пистолет, сантиметрлік бөлігі бар өлшеуіш лента, 2-3 таза және көшірме қағаз (копирка), жапсырма лента.

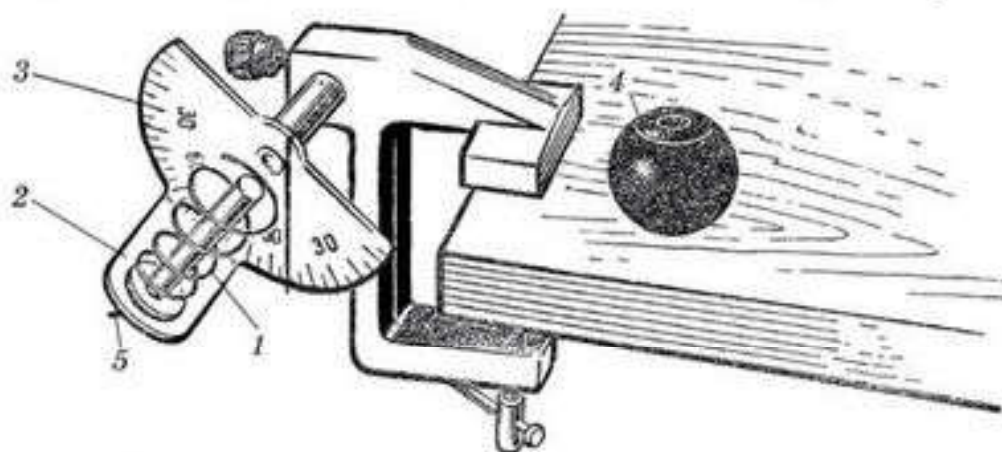
Теориялық материал

Горизонталь бетте көкжиекке әртүрлі бұрыш жасай оқ атқанда оның ұшу қашықтығы мына формуламен өрнектеледі:

$$l = \frac{2v_0^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

Бұл формуладан оқтың 0 градустан 90 градусқа дейін ұшу бұрышын өзгерткенде оның ұшу қашықтығы әуелі кейбір мәнге дейін артады да, одан кейін нөлге дейін кемітіні көрінеді. Түсу қашықтығы $\cos \alpha$ мен $\sin \alpha$ көбейтіндісінің үлкен мәнінде максимал болады. Міне, осы тәуелділікті тәжірибеде 2-суретте көрсетілген баллистикалық пистолетпен тексеру керек.

Пистолет 3 бұрыш өлшеуіші бар 2 жапсырма шегеге бекітілген осьтің бойында шыбығы (стержень) бар ширатылған (спираль) 1 серіппеден тұрады. Ұзына бойында тесік каналы бар шыбыққа арнайы 4 шарик орнатылған. Шарикті қондырған кезде серіппені сығады да, шыбықтың табанындағы 5 босатқыш ілмекке ілінеді. Егер босатқыш



2-сурет

ілмектің шығып тұрған бөлігін басып қалса, шар босайды да, серіппенің әсерінен ол шыбық бойымен белгілі бір бағытта қозғалады.

Шариктің ұшу жылдамдығының v_0 модулін барлық тәжірибе үшін бірдей етіп алу керек.

Үстелде шариктің түсер жеріне ақ, таза қағаздың бетін екі бөлек жапсырма лентамен бекіту керек, ал үстіңгі жағына көшірме қағаз қойылады. Шарик құлағанда қағазда айқын із қалады.

Жұмыстың орындалу тәртібі

1. Дәптерге өлшеулер мен есептеулер нәтижесі жазылатын кесте дайындандар.

1-кесте

Шариктің ұшу бұрышы $\alpha, ^\circ$	20	30	40	45	50	60	70
Шариктің орташа ұшу қашықтығы $l, \text{см}$							

2. Баллистикалық пистолеттің құрылысымен, жұмыс істеу принципімен танысындар.

3. Үстелдің шетіне баллистикалық пистолетті қысып қоятын бұрананы (винтті) орнатып, бұрыш өлшегішпен пистолетті 45° бұрышпен бекітіңдер. Қағазды жапсырмай, байқау үшін атып көріңдер де, шамамен шариктің түскен орнын белгілеңдер. 45° бұрышпен атқанда шарик қағаздың шетіне түсетіндей етіп таза қағазды үстелге бекітіңдер, сосын үстіне көшірме қағазды салыңдар.

4. Пистолетті $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ бұрыштармен орнатып, әрбір бұрышқа 3-4 рет атыңдар. Шариктің ізін қарындашпен қоршандар да, қасына бұрышын белгілеңдер.

5. Пистолетті бұрып, оның $50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ бұрыштарының әрқайсысында 3-4 рет атып, тағы да әрбір бұрыштағы шариктің түскен ізіне ату бұрышының мәнін жазыңдар.

6. Әрбір бұрыш үшін шариктің түскен қашықтығының орташа мәнін өлшендер. Өлшеу нәтижелерін кестеге түсіріңдер.

3-зертханалық жұмыс. Көлбеу науамен домалайтын дененің қозғалысын оқып-үйрену

Керекті құралдар : зертханалық жұмысқа арналған штатив, доға тәріздес науа, диаметрі және массалары әртүрлі шарлар, өлшеуіш сызғыш, тіктеуіш, көшірме қағаз.

Теориялық материал

Шардың инерция моментін анықтау үшін оның айналмалы қозғалысының кинетикалық энергиясы мен бұрыштық жылдамдығын білу керек, ол

$$W_{\text{аітп}} = \frac{J\omega^2}{2}, \quad J = \frac{2W_{\text{аітп}}}{\omega^2}. \quad (1)$$

Горизонталь B деңгейге қатысты A нүктесінде (3-сурет) шар mgh потенциалдық энергияға ие болады. Шар науаның бойымен домалаған кездегі оның потенциалдық энергиясы дененің ілгерілемелі қозғалысының кинетикалық $W_{\text{із}}$ және айналмалы қозғалысының $W_{\text{аітп}}$ кинетикалық энергиясына айналады. Шар үшін B нүктесінде

$$mgh = W_{\text{із}} + W_{\text{аітп}}$$

теңдігі орындалады. Осыдан

$$W_{\text{аітп}} = mgh - \frac{mv^2}{2}, \quad J = \frac{2W_{\text{аітп}}}{\omega^2} = \frac{m(2gh - v^2)}{\omega^2},$$

мұндағы v мен ω — шар центрі массасының сызықтық жылдамдығы мен оның B нүктесіндегі айналмалы қозғалысының бұрыштық жылдамдығы. Науаға қатысты массалар центрінің сызықтық жылдамдығы және шар бетінің айналу осінен барынша қашық нүктесінің сызықтық жылдамдығы массалар центріне қатысты өзара тең, сондықтан былай жазуға болады: $\omega = \frac{v}{R}$, мұндағы R — шардың радиусы.

Сонда шардың инерция моменті үшін мынадай формула алынады:

$$J = mR^2 \left(\frac{2ghv}{v^2} - 1 \right). \quad (2)$$

B нүктесіндегі шардың массалар центрінің сызықтық жылдамдығын табу үшін шардың ұшу қашықтығы l мен оның үстел бетіне дейінгі t қозғалыс уақытын білу керек:

$$v = \frac{l}{t}.$$

Ұшу уақыты мына қатынастан табылады:

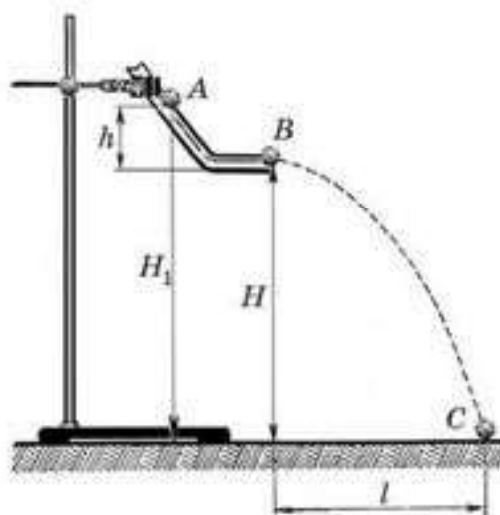
$$H = \frac{gt^2}{2},$$

осыдан

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

Демек,

$$v = \frac{l}{\sqrt{\frac{2H}{g}}}. \quad (3)$$



3-сурет

(2) теңдеуді (1) теңдеуге қойсақ:

$$J = \frac{mR^2(4hH - l^2)}{l^2}. \quad (4)$$

Сонымен, шардың инерция моментін табу үшін науаның горизонталь бөлігінің үстел бетінен H биіктігін, шардың сырғанап бастағаннан науаның горизонталь бөлігіне дейінгі биіктігін h және шардың H биіктіктен құлағандағы горизонталь бойымен қозғалатын қашықтығын l өлшеу қажет. Шардың үстелге құлаған ізі қағазға төселген көшірме қағаздың көмегімен белгіленеді.

Жұмыстың орындалу тәртібін өздерің ойластырып жүргізіңдер. Жұмыстың орындалу тәртібін ретпен дәптерге жазыңдар және қорытынды жасаңдар.

4-зертханалық жұмыс. Бір-біріне бұрыш жасай бағытталған күштерді қосу

Керекті құралдар : штатив — 2 дана, динамометр — 3 дана, муфта-сы және қысқышы бар екі штатив, екі қозғалмалы блок, жіп, жүктер жиынтығы.

Теориялық материал

Егер денеге бірнеше күш әсер ететін болса, оларды векторлы қосу арқылы қосындысын табуға болады: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Егер олар бір-бір түзудің бойымен әсер ететін болса, күштердің қосындысын табу жеңіл болады. Бұл жағдайда күштердің қосындысы не күштердің қосындысына (күштер бір бағытта бағытталған) не олардың айырмашылығына (күштер қарама-қарсы бағытқа бағытталған) тең болады:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \text{ немесе } F = F_1 + F_2.$$

Егер күштер бұрыш жасай бағытталса, олардың қосындысын векторларды қосу ережесін не үшбұрыш ережесін немесе параллелограмм ережесін пайдалана отырып табыңдар.

Жұмыстың орындалу тәртібі

1. Жүктер жиынтығынан кез келген екі жүкті алып, динамометрдің көмегімен олардың әрқайсысының салмағын өлшендер.

2. Жүктің екеуін де динамометрге іліп, олардың жалпы салмағын анықтаңдар.

3. Қорытқы күштің және әрбір жүктің салмағының арақатынасы туралы қорытынды шығарыңдар.

4. Құралды жинаңдар. Бұл үшін штативтерге жылжымалы блоктарды бекітіңдер, солар арқылы соңында әрқайсысы 100 г болатын

бірдей жүк бекітілген жіпті іліндер, ал жіптің ортасына динамометрді бекітіндер. Құралдың артына картон бекітіндер.

5. Тепе-теңдіктің болуына қол жеткізіндер.

6. Жіптің орналасуын қарындаш арқылы картонға белгілендер.

7. Масштаб таңдап, динамометрге бекіту нүктесінде жіпке әсер ететін күштердің орналасуын сызындар.

8. F_1 және F_2 күштерінің векторлық қосындысын табындар және оның F векторына карама-қарсы вектор екеніне сенімді болындар. Бұл үшін F_1 және F_2 векторларының күштерін вертикаль оське жобаландар және осы күштердің проекция қосындысын табындар: $F_1 \cos \alpha + F_2 \cos \alpha$. Оны F қорытқы күшінің векторымен салыстырындар.

9. $\cos \alpha = \frac{a}{\ell_1}$, ал $\cos \beta = \frac{a}{\ell_2}$ мәндері (4-сурет).

10. Қорытынды жасандар.

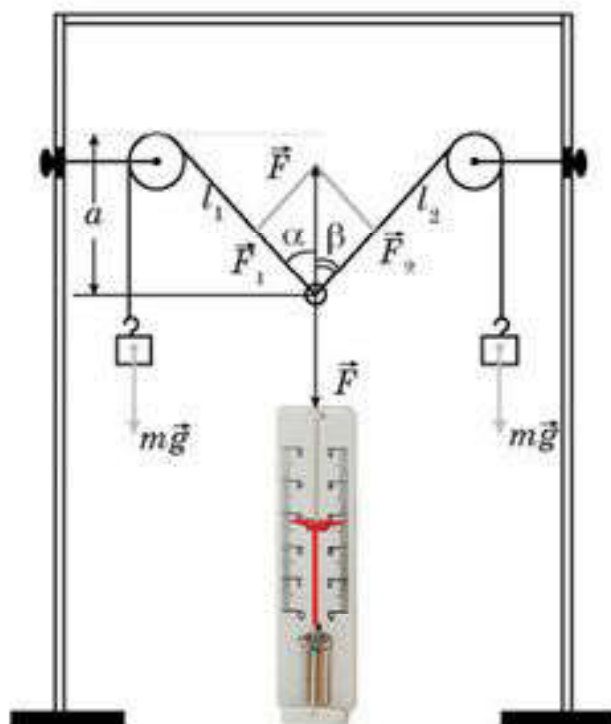
11. Динамометрді оңға қарай ығыстырып, оны ілу нүктесін өзгертіңдер. Динамометрдің жылжып кетуіне жол бермеуге тырысып, қайтадан тепе-теңдіктің болуына қол жеткізіндер.

12. 7—9-тармақтарда көрсетілген есептеулерді қайталаңдар.

13. Динамометрді ілу нүктесін тағы да ауыстырып, жаңа есептеулер жүргізіндер.

14. Массасы оң жақтағы жіптің массасынан екі еседей көп болатын жүкті сол жақтағы жіпке іле отырып, тәжірибелер мен есептеулерді қайталаңдар.

15. Қорытынды жасандар.



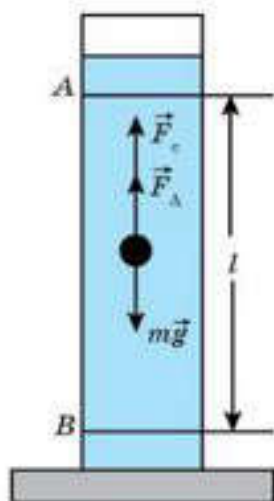
4-сурет

5-зертханалық жұмыс. Тұтқыр сұйықта қозғалатын кішкентай шардың жылдамдығының оның радиусынан тәуелділігін зерттеу

Жұмыстың мақсаты : тұтқыр сұйықтағы шариктің бірқалыпты түсу жылдамдығының шариктің радиусына тәуелділігін зерттеу.

Керекті құралдар : ішінде суы бар, биіктігі 50—70 см ыдыс, өлшеу лентасы, секунд өлшеуіш, пластилин.

Теориялық материал



5-сурет

Пластилин шарик алып, оны суға саламыз. Бастапқыда ол тез түсе бастайды, кейіннен сұйықтың ішкі үйкеліс күші тез көтеріліп, сұйықтағы шариктің салмағын теңестіреді, сөйтіп шарик бірқалыпты түсе бастайды. Шариктің қозғалысы үш түрлі күштің: ауырлық күшінің, Архимед күшінің және ішкі үйкеліс күшінің (5-сурет) әсерімен жүре бастайды. Шариктің бірқалыпты қозғалыс жағдайы үшін Ньютонның екінші заңын жазамыз: $mg - F_A - F_c = 0$. Мұндағы $m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi R^3$, ал $F_A = \rho_0 g \frac{4}{3} \pi R^3$ және $F_c = 6 \pi R \eta v$ болғандықтан, шариктің бірқалыпты қозғалысының жылдамдығы оның радиусымен мына түрде байланысты екенін көреміз:

$$v = \frac{2(\rho - \rho_0)g}{9\eta} R^2. \tag{1}$$

Бұл формулаларда ρ және ρ_0 — шарик пен сұйықтың тығыздығы, η — тұтқырлық коэффициенті, R — шариктің радиусы, v — шариктің бірқалыпты қозғалысының жылдамдығы.

Жұмыстың орындалу тәртібі

1. Пластилиннің тығыздығын гидростатикалық өлшеу әдісімен анықтандар:

$$\rho = \rho_0 \frac{p_1 - p_2}{p_1}. \tag{5}$$

2. (5) формуланы анықтамалық деректерді (судың тығыздығы $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$ және оның динамикалық тұтқырлығы $\eta = 1,002 \text{ мПа} \cdot \text{с}$) және пластилиннің тәжірибе арқылы анықтаған тығыздығын (сызықтық тәуелділік болуға тиіс) пайдалана отырып, пластилин шариктің судағы қозғалыс жылдамдығының радиустың квадратына тәуелділігі графигін құрындар.

3. Пластилин шарикті суға салындар және ол 10 см түскенде түбіне дейінгі қалған арақашықтықты анықтау үшін уақытты белгілендер (5-сурет).

4. Судағы шариктің бірқалыпты қозғалысының жылдамдығын $v = \frac{l}{t_{\text{орт}}}$ формуласы бойынша анықтаңдар. Тәжірибені 5—7 рет қайталап, түсудің орташа уақытын алыңдар: $t_{\text{орт}} = \frac{t_{\text{max}} + t_{\text{min}}}{2}$.

5. Шариктің радиусын бірнеше рет ауыстыра отырып, әрбір жолы судағы шариктің жылдамдығын анықтап отырыңдар (3- және 4-тармақтарда сипатталғандай).

6. Пластин шариктің судағы қозғалыс жылдамдығының радиустың квадратына тәуелділігінің тәжірибелік графигін құрыңдар және оны теориялық графикпен салыстырыңдар.

7. Графиктерді пайдалана отырып, тәжірибенің кателігін анықтаңдар.

8. Теориялық есептеулердің деректерін тәжірибелік деректермен салыстырыңдар және олардың айырмашылықтарын анықтаңдар:

$$\varepsilon = \left(\frac{u_{\text{т}}}{u_{\text{э}}} - 1 \right) 100\%.$$

9. Тәжірибенің нәтижесін қорытындылаңдар.

МАЗМҰНЫ

Қазіргі заманғы физиканың рөлі	5
Физикалық шамалардың қателіктері. Өлшеу нәтижелерін өңдеу	7

I бөлім. МЕХАНИКА

1-тарау. КИНЕМАТИКА

§ 1. Кинематиканың негізгі ұғымдары	10
§ 2. Түзусызықты қозғалыс	18
§ 3. Денелердің еркін түсуі. Еркін түсу үдеуі	27
§ 4. Қисықсызықты қозғалыс. Шеңбер бойымен қозғалыс	36
§ 5. Айналымды қозғалыс	38

2-тарау. ДИНАМИКА

§ 6. Ньютонның бірінші заңы. Инерциялық санақ жүйелері	46
§ 7. Дененің массасы. Күш. Ньютонның екінші заңы	50
§ 8. Ньютонның үшінші заңы	55
§ 9. Серпімділік күші. Гук заңы. Тіректің реакция күші	58
§ 10. Үйкеліс күші. Кулон—Амонтон заңы	63
§ 11. Архимед күші	68
§ 12. Бүкіләлемдік тартылыс күші. Ауырлық күші	71
§ 13. Дененің салмағы. Салмақсыздық және асқын салмақ	77
§ 14. Абсолют қатты дененің инерция моменті	84
§ 15. Күш импульсі. Импульс моментінің сақталу заңы. Айналымды қозғалыс динамикасының негізгі теңдеуі	92

3-тарау. СТАТИКА

§ 16. Денелердің тепе-теңдігі. Күш моменті. Тепе-теңдік шарттары	98
--	----

4-тарау. САҚТАЛУ ЗАҢДАРЫ

§ 17. Дене импульсі және күш импульсі. Импульстің сақталу заңы	108
§ 18. Реактивті қозғалыс	113
§ 19. Жұмыс. Энергия. Кинетикалық энергия туралы теорема. Қуат	117
§ 20. Потенциалдық энергия. Энергияның сақталу және айналу заңы	123

5-тарау. СҰЙЫҚТАР МЕН ГАЗДАР МЕХАНИКАСЫ

§ 21. Сұйықтағы қысым. Гидростатиканың элементтері	133
§ 22. Үзілссіздік теңдеуі	137
§ 23. Бернуллі теңдеуі	140
§ 24. Тұтқырлық. Сұйықтардың ламинар және турбулентті ағыны	145
§ 25. Денелердің сұйықтар мен газдардағы қозғалысы. Маңдай кедергі және көтергіш күш. Стокс формуласы	147

II бөлім . ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ

6-тарау . ГАЗДАРДЫҢ МОЛЕКУЛАЛЫҚ-КИНЕТИКАЛЫҚ ТЕОРИЯСЫНЫҢ НЕГІЗДЕРІ

§ 26. Газдардың молекулалық-кинетикалық теориясының негізгі қағидалары және оның тәжірибелік дәлелдемелері	152
§ 27. Молекулалардың өзара әсерлесу күштері	160
§ 28. Термодинамикалық жүйелер және термодинамикалық параметрлер. Термодинамикалық жүйелердің тепе-теңдік және тепе-теңдік емес күйлері	164
§ 29. Температура — зат бөлшектерінің жылулық қозғалыстарының орташа кинетикалық энергиясының өлшемі	166
§ 30. Идеал газ. Газдардың молекулалық-кинетикалық теориясының негізгі теңдеуі	171

7-тарау . ГАЗ ЗАҢДАРЫ

§ 31. Идеал газ күйінің теңдеуі	178
§ 32. Изопроцестер. Изопроцестердің графиктері. Дальтон заңы	181

8-тарау . ТЕРМОДИНАМИКА НЕГІЗДЕРІ

§ 33. Ішкі энергия	190
§ 34. Термодинамикалық процестер кезіндегі атқарылатын жұмыс	196
§ 35. Жылу мөлшері. Ішкі энергияны өзгерту әдістері. Жылусыйымдылығы	201
§ 36. Термодинамиканың бірінші заңы	205
§ 37. Термодинамиканың бірінші заңын изопроцестерге қолдану	208
§ 38. Адиабаталық процесс	212
§ 39. Жылу қозғалтқыш. Жылу қозғалтқышының пайдалы әсер коэффициенті	215
§ 40. Карно циклі. Карно циклінің ПӘК-і	218
§ 41. Қайтымды және қайтымсыз процестер. Энтропия. Термодинамиканың екінші заңы	221
§ 42. Жылу қозғалтқыштарының қолданылуы	225

9-тарау . СҰЙЫҚ ЖӘНЕ ҚАТТЫ ДЕНЕЛЕР

§ 43. Қаныққан және қанықпаған бу. Ауаның ылғалдылығы	233
§ 44. Фазалық диаграммалар. Үштік нүкте. Заттың кризистік күйі	240
§ 45. Сұйықтың беттік қабатының қасиеттері	244
§ 46. Жұғу және капиллярлық құбылыстар	249
§ 47. Кристалл және аморфты денелер	253
§ 48. Қатты денелердің механикалық қасиеттері	258
Зертханалық жұмыстар	270



Учебное издание

**Кронгарт Борис Аркадьевич
Казахбаева Данагуль Мукажановна
Имамбеков Онласын
Кыстаубаев Талгат Зайнуллаевич**

ФИЗИКА

Часть 1

Учебник для 10 классов естественно-математического направления
общеобразовательных школ
(на казахском языке)

Редакторы *А. Сабадалиева*
Көркемдеуші редакторы *А. Сланова*
Техникалық редакторы *Л. Садықова*
Корректоры *Г. Тұрмағанбетова*
Компьютерде беттеген *Д. Шарипова*

Баспаға Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің
№ 0000001 мемлекеттік лицензиясы 2003 жылы 7 шілдеде берілген

ИБ № 5872

Басуға 05.06.19 қол қойылды. Пішімі $70 \times 100^{1/16}$. Офсеттік қағаз.
Қаріп түрі "SchoolBook Kza". Офсеттік басылыс. Шартты баспа
табағы 22,58+0,32 қосарбет. Шартты бояулы беттаңбасы 92,26.
Есептік баспа табағы 13,23+0,54 қосарбет.
Таралымы 65000 дана. Тапсырыс №

“Мектеп” баспасы, 050009, Алматы қаласы, Абай даңғылы, 143-үй

Факс: 8(727) 394-37-58, 394-42-30

Тел.: 8(727) 394-41-76, 394-42-34

E-mail: mektep@mail.ru

Web-site: www.mektep.kz

