

М.Ганбат, Ш.Чадраабал, О.Алтангоо, Х.Балт-Эрдэнэ, Р.Бавуудорж,
Х.Батболд, Д.Үүрийнтуяа, Ч.Гончигдорж

ФИЗИК

XI

Ерөнхий боловсролын 12 жилийн сургуулийн
11 дүгээр ангийн сурах бичиг

Боловсрол, Соёл, Шинжлэх Ухаан, Спортын Яамны
зөвшөөрлөөр хэвлэв.

Гурав дахь хэвлэл

СУРГУУЛИЙН НОМЫН САНД ОЛГОВ.
БОРЛУУЛАХЫГ ХОРИГЛОНО.

Улаанбаатар хот
2019 он

ННА 74.2
ДАА 373
Ф-503

Физик XI: Ерөнхий боловсролын 12 жилийн сургуулийн 11 дүгээр ангийн сурах бичиг.
/Ганбат М., ба бус; Ред. Ш.Жаргалсүрэн - УБ.2017.- 148х.

Азийн Хөгжлийн Банкны “Эдийн засгийн хүндрэлийн үед боловсролын чанар, хүртээмжийг сайжруулах төсөл”-ийн хүрээнд хэвлүүлэв.

Энэхүү сурах бичиг нь “Монгол Улсын Зохиогчийн эрх болон түүнд хамаарах эрхийн тухай” хуулиар хамгаалагдсан бөгөөд Боловсрол, Соёл, Шинжлэх ухаан, Спортын Яамнаас бичгээр авсан зөвшөөрлөөс бусад тохиолдолд цахим болон хэвлэмэл хэлбэрээр, бүтнээр эсхүл хэсэгчлэн хувилах, хэвлэх, аливаа хэлбэрээр мэдээллийн санд оруулахыг хориглоно.

Сурах бичгийн талаарх аливаа санал, хүсэлтээ textbook@mecs.gov.mn хаягаар ирүүлнэ үү.

© Боловсрол, Соёл, Шинжлэх Ухаан, Спортын Яам

ISBN 978-99978-61-34-4

ӨМНӨХ ҮГ

Шинэ зууны Дэлхийн Монгол Иргэний бүрэн дунд боловсролын нэгээхэн хэсэг нь байгалийн ухаан буюу шинжлэх ухааны боловсрол юм. Шинжлэх ухааны боловсролоор хүн төрөлхтөний олон зууны туршид хуримтлуулсан оюуны өв соёл болох шинжлэх ухааны мэдлэгээс гадна шинжлэх ухаанч хандлага, чадамжид суралцах нь чухал юм. Энд физик нь байгалийн ухааны суурь болохын хувьд чухал байр суурь эзэлдэг. Орчин үед физикийн онол, арга хэрэглээгүй ганц ч багаж техник, тоног төхөөрөмж, барилга байгууламж байхгүй. Энэ үүднээс физик нь бүх шинжлэх ухаан, зохион бүтээх, инженер техник, хөдөө аж ахуй, анагаах ухааны мэргэжлийн суурь болдог.

11-р ангид бүрэн дунд боловсролын хүрээнд физикийн 2-р шатыг судлах болно. 11-р ангид бид Механик, Молекул физик, Цахилгаан орон ба соронзон орон, Хэлбэлзэл ба долгион гэсэн бүлгүүдийг гүнзгийрүүлэн судална.

Механик бүлгээр механик хөдөлгөөнийг илэрхийлэх аргыг гүнзгийрүүлэн, вектор дүрслэлийн аргыг хүч ба хөдөлгөөний тоо хэмжээний хувьд хэрэглэх, хөдөлгөөний энергийг тооцоолох аргад суралцана. Шингэний механикийн талаар судална.

Молекул физик бүлгээр хийн төлөвийн тэгшитгэл, түүний техник дэх хэрэглээ, термодинамикийн хууль, дулааны машины ажиллах зарчимтай танилцаж, дулааны янз бүрийн процессыг микро, макро түвшинд загварчлах, тооцоолох аргад суралцана.

Цахилгаан орон ба соронзон орон бүлгээр цахилгаан орныг потенциал ба хүчлэгээр илэрхийлэх, бодисын соронзон шинж чанарын талаар судалж, бүрэн цахилгаан хэлхээний тооцоо хийх олон аргыг эзэмшиж хэрэглэж сурна.

Механик хэлбэлзэл ба долгион бүлгээр хэлбэлзлийг онолын хувьд гүнзгийрүүлэн судалж, чөлөөт, унтрах, албадмал хэлбэлзэл, механик долгионыг илэрхийлэх аргатай танилцах болно.

Бүлэг бүрийн эцэст бүлгээр судалсан агуулгын гол санааг нэгтгэж дүгнэлт хэсэгт бичсэн ба бие дааж бодох бодлого дасгал оруулсан болно. Дашрамд хэлэхэд сургууль төгсөх ба их дээд сургуулийн элсэлтийн шалгалтын агуулгатай сурах бичиг үндсэндээ тохирно гэдгийг сануулах юун.

Физик бол эзэмшвэл зохих боловсролын нэг хэсэг, ирээдүйн мэргэжлийн суурь үндэс гэсэн утгаар хичээнгүйлэн хандаж, суралцахыг хүсэж байна.

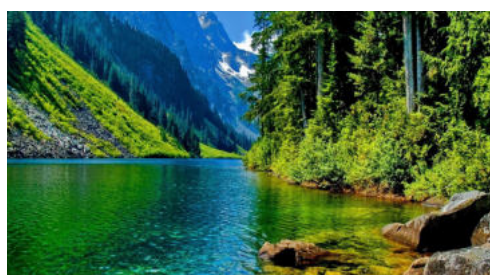
Сурах бичиг зохиогчид

ГАРЧИГ



Бүлэг 1. МЕХАНИК

1.1 Хүч ба хөдөлгөөн	6
1.2 Хөдөлгөөний тоо хэмжээ ба импульс ..	22
1.3 Энерги ба ажил, чадал	29
1.4 Шингэний механик	35



Бүлэг 2. МОЛЕКУЛ ФИЗИК

2.1 Идеал хий.....	38
2.2 Термодинамик	52



Бүлэг 3. ЦАХИЛГААН ОРОН БА СОРОНЗОН ОРОН

3.1 Цахилгаан орон	70
3.2 Соронзон орон	82
3.3 Орчин дахь цахилгаан гүйдэл	89
3.4 Цахилгаан хэлхээ	97



Бүлэг 4. МЕХАНИК ХЭЛБЭЛЗЭЛ, ДОЛГИОН

4.1 Гармоник хэлбэлзэл	110
4.2 Унтрах ба албадмал хэлбэлзэл, резонанс.....	120
4.3 Механик долгион	127
4.4 Дууны долгион	142

Бүлэг 1

Механик

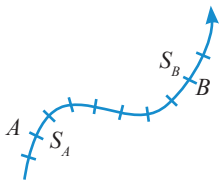
- ▶ Энэ бүлэгт хөдөлгөөний шилжилт, хурд, хурдатгалын дундаж ба хоромхон утгыг илэрхийлэх хэд хэдэн аргатай танилцана. Хөдөлгөөнийг перпендикуляр чиглэлд задлах, хоёр хэмжээст хөдөлгөөнийг тооцоолох жишээгээр өмнөх мэдлэгээ өргөтгөнө. Хөдөлгөөнийг хөдөлгөөний тоо хэмжээ, механик энерги, ажил чадлын тусламжтай илэрхийлэх аргад сурна. Мөн шингэний урсгалыг илэрхийлэх аргатай танилцана.

БҮЛГИЙН АГУУЛГА

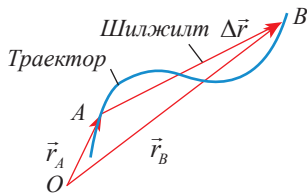
- ▶
 1. ХҮЧ БА ХӨДӨЛГӨӨН
 2. ХӨДӨЛГӨӨНИЙ ТОО ХЭМЖЭЭ БА ИМПУЛЬС
 3. ЭНЕРГИ БА АЖИЛ, ЧАДАЛ
 4. ШИНГЭНИЙ МЕХАНИК



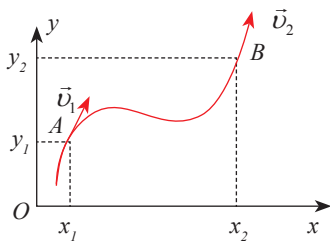
1. ХҮЧ БА ХӨДӨЛГӨӨН



Зураг 1. Биеийн байрлалыг муруй шугаман координатын системийн тусламжтайгаар илэрхийлэх



Зураг 2. Биеийн байрлалыг векторын аргаар илэрхийлэх



Зураг 3. Биеийн байрлалыг тэгш өнцөгт координатын системийн тусламжтай илэрхийлэх

Тооллын систем

Бие байрлалаа өөр биетэй харьцангуй өөрчлөхийг механик хөдөлгөөн гэдгийг бид мэдэх билээ. Биеийн хөдөлгөөнийг илэрхийлэх хэмжигдэхүүн болох зам, хурд, хурдатгал болон эдгээрийн холбоо, хамаарлыг илэрхийлэх (үгээр илэрхийлэх, томъёо, хүснэгт, диаграмм хэрэглэх) аргуудтай танилцсан. Одоо эдгээр мэдлэгээ сэргээн механик хөдөлгөөнийг илүү нарийвчлан судалъя.

Биеийн байрлалыг харьцуулж тодорхойлох зорилгоор сонгон авсан биеийг **тооллын бие** гэнэ.

Юутай харьцуулсан бэ гэдэгт хариулт өгөх тооллын эх (тооллын бие), хаана байгааг тодорхойлоход шаардагдах координатын систем, хугацаа тоолох цагийг нийлүүлээд **тооллын систем** гэнэ. Тооллын систем бие хэзээ хаана байгааг бүрэн илэрхийлнэ.

Асуулт

Автобус Улаанбаатар хотоос Өвөрхангай аймаг хүртэл тогтоосон зам дагуу явжээ.

Зам зуур автобусны зам хэмжигч ба хурд заагчийн заалт юуг харуулах вэ?

Хөдөлгөөнийг ямар аргаар илэрхийлж болох вэ?



Муруй шугаман координатын аргад биеийн траекторын дагуу муруй тэнхлэг авч биеийн байрлалын өөрчлөлтийг явсан замаар нь илэрхийлнэ (Зураг 1).

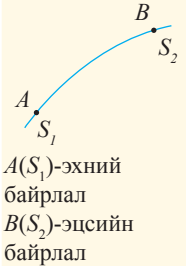
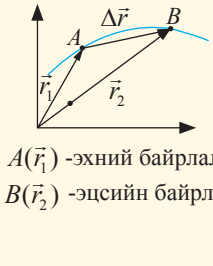
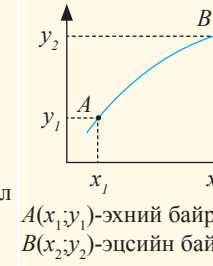
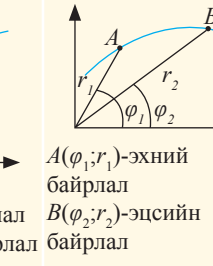
Вектор аргаар биеийн байрлалыг илэрхийлэхэд тооллын эхээс бие рүү татсан радиус вектор хэрэглэдэг. 2-р зургаас харахад эхний, эцсийн байрлал дахь радиус векторын ялгаврыг А цэгээс В цэгт очиход хийсэн шилжилт гэнэ.

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_B - \vec{r}_A$$

Тэгш өнцөгт координатын буюу Декартын (Францын математикч, 1596-1650) координатын арга (Зураг 3) өргөн хэрэглэгдэх бөгөөд вектор аргатай нягт уялдаатай.

Дасгал Дараах хүснэгтэд биений байрлалыг илэрхийлэхэд өргөн хэрэглэдэг хоёр хэмжээст координатын аргуудыг харьцуулан үзүүлжээ.

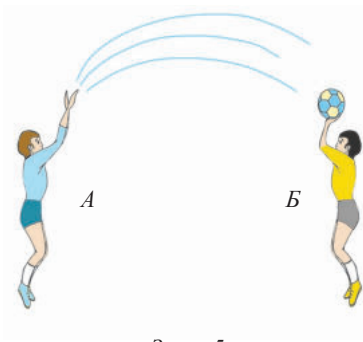
1. Эдгээр арга тус бүрийн онцлогийг хэлэлцэнэ үү. Хоорондоо ямар ялгаатай вэ?
2. Арга тус бүрийг хэрэглэх жишээ хэлнэ үү.

Хэмжиг-дэхүүн	Муруй шугаман координатын арга	Радиус векторын арга	Декартын тэгш өнцөгт координатын арга	Туйлын координатын арга
Биений байрлал	 $A(S_1)$ -эхний байрлал $B(S_2)$ -эцсийн байрлал	 $A(\vec{r}_1)$ -эхний байрлал $B(\vec{r}_2)$ -эцсийн байрлал	 $A(x_1, y_1)$ -эхний байрлал $B(x_2, y_2)$ -эцсийн байрлал	 $A(\varphi_1, r_1)$ -эхний байрлал $B(\varphi_2, r_2)$ -эцсийн байрлал
Биений байрлалын өөрчлөлт	Зам $\Delta s = s_2 - s_1$	(Вектор) шилжилт $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$	Хэвтээ шилжилт $\Delta x = x_2 - x_1$ Босоо шилжилт $\Delta y = y_2 - y_1$	Өнцөг шилжилт $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ Радиал шилжилт $\Delta r = r_2 - r_1$
Хөдөлгөөн явагдсан хугацаа	$\Delta t = t_2 - t_1$	$\Delta t = t_2 - t_1$	$\Delta t = t_2 - t_1$	$\Delta t = t_2 - t_1$
Дундаж хурд	Дундаж шугаман хурд $\langle v_{ш} \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	Дундаж (вектор) хурд $\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$	Дундаж хэвтээ хурд $\langle v_x \rangle = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ Дундаж босоо хурд $\langle v_y \rangle = \frac{\Delta y}{\Delta t}$	Дундаж өнцөг хурд $\langle \omega \rangle = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ Дундаж радиал хурд $\langle v_r \rangle = \frac{\Delta r}{\Delta t}$
Хоромхон хурд	Хоромхон шугаман хурд $v = \frac{ds}{dt}$	Хоромхон (вектор) хурд $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$	Хоромхон хэвтээ хурд $v_x = \frac{dx}{dt}$ Хоромхон босоо хурд $v_y = \frac{dy}{dt}$	Хоромхон өнцөг хурд $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ Хоромхон радиал хурд $v_r = \frac{dr}{dt}$
Хоромхон хурдны холбоо		$ \vec{v} = v$	$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$	$v = \omega r$ ($r = const$ үед)

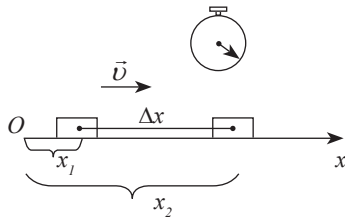
Дасгал Дунджийн тухай ойлголтыг хэрэглэх механик хөдөлгөөнөөс өөр амьдралын жишээ дурдана уу.

Дасгал Дундаж ба хоромхон хэмжигдэхүүн ямар ялгаатай вэ? Ялгааг харуулах жишээ дурдана уу.

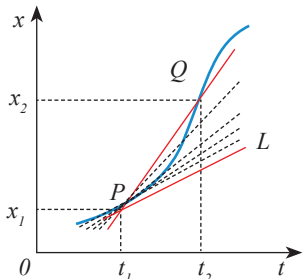
Англи хэлээр шугаман хурдыг speed, вектор хурдыг velocity гэж нэрлэдэг. Бид хурдыг ялгахын тулд тодотгол хэрэглэдэг. Зөвхөн векторын аргыг дангаар нь хэрэглэж байгаа үед вектор гэсэн тодотгол хэрэглэх шаардлагагүй байдаг. Хоромхон вектор хурд траекторт ямагт шүргэгчээр чиглэдэг, хөдөлгөөний чигийг зааж өгдөг.



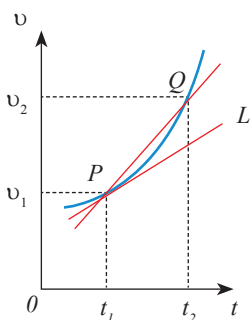
Зураг 5



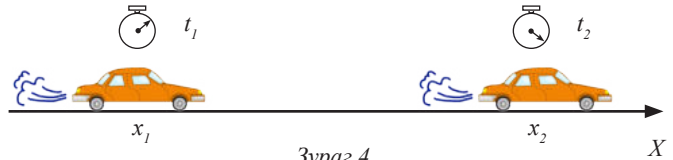
Зураг 6



Зураг 7



Зураг 8



Зураг 4.

Нэг хэмжээст хөдөлгөөн амьдрал дээр төдийлөн элбэг биш, гэхдээ засмал замын шулуун хэсгээр яваа машин, шулуун төмөр замаар яваа галт тэрэг гэх мэт биесийг траекторын тодорхой хэсгийн нэг хэмжээст хөдөлгөөн хийж байна гэж ойлгож болно (Зураг 4).

Нэг хавтгай дээр хөдлөх хөдөлгөөнийг илэрхийлэхэд координатын хоёр тэнхлэг хэрэгтэй. Энэ үед биеийн байрлал хоёр координатаар илэрхийлэгдэх тул хоёр хэмжээст хөдөлгөөн болно (Зураг 5).

Хөдөлгөөнийг диаграммаар дүрслэх

Бие шулууны дагуу хөдөлж байвал тэр шулуун дээр тооллын эхийг сонгон аваад түүний дагуу координатын тэнхлэг авч хугацаа тоолох цагийн хамт хэрэглэвэл тооллын систем бүрдэнэ (Зураг 6).

Бие t_1 агшинд P цэгт байснаа t_2 агшинд Q цэгт хүрч очсон гэе. Дундаж хурд нь хөдөлгөөний туршид туулсан нийт шилжилтийг зарцуулсан хугацаанд харьцуулсан харьцаагаар тодорхойлогдоно.

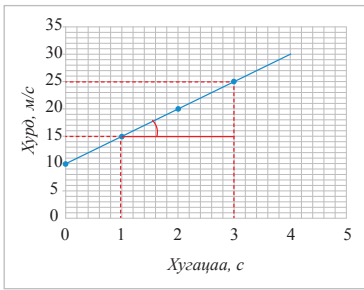
$\langle v \rangle = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$ гэж олдоно. Биеийн байрлалыг хугацаанаас хамааруулан хэмжиж $x-t$ диаграмм байгуулсныг 7-р зурагт харуулав.

Уг диаграмм дээрх $\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$ харьцаа нь PQ шулууны хэвтээ тэнхлэгтэй үүсгэх налалтыг илэрхийлнэ. Үүнийг математик хэллэгээр шулууны өнцгийн коэффициент гэж нэрлэдэг. Хугацааны завсрыг багасгаж графикийн хоёр цэгийг холбосон шинэ шулуун татах бүр шулууны налалтаар тэр хэсгийн дундаж хурдыг илэрхийлж болно. Хугацааны завсрыг багасгах тутам улам бага замд харгалзах дундаж хурдыг олж болох бөгөөд PQ цэгийг холбосон шулуун P цэг дэх шүргэгч рүү ойртсоор байх болно. Иймд хязгааргүй бага хугацааны завсар дахь дундаж хурд буюу t агшин дахь хурдыг координаг хугацааны хамаарлын графикийн P цэгт татсан шүргэгчийн налалтыг тооцоолон олж болно. Ийм аргаар траекторын цэг бүр дэх **хоромхон хурдыг** олж $v-t$ диаграмм байгуулсныг зурагт харуулав. Диаграммаас P цэгээс Q цэг хүртэл бие хувьсах хөдөлгөөн хийж байгаа нь харагдана (Зураг 8).

Хурд хэр зэрэг түргэн өөрчлөгдөж байгааг хурдатгал харуулна.

$v, \text{ м/с}$	10	15	20	25	30
$t (\text{с})$	0	1	2	3	4

$$\langle a \rangle = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$



Зураг 9

Энэ харьцаа нь хурд хугацааны хамаарлын диаграмм дахь PQ цэгүүдийг холбосон шулууны налалт юм. P цэг дэх буюу t_1 агшин дахь хурдатгалыг олохын тулд графикийн P цэгийг дайрсан шүргэгч шулуун татаад шулууны налалт

буюу $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ харьцааг олно.

Хурдатгалын вектор: $\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$. Физикт том өөрчлөлтийг $\Delta x, \Delta t, \Delta v$ гэж тэмдэглэдэг. Харин маш бага өөрчлөлтийг dx, dt, dv гэж тэмдэглэдэг.

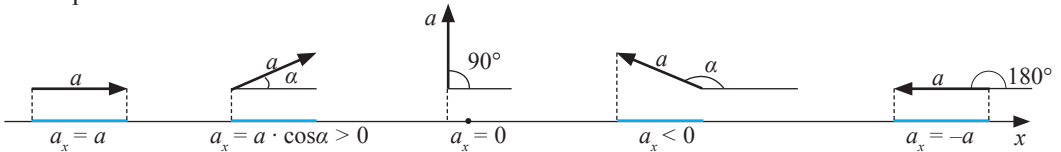
Дасгал

Хурдатгал гэж хурдны өөрчлөгдөх хурдыг хэлнэ. Дараах хүснэгтэд координатын дөрвөн аргын хувьд дундаж ба хоромхон хурдатгалын математик илэрхийллийг үзүүлжээ. Хурдатгалыг хурдтай адилтгаж физик утгыг нь тус тус тайлбарлана уу.

Хэмжиг-дэхүүн	Муруй шугаман координатын арга	Радиус векторын арга	Декартын тэгш өнцөгт координатын арга	Туйлын координатын арга
Дундаж хурдатгал	Дундаж шугаман хурдатгал $\langle a_w \rangle = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ $\Delta v = v_2 - v_1$	Дундаж (вектор) хурдатгал $\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$	Дундаж хэвтээ хурдатгал $\langle a_x \rangle = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$ Дундаж босоо хурдатгал $\langle a_y \rangle = \frac{\Delta v_y}{\Delta t}$	Дундаж өнцөг хурдатгал $\langle \varepsilon \rangle = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$ Дундаж радиал хурдатгал $\langle a_r \rangle = \frac{\Delta v_r}{\Delta t}$
Хоромхон хурдатгал	Хоромхон шугаман хурдатгал $a_w = \frac{dv}{dt}$	Хоромхон (вектор) хурдатгал $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$	Хоромхон хэвтээ хурдатгал $a_x = \frac{dv_x}{dt}$ Хоромхон босоо хурдатгал $a_y = \frac{dv_y}{dt}$	Хоромхон өнцөг хурдатгал $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ Хоромхон радиал хурдатгал $a_r = \frac{dv_r}{dt}$
Хоромхон хурдатгалын холбоо	$a_w = a_r$	$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$ \vec{a}_n нормаль хурдатгал \vec{a}_τ тангенциал хурдатгал	$\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y$	$a_\tau = \varepsilon r$ ($r = \text{const}$ үед)
Дүрслэл				

Векторын проекц

Векторыг тодорхой тэнхлэг дээр проекцлох буюу сүүдэр буулгаж болдог. Ямар тэнхлэгт буулгасныг доор нь заавал бичиж тэмдэглэдэг. Проекцлохын тулд векторын эхлэл, төгсгөл хоёроос тэнхлэг рүү перпендикуляр буулгаж огтлох цэгийг олоод хэрчмээр дүрсэлдэг. Тэнхлэгийн чиглэл ба векторын чиглэл хоёрын хоорондох өнцгөөс проекцын тэмдэг хамаарна.



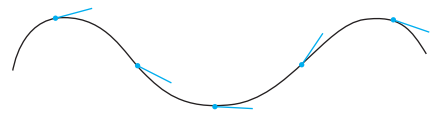
Зөвхөн векторын модуль ба проекцын уганд тоон утгыг орлуулж болно. Жишээ нь, $a_x = 5 \text{ м/с}^2$. Вектор хурд траекторт ямагт шүргэгчээр чиглэдэг бол хурдатгалын вектор нь хүчний чиглэлийн дагуу чиглэх учир хурдны вектортой давхцах албагүй. Иймд хурдатгалын векторыг траекторт шүргэгч ба перпендикуляр байгуулагч болгож задалдаг.

Тангенциал хурдатгал	Нормаль хурдатгал
<p>Хурдатгалын шүргэгч байгуулагчийг тангенциал хурдатгал гэдэг ба хурдны тоон хэмжээ өөрчлөгдөх хурдыг илэрхийлдэг. Энэ нь хоромхон шугаман хурдатгалтай давхцана. Тангенциал хурдатгал нь хурдны хэмжээний өөрчлөлтийг харгалзах хугацаанд харьцуулсан харьцаа буюу хурдны модулиас хугацаагаар авсан уламжлалтай тэнцүү байна.</p>	<p>Нормаль байгуулагч нь хурдны чиглэл өөрчлөгдөх хурдыг илэрхийлдэг. Нормаль хурдатгалын улмаас хурдны чиглэл өөрчлөгдөж, траектор муруйдаг. Нормаль хурдатгал ямагт траекторын муруйлтын төв рүү чиглэдэг. Траекторын тухайн хэсгийг тойргийн хэсэг гэж үзээд муруйлтын радиус гэсэн ойлголт оруулж болдог.</p>
$a_\tau = \frac{d \vec{v} }{dt} = \frac{dv}{dt}$	
<p>Тангенциал хурдатгал траекторт шүргэгчээр чиглэдэг учраас хурдны дагуу, эсвэл эсрэгээр чиглэнэ. Хоромхон хурд ба тангенциал хурдатгал ижил чиглэлтэй байвал хөдөлгөөн хурдсана. Хэрэв хоромхон хурд ба тангенциал хурдатгал хоёр эсрэг чиглэлтэй байвал удааширна.</p>	<p>Нормаль хурдатгалын хэмжээ нь траекторын тухайн цэгийн хоромхон хурдны квадратыг траекторын муруйлтын радиуст харьцуулсантай тэнцүү байдаг.</p>
	$a_n = \frac{v^2}{R}$

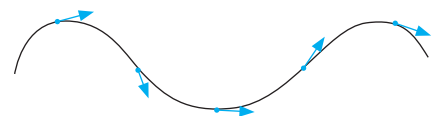
Дасгал Дараах хүснэгтэд вектор дээр хийх зарим үйлдэл ба элбэг тохиолддог алдаатай бичиглэлийг үзүүлжээ. Алдааг зөв болгож засварлана уу. Учрыг тайлбарлаарай.

Вектор дээр хийх үйлдэл	Алдаатай бичиглэл	Зөв бичиглэл
Нэмэх үйлдэл. Нэг төрлийн векторыг нэмж болно. $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ \vec{v} нийлбэр вектор \vec{v}_1 ба \vec{v}_2 нэмэгдэхүүнүүд	$x = \vec{x}_1 + x_2$ $\vec{v} = \vec{v}_0 + t$	
Векторыг задлах Векторыг байгуулагч болгож задалж болно. $\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$ \vec{v}_x ба \vec{v}_y байгуулагч векторууд	$\vec{v} = \vec{3} + \vec{4} = \vec{7}$	
Векторыг тоогоор үржүүлэх. $\vec{X} = k\vec{x}$	$\vec{v} = 5 \cdot \vec{3} = 15$ $m = \frac{\vec{F}}{\vec{a}}$	
Векторын тоон утга $ \vec{v} = v$	$\vec{v} = 5 \text{ м/с}$	
Векторын тоон утгыг жиших $v_2 > v_1$	$x_1 = 2 \text{ м}$ $x_2 = 6 \text{ м}$ $\vec{x}_2 > \vec{x}_1$ $\vec{a} > 0$	

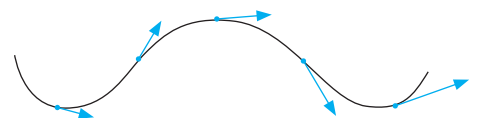
Дасгал Зурагт үзүүлсэн траекторын дагуу бие жигд хөдөлнө. Дараах цэгүүдэд хурдны векторыг дүрсэлнэ үү.



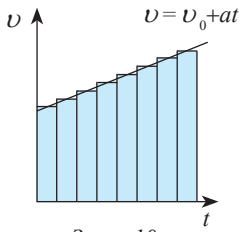
Дасгал Зурагт үзүүлсэн траекторын дагуу бие жигд хөдөлнө. Дараах цэгүүдэд хурдатгалын векторыг дүрсэлнэ үү.



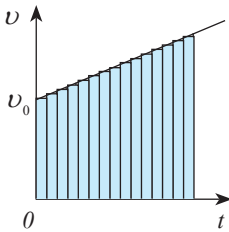
Дасгал Зурагт үзүүлсэн траекторын дагуу бие хурдсан хөдөлнө. Дараах цэгүүдэд нормаль ба тангенциал (шүргэгч) хурдатгалын векторыг дүрсэлнэ үү.



Дасгал Нормаль ба тангенциал хурдатгал ямар ялгаатай вэ?

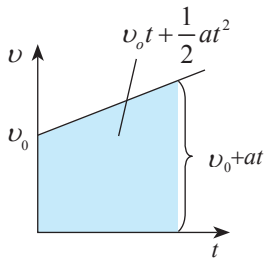


Зураг 10

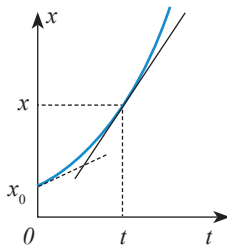


Зураг 11

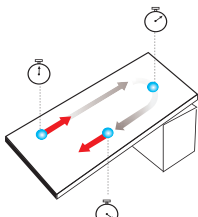
$$x = \frac{1}{2}(v_0 + v_0 + at) \cdot t =$$



Зураг 12. $v-t$ диаграммд биеийн явсан зам талбайгаар дүрслэгдэнэ



Зураг 13. Жигд хурдсах хөдөлгөөний $x-t$ диаграмм



Зураг 14. Удаацрах ба хурдсах хөдөлгөөн

Тогтмол хурдатгалтай хөдөлгөөний хурд-хугацааны диаграммыг (Зураг 9-12) хэрэглэн t хугацаанд туулсан замыг олох илэрхийлэл гаргаж болно.

Жигд хөдөлгөөнд биеийн туулсан зам $S = vt$ байдаг нь $v-t$ диаграммын график доорх талбайтай тэнцүү. Хувьсах хөдөлгөөнд $v-t$ диаграммын графикийг олон хэсэгт хувааж хэсэг тус бүрийг тогтмол дундаж хурдтай хөдөлгөөн гэж төсөөлбөл нийт зам нь тэгш өнцөгтүүдийн талбайн нийлбэр болно. Хязгааргүй олон хэсэгт хуваасан үед талбайг хурдны график доорх талбайтай тэнцүү гэж хэлж болно. Трапецийн талбай буюу жигд хувьсах хөдөлгөөний шилжилтийн томьёо

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{a_x t^2}{2}$$

$x-t$ хамаарлын график парабол байна. (Зураг 13) Энэ графикаас агшин бүр дэх хурдыг тодорхойлж болно. Графикийн тухайн агшинд харгалзах цэгт шүргэгч шулуун татаад түүний өнцгийн коэффициентийг олоход тухайн агшны хурд гарна.

Жигд хувьсах хөдөлгөөний хурд, шилжилтийн вектор тэгшитгэлүүд

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \quad (1)$$

$$\Delta \vec{r} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2} \quad (2)$$

Вектор тэгшитгэлүүдийг x тэнхлэг дээр проекцлон скаляр хэлбэрт оруулан бичвэл

$$v_x = v_{0x} + a_x t \quad (3)$$

$$x - x_0 = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \Rightarrow$$

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \quad (4)$$

Шулуун жигд хувьсах хөдөлгөөнд хурд, хурдатгалын векторууд x тэнхлэгтэй параллел учраас (3), (4) томьёонуудыг хялбар байдалтай бичиж болно.

$$v_x = v_0 + a_x t \quad (5) \quad x = x_0 + v_0 t + \frac{a_x t^2}{2} \quad (6)$$

(5) тэгшитгэлээс t - г олж (6) - д орлуулбал

$$2a_x (x - x_0) = v_x^2 - v_0^2 \quad (7)$$

Эдгээр тэгшитгэлд орсон v , v_0 , a_x хэмжигдэхүүнүүдийг хурд, хурдатгалын проекц гэж тооцох бөгөөд тоон утгыг бичихдээ x тэнхлэгийн эерэг чиглэлтэй ижил чиглэлтэй векторын проекцыг эерэг тэмдэгтэй, эсрэг чиглэлтэй векторын проекцыг сөрөг тэмдэгтэй авна.



Тойрог хөдөлгөөн

Тойрог хөдөлгөөн нь амьдрал ахуйд элбэг тохиолддог. Жишээ нь тойруу замаар явах машины хөдөлгөөн болон манай улсын анхны хиймэл дагуул болох Мазаалай газрын гадаргаас 400 км өндөрт эх дэлхийгээ тойрон эргэж байна. Муруй хөдөлгөөний энгийн тохиолдол нь тойрог хөдөлгөөн юм. Тойргоор жигд эргэж байгаа биеийн хувьд нэгж хугацаанд эргэсэн өнцгийг өнцөг хурд гэнэ.

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad [\omega] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Шугаман хурд нь тойргийн уртыг эргэлтийн үед харьцуулсантай тэнцүү байна.

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

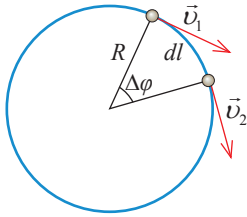
$$\omega = \frac{v}{R}$$

Тойргоор жигд эргэх хөдөлгөөний тохиолдолд эргэлтийн үе ба давтамжийг дараах байдлаар тодорхойлно.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\pi R/v} = \frac{v}{R}$$

Тойргоор эргэх үеийн нормаль хурдатгалыг төвд тэмүүлэх хурдатгал гэдэг.

$$a_{\tau, \tau} = \frac{v^2}{R}$$

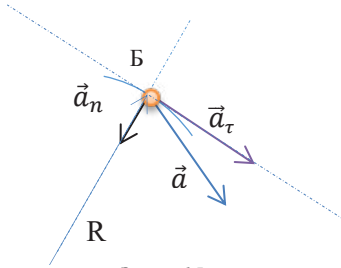


Хурдатгал

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$$

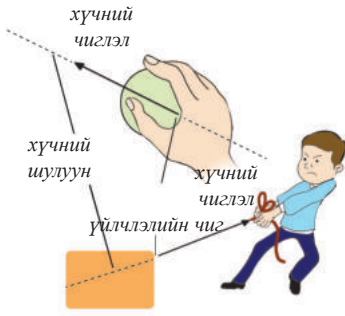
Б цэг дээрх шүргэгчид перпендикуляр болон параллел тэнхлэгүүдэд проекцлон скаляр хэлбэрт бичвэл (Зураг 15)

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$$

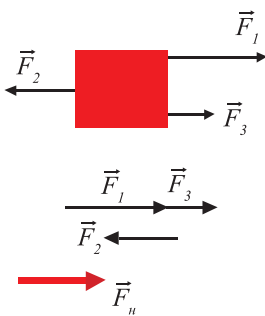


Зураг 15.

Дасгал Тойргоор жигд хурдсан эргэх хөдөлгөөний хурд - хугацааны, координат - хугацааны тэгшитгэлийг муруй шугаман координатын арга ба туйлын координатын аргаар илэрхийлж параметрүүдийн хоорондох холбоог тогтоож хэлэлцэнэ үү.



Зураг 16.



Зураг 17. Нэг шулууны дагуу чиглэсэн хүчийг нэмэх

ХАРИЛЦАН ҮЙЛЧЛЭЛ БА ХҮЧ

Биес зөвхөн харилцан үйлчлэлцэх үед л хүч илэрдэг. Хүч биед агуулагдаж байдаг зүйл биш гэдэг тухай бид өмнөх ангиудад судалсан билээ. Тайван байгаа эсвэл хөдөлгөөн хийж байгаа биед хүндийн хүч, үрэлтийн хүч, тулгуурын хүч гэх мэт янз бүрийн хүч үйлчилж байж болно. Ямар тохиолдолд эдгээр хүч илэрдэг, үр дагавар нь юу байдаг талаар эргэн санацгаая.

Хүч

Хүч гэдэг үгийг өдөр тутмын амьдралд янз бүрийн утгаар ашигладаг бол физикт харилцан үйлчлэлийн их багын хэмжээг илэрхийлдэг хэмжигдэхүүн гэдэг утгаар ойлгоно. Өөрөөр хэлбэл биеийн хэлбэр хэмжээ, хурд буюу хөдөлгөөний төлөв байдал өөрчлөгдөж байгаа үед хүч илэрдэг гэсэн үг.

Хүчийг илэрхийлэх арга

Хүч нь тоон утга болон чиглэлээр тодорхойлогддог учир вектор хэмжигдэхүүн гэдгийг бид мэднэ. Биеийн хурд өөрчлөгдөх чиглэл дагуу буюу хурдатгалын векторын чиглэлтэй хүчний чиглэл ижил байдаг. Хүчийг хэрхэн дүрслэхийг (Зураг 16) үзүүллээ. Ингэхдээ хүчний векторыг үйлчилж байгаа цэгээс эхлүүлэн хүч үйлчлэх чиг дагуу дүрсэлнэ. Векторын урт нь хүчний хэмжээтэй пропорционал байх хэрэгтэй. Хүч үйлчилж байгаа цэгийг дайруулан хүчний вектортой давхцуулан татсан шулууныг хүчний үйлчлэлийн шулуун гэнэ. Хүчний нэгж нь нэг ньютон. 1 Н гэдэг нь 1 кг масстай биед 1 м/с^2 хэмжээтэй хурдатгал үүсгэх хүчний хэмжээ юм. Мөн 100 г масстай биед үйлчлэх хүндийн хүчний хэмжээ ойролцоогоор 1 Н байдаг.

Хүчийг нэмэх, задлах

Нэг биед олон хүч зэрэг үйлчлэх үед тэдгээр хүчнүүдийг нэмээд нэг хүч үйлчилж байна гэж төлөөлүүлж болдог. Энэ хүчийг нийлбэр хүч (дүнгийн хүч) гэж нэрлэдгийг бид мэднэ.

$$\vec{F}_n = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

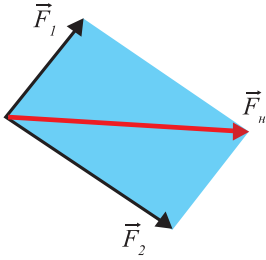
Биед үйлчлэх хүчнүүд нэг шулуун дээр оршиж байгаа бол нийлбэр хүчний хэмжээг олохдоо аль нэг хүчний чиглэлийг эерэг гэж аваад тухайн чиглэл дагуу хүчнүүдийг нэмэх тэмдэгтэй, эсрэг чиглэлтэйг хасах тэмдэгтэй авч нэмдэг (Зураг 17).

$$F_n = F_1 - F_2 + F_3$$

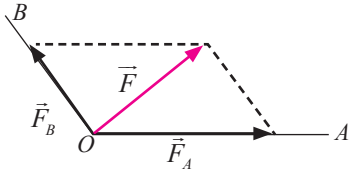
Мөн хүчний векторуудыг параллелаар зөөн дарааллуулан дүрсэлж нийлбэр хүчийг дүрсэлж болно.

Хэрэв биед үйлчлэх хүчнүүд хоорондоо өнцөг үүсгэсэн байвал параллелграммын дүрмээр нэмнэ (Зураг 18).

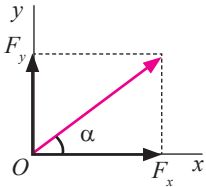
$$\vec{F}_n = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$



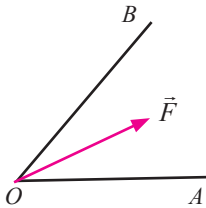
Зураг 18. Өнцөг үүсгэсэн хүчийг нэмэх



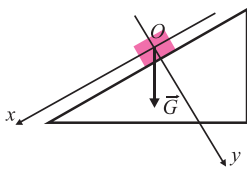
Зураг 19. Хүчийг задлах



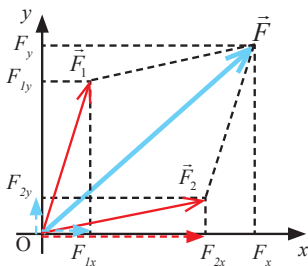
Зураг 20.



Зураг 21.



Зураг 22.



Зураг 23.

Нийлбэр хүчний хэмжээг хоёр хүчний хоорондох өнцөг мэдэгдэж байвал косинусын теоремоор бодож олно.

$$F_n = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2 \cos(180^\circ - \alpha)}$$

Хэд хэдэн хүчийг нэмж нэг хүчээр илэрхийлж болж байгаа бол эсрэгээр нь нэг хүчийг түүнтэй ижил үйлчлэл үзүүлж байгаа хэд хэдэн хүч болгон задалж болдог. Үүний тулд ямар чиглэлүүдэд хүчийг задлах вэ гэдгийг эхлээд тогтооно. Задлах гэж байгаа хүчний векторын эхлэлийг дайруулан задлах чиглэл дагуу OA, OB шулуунуудыг татаад зурагт үзүүлсэнтэй адилаар \vec{F} хүчийг \vec{F}_A ба \vec{F}_B хоёр хүч болгон задална. \vec{F}_A, \vec{F}_B хүчнүүдийг \vec{F} хүчний байгуулагч гэж нэрлэдэг (Зураг 19).

Үүнээс гадна хүчийг перпендикуляр байгуулагч болгон задлах нь түгээмэл байдаг (Зураг 20). Хэрэв \vec{F} хүчний x тэнхлэгтэй үүсгэх өнцөг мэдэгдэж байвал x ба y байгуулагч хүчний хэмжээг дараах байдлаар олж болно

$$F_x = F \cos \alpha$$

$$F_y = F \sin \alpha$$

Дасгал. \vec{F} хүчийг өгөгдсөн OA, OB шулуунууд дээр задална уу. (Зураг 21)

Налуу дээр байгаа биед үйлчлэх хүндийн хүчийг налуугийн дагуу ба түүнд перпендикуляр x ба y тэнхлэг дээр задална уу (Зураг 22).

Хүчийг байгуулагч хүчээр илэрхийлэх

Нийлбэр хүчний хэмжээг косинусын теорем ашиглахгүйгээр байгуулагч хүчний хэмжээг тооцоолох замаар олж болдог. \vec{F}_1 ба \vec{F}_2 хүчний нийлбэр нь \vec{F}_n байг (Зураг 23). $\vec{F}_n = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$

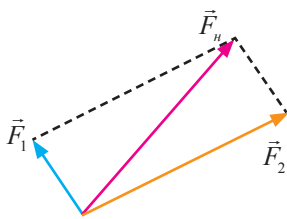
\vec{F}_1 ба \vec{F}_2 хүчний x ба y байгуулагч харгалзан F_{1x}, F_{1y} ба F_{2x}, F_{2y} бол нийлбэр хүчний x ба y байгуулагч F_x, F_y нь дараах илэрхийллээр тодорхойлогдох нь зургаас илэрхий байна.

$$F_x = F_{1x} + F_{2x}$$

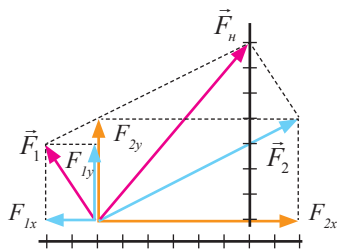
$$F_y = F_{1y} + F_{2y}$$

Жишээ

24-р зурагт үзүүлсэн \vec{F}_1 ба \vec{F}_2 хүчний нийлбэр нь \vec{F}_n . Хүч тус бүрийн хэмжээ болон байгуулагч хүчний хэмжээг ол.



Зураг 24.



Зураг 25.

Бодолт

25-р зургаас харвал:

$$F_{1x} = -2 \text{ Н} \quad F_{2x} = 8 \text{ Н}$$

$$F_{1y} = 3 \text{ Н} \quad F_{2y} = 4 \text{ Н}$$

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} = -2 + 8 = 6 \text{ Н}$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = 3 + 4 = 7 \text{ Н}$$

$$F_n = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(6)^2 + (7)^2} = \sqrt{85} \approx 9.2 \text{ Н}$$

Хөдөлгөөнийг илэрхийлэх хуулиуд

Өдөр тутам бидний эргэн тойронд тааралддаг биесийн хөдөлгөөнийг ажиглавал хүч ба хөдөлгөөн хоорондоо ихээхэн хамааралтай гэдгийг харж болно. Гэхдээ агаарын эсэргүүцэл, үрэлт зэрэг нь хөдөлгөөнийг нарийн төвөгтэй болгодог бөгөөд уг хөдөлгөөний хуулийг тогтоох нь хялбар биш байдаг. Ийм биесийн хөдөлгөөний мөн чанарыг ойлгох туршилт, ажиглалт хийж, зарим нэг тооцоо хийх замаар хөдөлгөөний хуулийн талаар судалцгаа.

Инерцийн хууль

Ангидаа эсвэл гэрийнхээ шалан дээр ямар нэг биесийг түлхэж хөдөлгөөнд оруулахад тэр дороо л зогсоно. Харин гөлгөр мөс, эсвэл үрэлт маш багатай гадарга дээр чулуу, мөс зэрэг биед хурд өгч хөдөлгөвөл уг хурдаа хадгалсан хэвээр удаан хугацаанд хөдөлгөөнөө үргэлжлүүлж чаддаг. Иймэрхүү жишээнээс бид дараах чанарыг хэлж болно.



Ньютоны 1-р хууль:

Биед хүч үйлчлэхгүй, бол бие тайван хэвээрээ байна, эсвэл тогтмол хурдтай шулуун жигд хөдөлгөөнөө үргэлжлүүлсээр байх болно. Үүнийг инерцийн хууль гэдэг.

Аливаа бие тайван байсан бол тайван байдлаа, хөдөлж байсан бол хөдөлгөөнөө хадгалахыг эрмэлзсэн шинжийг өөртөө агуулж байдаг. Ийнхүү бие хөдөлгөөний анхны төлөв байдлаа хадгалахыг эрмэлздэг шинж чанарыг физикт **инерц** гэж нэрлэдэг. Бие бүхэн инерцтэй байна.



Туршилт

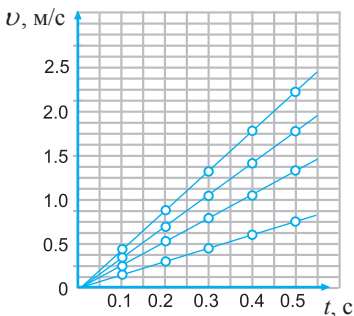
1. Шилэн аяган дээр хөзөр эсвэл ямар нэг хавтгай гөлгөр хатуу цаас тавиад дээр нь зоос, шагай гэх мэт жижиг хүндэвтэр бие тавиад хөзрөө их хурдтай суга татвал юу ажиглагдах вэ? Хариултаа тайлбарлана уу (Зураг 26).



Зураг 26.



Зураг 27.



Зураг 28. а

- Хүнд элстэй уутыг утсанд уяад ямар нэг юмнаас дүүжилнэ. Тэгээд доод утаснаас нь огцом тат. Зөвхөн элстэй уутны дээд талын утсыг таслахын тулд яах хэрэгтэй вэ? Эсвэл зөвхөн доод талын утас тасрах боломжтой юу? (Зураг 27).

Дасгал

- Бүдэрсэн хүн урагшаа унадаг, автобус хөдөлж эхлэхэд зорчигчид хойшоо налдгийн учир юу вэ?
- Хүн харайх болон үсрэхийн тулд яагаад гүйдэг юм бэ?
- Яагаад давхиж явсан машин тоормозлонгуутаа зогсож чаддаггүй вэ?

Хөдөлгөөний хууль

Инерцийн хуулиас харвал хүч үйлчлэхгүй л бол биеийн хурд өөрчлөгдөхгүй, тиймээс биеийн хурдыг өөрчлөхийн тулд хүчээр үйлчлэх хэрэгтэй байх нь.

Асуудал

Биеийн хурд хэр их хэмжээгээр өөрчлөгдөх нь үйлчилж байгаа хүчнээс хэрхэн хамаардаг юм бол?

Тогтмол хүч үйлчилж байгаа үед биеийн хөдөлгөөнийг судалж үзье.

Туршилт

Тогтмол хэмжээтэй хүч үйлчилж байгаа үеийн биеийн хөдөлгөөн

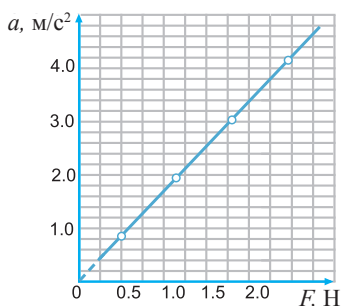
Хэрэглэгдэх зүйлс: Тэргэнцэр, хэмжигч тууз.

Хийх арга: Тэргэнцрээс ачаа зүүж хөдөлгөнө. Тэргэнцрийн хурд ба хугацааг хэмжигчээр бүртгэж авна.

Дүгнэлт: Хурд-хугацааны диаграмм дээрх графикийн хэлбэрийг хараад биед тогтмол хэмжээтэй хүч үйлчлэх үед биеийн хөдөлгөөний талаар юу хэлж чадах вэ?

Дээрх туршилтын үр дүнд 28.а зурагт үзүүлсэн шиг хурд-хугацааны диаграмм гарган авах болно. Графикийг ажиглавал тодорхой хүчний нэг утганд нэг шулуун зурагджээ. Эндээс тэргэнцэрт тогтмол хэмжээтэй хүчээр үйлчлэхэд тухайн хүчний чиглэлд хурд нь секунд бүрт ижил хэмжээгээр нэмэгдэж байна гэж дүгнэж болно. Тэгэхээр үйлчлэх хүчний хэмжээ тогтмол үед бие тогтмол хурдатгалтай хөдөлнө гэсэн үг.

Одоо тэргэнцрийн олж авах хурдатгалын хэмжээ "тэргэнцэр + ачаа"-ны системд үйлчлэх хүчний хэмжээнээс хэрхэн хамаарч байгааг судалъя.



Зураг 28. б

Хүч тогтмол үед биеийн хурд хугацаанаас шууд пропорционал хамаарч өснө. Иймд хурдатгал тогтмол байна.

Туршилт Хурдатгал ба хүчний хоорондох хамаарал

Хэрэглэгдэх зүйлс: Туршилт 1-д хэрэглэсэн зүйлс.

Хийх арга: Дүүжилсэн ачааны массыг нэмэгдүүлж хөдөлгөөнийг бүртгэнэ. Ингэхдээ тэргэнцэр ба ачааны нийлбэр массыг тогтмол байлгана.

Тууз бүр дээр анализ хийж тохиолдол тус бүрт хурд-хугацааны диаграммыг зурна. Графикийн өнцгийн коэффициентийг олох замаар хөдөлгөөн тус бүрийн хурдатгалыг тооцоолно.

Дүгнэлт: Хэвтээ тэнхлэгт хүч, босоо тэнхлэгт хурдатгалыг аваад график байгуул. Байгуулсан графикаас ямар дүгнэлт хэлж чадах вэ?

2-р туршилтаар а хурдатгал болон F хүчний хамаарлыг графикаар илэрхийлбэл 28.б зурагт үзүүлсэн шиг координатын эхийг дайрсан шулуун гарах болно. Эндээс тэргэнцрийн масс тогтмол үед машины олж авах a хурдатгал системд үйлчлэх F хүчтэй шууд пропорционал хамааралтай гэж хэлж болохоор байна.

$$m = const \text{ үед } a \sim F \text{ байна. } a = k_1 F$$

(энд k_1 нь F хүчнээс хамааралгүй пропорционалын тогтмол)

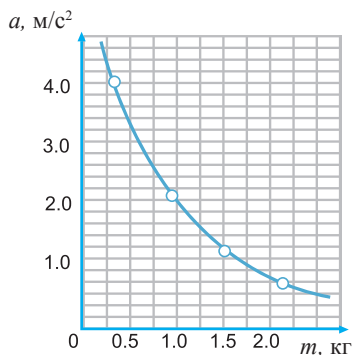
Одоо системд үйлчлэх хүчийг тогтмолоор сонгож системийн масс болон түүний олж авах хурдатгал хоёрын хооронд ямар хамаарал байгааг судалж үзье.

Туршилт Масс ба хурдатгалын хоорондох хамаарал

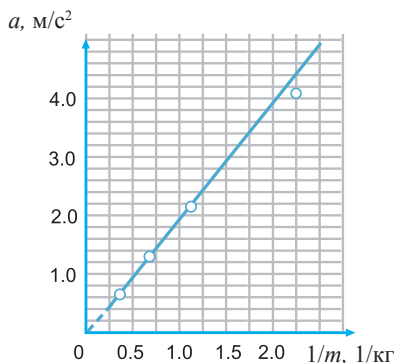
Хэрэглэгдэх зүйлс: Туршилт 1-д хэрэглэсэн зүйлс.

Хийх арга: Дүүжилсэн ачааны массыг өөрчлөхгүй. Тэргэнцэр дээр туухай нэмэн массыг нь ихэсгэж хөдөлгөөнийг бүртгэнэ.

Дүгнэлт: Босоо тэнхлэгт хурдатгал, хэвтээ тэнхлэгт массыг аваад графикийг нь зурна. Байгуулсан графикаас ямар дүгнэлт хийж болох вэ?



Зураг 29. а



Зураг 29. б

3-р туршилтаар a хурдатгал ба m массын хамаарлыг илэрхийлбэл 29-р зургийн a -д үзүүлсэн график үүснэ. Уг графикаас m масс ба a хурдатгал урвуу хамааралтай нь харагдаж байна. Харин хурдатгал массын хэдэн зэргээс урвуу хамаарах нь мэдэгдэхгүй. Харин босоо тэнхлэгт a хурдатгалыг, хэвтээ тэнхлэгт m массын урвуу хэмжигдэхүүнийг авч графикийг байгуулбал 29-р зургийн б-д харуулсан шиг координатын эхийг дайрсан шулуун зурагдана. Эндээс тэргэнцрийг татах хүч тогтмол үед олж авах хурдатгал нь түүний массын урвуу хэмжигдэхүүнд шууд пропорционал хамааралтай байна. Өөрөөр хэлбэл, тэргэнцрийн хурдатгал түүний массаас урвуу хамааралтай гэсэн үг.



Биед хүч үйлчилбэл уг хүчний чиглэл дагуу бие хурдатгал олж авна. Уг a хурдатгалын хэмжээ нь үйлчилсэн F хүчний хэмжээнд шууд, биеийн m массаас урвуу хамааралтай байна. (Ньютоны 2-р хууль)

$$F = \text{const} \text{ үед } a \sim \frac{1}{m} \text{ байна.}$$

$$a = k_2 \frac{1}{m}$$

энд k_2 нь m массаас хамааралгүй пропорционалын тогтмол.

Хөдөлгөөний тэгшитгэл

Дээр хийсэн туршилтуудын үр дүнгээс дараах дүгнэлтийг хэлж болно.

$$\vec{a} = k \frac{\vec{F}}{m} \text{ (энд } k \text{ нь пропорционалын тогтмол)}$$

Энэ тэгшитгэл аливаа хөдөлгөөнд биелэгдэх учир хөдөлгөөний хууль гэж нэрлэдэг байна. Уг тэгшитгэлд байгаа k пропорционалын тогтмолын нэгж нь хурдатгал, хүч, массын нэгжээр илэрхийлэгдэнэ. Массын нэгжийг кг, хурдатгалын нэгжийг $\frac{M}{c^2}$ гэж авах үед k тогтмол нэгтэй тэнцүү болж хүчний нэгж Ньютон болох болно.

Энэ нь 1 кг масстай биед $1 \frac{M}{c^2}$ хурдатгал олгох хүчний хэмжээ 1 Н байна гэсэн үг.

$$1 \text{ Н} = 1 (\text{кг}) \cdot \left(\frac{M}{c^2} \right) = 1 \frac{\text{кг} \cdot M}{c^2}$$

m масстай биед F хүчээр үйлчлэхэд биеийн олж авах хурдатгалыг a гэвэл хөдөлгөөний хуулийг ихэвчлэн дараах хэлбэртэй бичиж ашиглах нь түгээмэл байдаг.

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

Ньютоны 2-р хуулийг илэрхийлж байгаа энэ тэгшитгэлийг бид цаашид хөдөлгөөний тэгшитгэл гэж нэрлэн хэрэглэх болно.

$$F_r = \gamma \frac{m \cdot m_{\text{дэлхий}}}{R_{\text{дэлхий}}^2}$$

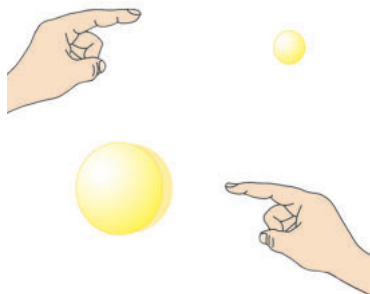
$$g_r = \gamma \frac{m_{\text{дэлхий}}}{R_{\text{дэлхий}}^2}$$

$$F_r = G = mg$$

Биеийн масс инерцит чанар төдийгүй гравитацын үйлчлэлд орох чадварыг илэрхийлдэг.



Зураг 30.



Зураг 31.

Хүндийн хүч ба биеийн жин

Дэлхий дээр байгаа бие бүхэн дэлхийн төв рүү чиглэсэн хүндийн хүчээр татагдаж байдаг. Дэлхийн гадарга орчимд зөвхөн энэ хүндийн хүчний үйлчлэлээр доош унах үед биеийн хурдатгал уг биеийн массаас хамаарахгүй тогтмол g хэмжээтэй байдаг. Биеийн хөдөлгөөний тэгшитгэлийг бичвэл

$$ma = G. \text{ Эндээс } ma = mg \text{ гэдгээс } a = g = 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \text{ болно.}$$

Хүндийн хүчний хурдатгал дэлхий дээрх байршлаас хамаарч өөр өөр байдаг. Учир нь дэлхийн хэлбэр бөмбөрцөг биш байдгаас болоод дэлхийн зүгээс чамайг татах хүндийн хүч, экватор ба туйл дээр ялгаатай байна. Хэрэв саран дээр очвол сар чамайг татах хүндийн хүч мөн л өөр утгатай байна.

Хөдөлгөөний тэгшитгэлээс харвал биед хүч үйлчилсний улмаас хэр хэмжээний хурдатгал олж авах нь тухайн биеийн массаас хамаарч байна. Тэгэхээр биеийн масс инерцийн хэмжээг илэрхийлдэг гэсэн үг. Масс нь биеийн хэмжээ болон байршлаас хамаарч өөрчлөгддөггүй. Харин биеийн масс их бол хүндийн хүч их байна. Дэлхий дээр байгаа бие хүндийн хүчээр дэлхийд татагдаж байгаагаас болоод тулгуураа тодорхой хүчээр дарж байдаг. Энэ хүчийг физикт биеийн жин гэж нэрлэнэ. Тулгуур тайван байгаа тохиолдолд биеийн жин хүндийн хүчтэй хэмжээгээрээ тэнцүү. Харин өдөр тутмын амьдралд бид жин, масс хоёрыг үргэлж адилхан мэтээр ярьсаар ирсэн нь харамсалтай. Сансрын хөлөг дотор байгаа аливаа биес жингүйдэж байна гэж бид ярьдаг (Зураг 30). Энэ нь бие тулгуураа ямар нэг хүчээр дарахаа больсон ба биеийн жин тэгтэй тэнцүү болсон гэсэн үг. Жишээ нь, жингүйдэлд байгаа теннисийн бөмбөг, хүнд төмөр бөмбөг хоёр байг (Зураг 31). Гэхдээ тус тусад нь хүчээр үйлчилж хөдөлгөж үзвэл теннисийн бөмбөгийг хөдөлгөхөд амар байх боловч төмөр бөмбөгийг хөдөлгөхөд түүнтэй яг ижил амар байхгүй, түүнээс өөр хүч гаргана. Эндээс биеийн масс нь жингүйдэж байхад ч, дэлхий дээр ч нэг ижил утгатай гэсэн үг.

Дасгал

1. Сарны гадарга дээрх хүндийн хүчний хурдатгал $g = 1.7 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ байдаг. 50 кг масстай хүний дэлхий дээрх болон саран дээрх жин хэдтэй тэнцүү байх вэ?
2. Ширээн дээр тавьсан 5 кг масстай туухайг дээш нь 15 Н хүчээр татаж байв. Энэ үед ширээг туухай ямар хүчээр (туухайны жин) дарж байгаа вэ?



2. ХӨДӨЛГӨӨНИЙ ТОО ХЭМЖЭЭ БА ИМПУЛЬС

Биеийн массыг хурдаар үржүүлсэнтэй тэнцүү вектор хэмжигдэхүүнийг биеийн **хөдөлгөөний тоо хэмжээ** гэнэ.

$$\vec{P} = m\vec{v} \quad \text{нэгж нь: } [P] = 1 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

\vec{P} векторын чиглэл нь биеийн хурд \vec{v} векторын чиглэлтэй ижил байна.

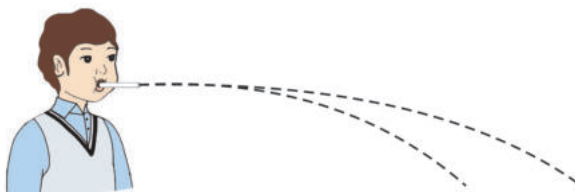
Ньютоны нэгдүгээр хууль ёсоор бие гаднаас хүч үйлчлэх хүртэл шулуун жигд хөдөлгөөнөө эсвэл тайван байдлаа хадгална. Иймд биеийн хөдөлгөөний тоо хэмжээ тэр биед өөр бие үйлчлэх хүртэл тогтмол байна.

Биед хүч үйлчлэхэд хөдөлгөөний тоо хэмжээ үйлчилсэн хүч ба үйлчлэлийн хугацаанаас хэрхэн хамаарч өөрчлөгддөг вэ?



Хөдөлгөөний тоо хэмжээ биеийн хөдөлгөөний төлөв байдлыг илэрхийлнэ. Импульс нь төлөв байдлын өөрчлөлтийг илэрхийлдэг.

Өөрсдөө хийж үзэцгээе



1. Нарийн бүдүүн соруул ашиглан сум харвах хоолой хийж туршина. Бүдүүн соруулаас 1:2 харьцаатай хоёр хэсгийг бэлдэнэ. Нарийн соруулаас багахан хэсгийг тасалж аваад дотор нь цаас чихэж хоёр ижил сум бэлдэнэ.

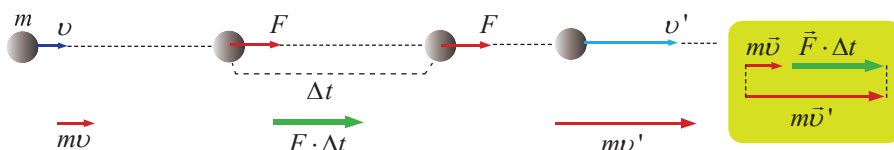
2. Хоёр бүдүүн соруулд сумаа хийгээд амандаа зэрэг зууж үлээнэ.

Бодож тунгаах зүйл:

Хүчийг тогтмол байлгаж хөдөлгөөний тоо хэмжээ үйлчлэх хугацааны хамаарлыг хэрхэн судлах вэ?

Сумны хөдөлгөөний тоо хэмжээний өөрчлөлт хүчний хэмжээнээс хамаарахыг хэрхэн судлах вэ?

Биед хүч үйлчлэхэд хөдөлгөөний тоо хэмжээ яаж өөрчлөгдөхийг хөдөлгөөний хуулиуд дээр тулгуурлан тайлбарлая.



\vec{v} хурдтай шулуун хөдөлж байгаа m масстай биед \vec{F} хүч Δt хугацааны турш үйлчлэхэд хурд нь \vec{v}' болжээ. Ньютоны 2-р хуулиар

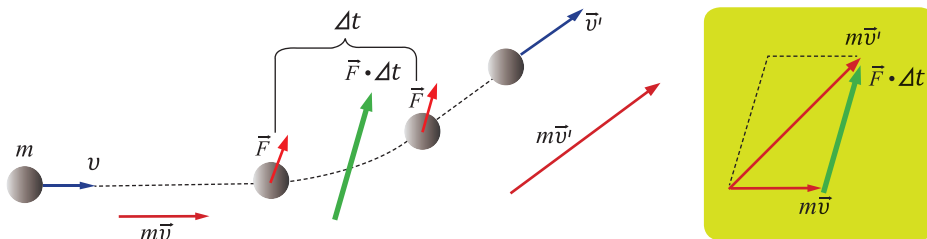
$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{\vec{v}' - \vec{v}}{\Delta t}$$

$$\vec{F} \Delta t = m\vec{v}' - m\vec{v} = \Delta \vec{p}$$

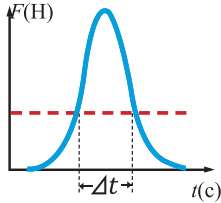
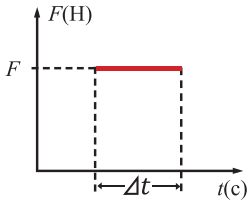
$$\vec{F} \Delta t = \Delta \vec{p}$$

\vec{p} - хөдөлгөөний тоо хэмжээ
 $\Delta \vec{p}$ - импульс

Хүчийг үйлчилсэн хугацаагаар үржүүлсэнтэй тэнцүү $\vec{F} \Delta t$ үржвэрийг **хүчний импульс** гэж нэрлэдэг. Үйлчлэх хүч, хугацаа хичнээн дахин өөрчлөгдөнө хөдөлгөөний тоо хэмжээ төчнөөн дахин өөрчлөгдөнө. Хөдөлгөөний тоо хэмжээний өөрчлөлтийг **импульс** гэнэ.



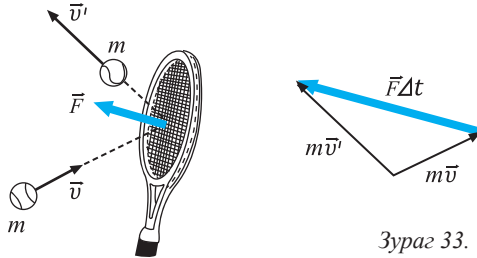
Хэвтээ гадарга дээр шулууны дагуу \vec{v} хурдтай хөдөлж байсан биед хөдөлгөөний чиглэлд ташуу \vec{F} хүч Δt хугацаанд үйлчлэв. Хугацааны төгсгөлд хурд нь \vec{v}' болжээ. Биеийн анхны хөдөлгөөний тоо хэмжээний вектор дээр $\vec{F} \Delta t$ векторыг нэмэхэд сүүлийн хөдөлгөөний тоо хэмжээний вектор гарч байна.



Зураг 32. Хүчний үйлчлэлийн үр дүн нь хүч ба хүчний үйлчлэх хугацаанаас хамаарна.

$F-t$ диаграммаас хүчний импульсийг хэрхэн олох вэ?

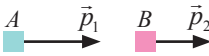
Биед тогтмол хүч үйлчилж байхад $\vec{F}\Delta t$ үржвэр $F - t$ диаграммын график доорх талбайтай тэнцүү байна. Хувьсах хүч үйлчилсэн ч хүчний импульс нь талбайтай тэнцүү. Графикийн муруй доорх талбайтай тэнцүү талбайтай тэгш өнцөгт зурвал түүнд харгалзах \vec{F} нь хүчний дундаж хэмжээг харуулна (Зураг 32).



Зураг 33.

Агаарын теннисний бөмбөгийг цохиураар цохиход бөмбөгний хурд, хөдөлгөөний тоо хэмжээний чиглэл, хүчний чиглэл хоорондоо хэрхэн холбогдож байгааг тодруулъя. Бөмбөг цохиурыг \vec{v} хурдаар мөргөөд \vec{v}' хурдтай болжээ. 33-р зурагт мөргөхийн өмнө ба мөргөсний дараах хөдөлгөөний тоо хэмжээний векторуудыг дүрсэлжээ. Эдгээр вектор харгалзах хурдны вектортой параллел байна. Векторыг хасах дүрмээр тэдгээрийн үзүүрүүдийг холбож зурвал хөдөлгөөний тоо хэмжээний өөрчлөлт гарна. Энэ нь хүчний импульс бөгөөд бөмбөгт үйлчлэх хүчний дагуу чиглэх болно.

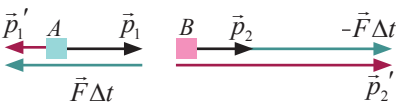
Мөргөлдөхөөс өмнө



Учирсан хүчний импульс



Мөргөлдөөний дараа



Зураг 34.

Хөдөлгөөний тоо хэмжээ хадгалагдах хууль

Нэг шулууны дагуу хөдлөх биесийн мөргөлдөөнийг авч үзье.

Нэг шулууны дагуу хөдөлж буй А биеийн масс m_1 , хурд \vec{v}_1 , В биеийн масс m_2 , хурд \vec{v}_2 байв. А бие В-ийг гүйцэж мөргөнө. Мөргөлдөх үед бие биедээ тэнцүү хэмжээтэй эсрэг чиглэлтэй хүчээр Δt хугацааны турш үйлчилнэ. Мөргөлдөөний дараа биесийн хурд харгалзан \vec{v}'_1 , \vec{v}'_2 болжээ.

Бие тус бүрийн хөдөлгөөний тоо хэмжээний өөрчлөлт буюу хүчний импульсийг бичвэл

$$m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1 = -\vec{F}\Delta t$$

$$m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2 = \vec{F}\Delta t \quad \text{тэгшитгэлүүдийг тэнцүүлбэл}$$

$$m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1 = -(m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2)$$

$$\Delta\vec{p}_1 = -\Delta\vec{p}_2 \quad \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$$

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$$

Битүү системийн бүтэн хөдөлгөөний тоо хэмжээ хадгалагдана.



Системд оролцож байгаа биеүдийн хөдөлгөөний тоо хэмжээний нийлбэрийг системийн хөдөлгөөний тоо хэмжээ гэнэ.

Хоёр биеийн хөдөлгөөний тоо хэмжээний нийлбэр харилцан үйлчлэлийн үед хадгалагдана.

Тооцоо хийхдээ тодорхой тэнхлэг дээр хөдөлгөөний тоо хэмжээг проекцолж скаляр хэмжигдэхүүн болгоно.

Хоёр бие харилцан үйлчлэлцэхэд бие бүрийн хурд ба хөдөлгөөний тоо хэмжээ нь өөрчлөгддөг боловч биесийн харилцан үйлчлэлийн өмнөх хөдөлгөөний тоо хэмжээний нийлбэр харилцан үйлчлэлийн дараах хөдөлгөөний тоо хэмжээний нийлбэртэй тэнцүү.

Дасгал

1. 600 г масстай бие 4 м/с, 0.9 м/с, 0.006 м/с хурдтай хөдлөх үеийн хөдөлгөөний тоо хэмжээг тооцоол.
2. 2.4 т масстай автомашины хурд 18 км/ц –аас 9 км/ц болсон бол биед учруулсан импульсийг ол.
3. 150 г масстай биеийн хурдыг 20 с дотор 6 м/с – 4 м/с болгон багасгах хүчний хэмжээг ол.

Халз мөргөлдөөн

Хөдөлж буй бие, тайван байгаа биеийн төвийг холбосон шулууны дагуу явагдах халз мөргөлдөөнийг авч үзье (Зураг 39). Хоёр биеийн халз мөргөлдөөний үед хөдөлгөөний тоо хэмжээ хадгалагдах хуулийг хэрэглэхдээ хөдөлгөөн явагдаж байгаа шулууны дагуу тэнхлэг авч проекцолно.

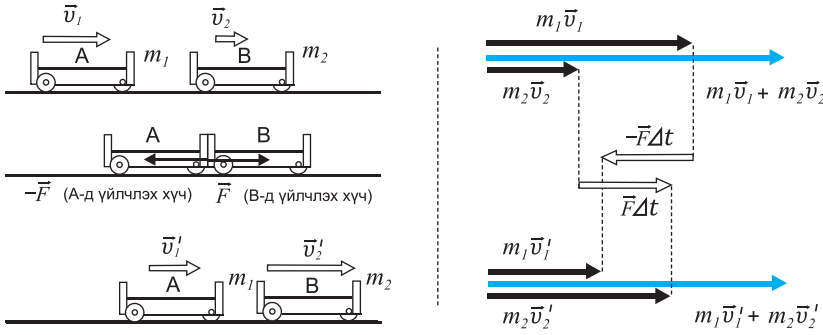
$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$$

$$m_1v_{1x} + m_2v_{2x} = m_1v'_{1x} + m_2v'_{2x}$$

Эхний ба сүүлийн хурдууд координатын тэнхлэгтэй коллинеар учраас уг тэнхлэг дээрх проекцын хэмжээ хурдны векторын хэмжээтэй тэнцүү. Иймд скаляр тэгшитгэл бичих хялбар дүрэм хэрэглэж болно.

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2$$

Мөргөж буй аль нэг биеийн анхны хурдыг тэнхлэгийн эерэг чиг гэж сонгоод хурднуудын векторын оронд түүний хэмжээг бичихдээ эергээр сонгосон чиглэлтэй ижил чиглэлтэй хурдыг эерэг, эсрэг чиглэлтэй хурдыг сөрөг тэмдэгтэй бичнэ. Өөд өөдөөсөө хөдлөн мөргөлдсөн хоёр биеийн нэгний хурдны чиглэлийг тэнхлэгийн эерэг чиглэл болгон авч мөргөлдөөний дараах хурдуудыг түүнтэй ижил чиглэлтэй гэж тооцно. Мөргөлдөөний шинж чанараас хамааруулан энерги хадгалагдах хуулийг эсвэл мөргөлдөөний сэргэлтийн коэффициентийн томъёо бичиж систем тэгшитгэл бодсоны эцэст хурдны жинхэнэ чиг хаашаа байсан нь тодорхой болдог. Тухайлбал, m_1 масстай, v_1 хурдтай А бие m_2 масстай, v_2 хурдтай В бие нэг шулууны дагуу өөд өөдөөсөө хөдөлж халз харимхай мөргөлдөөн хийжээ. Мөргөлдөөний дараах хурдны хэмжээ, чиглэлийг олохын тулд А биеийн хөдөлгөөний чиглэлийг эерэг гэж тооцоод хөдөлгөөний тоо хэмжээ хадгалагдах хууль, энерги хадгалагдах хуулиудыг эерэг хэрэглэнэ.



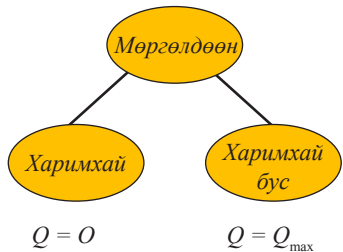
Зураг 35.

Хөдөлгөөний тоо хэмжээ хадгалагдах хууль энерги хадгалагдах хуультай хамтарч төгс утгатай болдог.

$$\begin{cases} m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2' \\ \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2} \end{cases}$$

Харимхай ба харимхай бус мөргөлдөөн

Мөргөлдөөний үед кинетик энергийн алдагдалгүй ($Q=0$) бол харимхай мөргөлдөөн гэнэ. Мөргөлдөөний үед кинетик энерги алдагддаг бол харимхай бус мөргөлдөөн гэнэ. Мөргөлдсөний дараа биес нэгдэн хамт хөдөлж байвал абсолют харимхай бус мөргөлдөөн болдог. Энэ үед энергийн алдагдал хамгийн их (Q_{\max}) байна. Харимхай мөргөлдөөнийг нарийвчлан үзье. Аль ч тохиолдолд хөдөлгөөний тоо хэмжээ хадгалагдах хууль болон энерги хадгалагдах хууль биелнэ. ($Q=0$)



$$\begin{aligned} m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 &= m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2' \\ \frac{m_1 \vec{v}_1^2}{2} + \frac{m_2 \vec{v}_2^2}{2} &= \frac{m_1 \vec{v}_1'^2}{2} + \frac{m_2 \vec{v}_2'^2}{2} + Q \end{aligned}$$

Тэгшитгэлүүдэд адилтгал хувиргалт хийвэл

$$\begin{aligned} m_1 (\vec{v}_1' - \vec{v}_1) &= -m_2 (\vec{v}_2' - \vec{v}_2); \\ m_1 (\vec{v}_1'^2 - \vec{v}_1^2) &= -m_2 (\vec{v}_2'^2 - \vec{v}_2^2) \end{aligned}$$

Хоёр тэгшитгэлийг харьцуулбал

$$\vec{v}_1' + \vec{v}_1 = \vec{v}_2' + \vec{v}_2 \Rightarrow \vec{v}_2' - \vec{v}_1' = -(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

Харимхай мөргөлдөөний тохиолдолд мөргөлдөөний дараах харьцангуй хурд нь мөргөлдөөний өмнөх харьцангуй хурдтай тэнцүү бөгөөд эсрэг чиглэлтэй байна. Абсолют харимхай бус мөргөлдөөний үед энэ харьцаа ямар байх вэ?

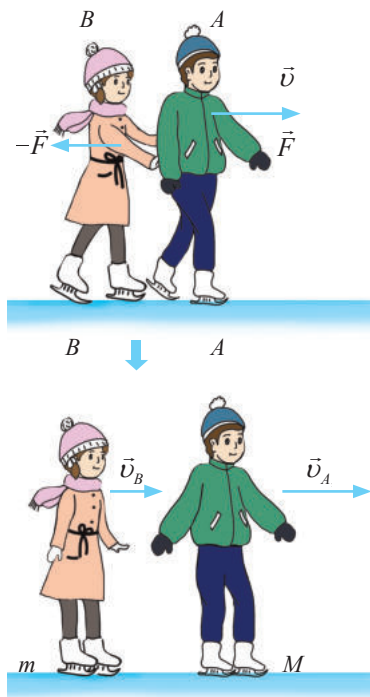
Мөргөлдөөний дараах хурдууд тэнцүү буюу $v_2' = v_1'$ тул харьцангуй хурдуудын харьцаа тэг байна. Харимхай бус



Зураг 36.



Зураг 37.



Зураг 38.

мөргөлдөөний үед алдагдсан кинетик энерги нь биеүүдийг деформацилах болон дотоод энергийг нэмэгдүүлэхэд зарцуулагддаг.

Ширээний тэгш гадарга дээр байсан билиардын бөмбөгийг яг ижилхэн бөмбөгөөр харимхай мөргүүлбэл яах вэ?

Туршилт Зураг 36-д үзүүлсэн дүүжингийн захын бөмбөгийг хазайлгаад тавихад мөргөлдөөн хэрхэн явагдаж байгааг ажиглаад тайлбарлаарай. Ширээн дээр шугам тавиад хэд хэдэн зоосыг зэрэгцүүлэн тавьж нэг зоосыг гулгуулан мөргүүлж ажигла (Зураг 37). Мөргөлдөөний үр дүнг тайлбарлана уу.

Мөргөлдөөний сэргэлтийн коэффициент

Харимхай мөргөлдөөнд хоёр биеийн мөргөлдөөний дараах харьцангуй хурд мөргөлдөөний өмнөхтэй хэмжээгээрээ тэнцүү, абсолют харимхай бус мөргөлдөөнд мөргөлдөөний дараа хоёр бие ижил хурдтай (харьцангуй хурд тэг) болохыг үзсэн билээ. Эндээс харьцангуй хурднуудын харьцааг мөргөлдөөний янз төрхийг илэрхийлэх хэмжигдэхүүн болгох санаа гарч ирдэг. Энэ харьцааг e үсгээр тэмдэглээд мөргөлдөөний сэргэлтийн коэффициент гэнэ.

$$e = -\frac{v_2' - v_1'}{v_2 - v_1}$$

$e = 1$	абсолют харимхай мөргөлдөөн
$0.5 < e < 1$	харимхай мөргөлдөөн
$0 < e < 0.5$	харимхай бус мөргөлдөөн
$e = 0$	абсолют харимхай бус мөргөлдөөн

Сэргэлтийн коэффициентийн томъёог хэрэглэхдээ хурдны тэмдгийг эерэг гэж авсан чиглэлтэй ижил бол “+”, эсрэг бол “-” тэмдэгтэй гэж тооцно.

Бие хуваагдах үеийн хөдөлгөөн ба тийрэлтэт хөдөлгөөн

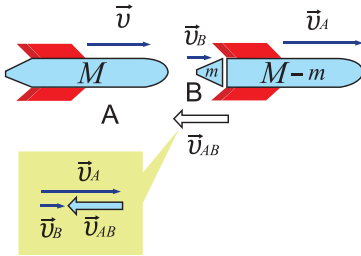
M масстай A хүүхэд, m масстай B хүүхэд хоёр тэшүүрээр хамтдаа \vec{v} хурдтай гулгаж байгаад B хүүхэд өмнөх хүүхдээ түлхэхэд хоёуланд нь \vec{F} хүч Δt хугацаанд үйлчилж хурд нь тус бүр \vec{v}_A , \vec{v}_B болжээ (Зураг 38).

A биед: $M\vec{v}_A - M\vec{v} = -\vec{F}\Delta t$

B биед: $m\vec{v}_B - m\vec{v} = \vec{F}\Delta t$

$$(M + m)\vec{v} = M\vec{v}_A + m\vec{v}_B$$

Биеэс түүний нэг хэсэг тасрах үеийн хөдөлгөөнийг тийрэлтэт хөдөлгөөн гэдэг. Буугаар буудах, пуужингийн хөдөлгөөн зэрэг нь тийрэлтэт хөдөлгөөний жишээ юм.



Зураг 39.

Агаарт нисэж байгаа онгоц орчны агаартай үйлчилснээр нисэж чаддаг. Агааргүй хоосон орон зайд нисэх пуужин ямар ч зүйлд тулалгүйгээр яаж нисэж чаддаг вэ? Үүнийг хөдөлгөөний тоо хэмжээ хадгалагдах хуулиар хэрхэн тайлбарлах вэ?

M масстай бүрхүүл (их бие), m масстай түлш бүхий пуужин v хурдтай хөдөлж байв. Бүх түлш хоромхон хугацаанд шатаж хий болоод пуужинтай харьцангуй \vec{v}_{AB} хурдтайгаар шидэгджээ (Зураг 39). Үүний дараа пуужингийн хурд \vec{v}_A болсон бол, хийн хурд (газартай харьцуулсан) $\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{AB}$ хөдөлгөөний тоо хэмжээ хадгалагдах хууль хэрэглэе.

$$M\vec{v} = (M - m)\vec{v}_A + m\vec{v}_B = (M - m)\vec{v}_A + m(\vec{v}_A + \vec{v}_{AB}) = M\vec{v}_A + m\vec{v}_{AB}$$

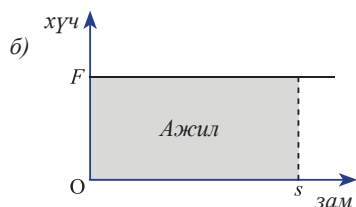
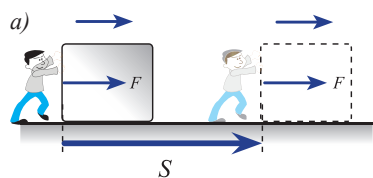
Эндээс $\vec{v}_A = \vec{v} - \frac{m}{M}\vec{v}_{AB}$ тодорхойлогдох ба \vec{v}_{AB}, \vec{v} хурдууд эсрэг чиглэлтэйг тооцвол $v_A = v + \frac{m}{M}v_{AB}$ болно.

Дасгал Хөдөлгөөн хийж байгаа биеийг ажиглавал дараах зүйлийг илрүүлж болно. Хүн хөлөөрөө, машин дугуйгаараа газрыг хойш нь түлхэж урагшилдаг. Онгоц агаарыг сэнсээрээ, загас усыг сүүлээрээ хойш нь түлхэж урагшилдаг. Тэгвэл пуужин агааргүй орчинд юун дээр тулж урагшаа явдаг юм бэ?





3. ЭНЕРГИ БА АЖИЛ, ЧАДАЛ



Зураг 40.

Ажил

Бид өдөр тутмын амьдралд ажил гэдэг үгийг янз бүрийн утгаар ойлгож хэрэглэдэг. Харин физикт биед хүч үйлчилснээр хөдөлгөөнд орох үед ажил хийгдлээ гэж ярьдгийг бид мэднэ.

40-р зургийн а-д үзүүлсэн биед тогтмол F хүчээр үйлчилж хүчний чиглэл дагуу S зайд шилжүүлсэн бол уг хүчний хийсэн ажлын хэмжээг дараах тэгшитгэлээр илэрхийлнэ

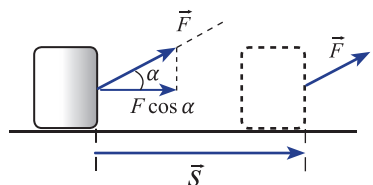
$$A = F \cdot S$$

Эндээс ажил нь Н·м нэгжээр илэрхийлэгдэх нь харагдаж байгаа ч бид ажлыг Жоуль ($1 \text{ Ж} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$) нэгжээр илэрхийлнэ. Ажил нь хүч-замын диаграмм дээр хашигдсан дүрсийн талбайгаар илэрхийлэгдэнэ (Зураг 40б).

Дасгал 5 кг масстай бие 2 м өндрөөс доош чөлөөтэй унах үед хүндийн хүчний хийх ажлыг тооцоол.

Хүчний чиглэл хөдөлгөөний чиглэлтэй өнцөг үүсгэх үеийн ажил

Хэвтээ гадарга дээр байгаа биеийг тогтмол хэмжээтэй F хүчээр хэвтээ чигтэй α өнцөг үүсгэн татаж хөдөлгөсөн үед (Зураг 41) уг хүчний хийх ажил дараах тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэнэ.



Зураг 41.

$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha$$



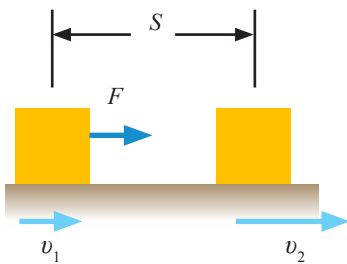
Кинетик энерги

Энгийн тохиолдолд ажил хийх чадвартай биеийг энергитэй гэж ярьдаг. Гэвч энерги хадгалагддаг, энерги чадвар юм бол чадвар хадгалагдах ёстой. Гэтэл энерги эцэстээ ямагт үр ашиггүй хэлбэр болох дулааны энергид хувирч байдаг. Жишээлбэл, хурдтай явсан машин тоормозлож зогсоход энерги нь дулааны энергид хувирна. Дугуй ба агаарыг халаахад зарцуулагдсан энергийг цуглуулж, машиныг хөдөлгөх боломжгүй. Биеийн кинетик энерги нь механик хөдөлгөөний хурдны квадрат ба биеийн массаас хамаардаг.

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Кинетик энерги хурдны квадратаас хамаарч байгаа нь хөдөлгөөний чиглэлээс хамаарахгүйг харуулна. Биеийн масс ихсэхэд кинетик энерги нэмэгдэж байгаа нь нийлбэрчлэгддэг чанартайг илтгэнэ. Биеийг бүрэлдүүлж байгаа жижиг хэсгүүд нэг зүг чиглэсэн ижилхэн хурдтай байх үед дээрх томъёо биелнэ. Иймд дээрх томъёо давших хөдөлгөөн хийж байгаа биеийн массын төвийн хувьд биелнэ.

Дасгал 50 кг масстай тамирчин 10 м/с хурдаар гүйж байх үед түүний хөдөлгөөний энергийг тооцоол. Хэрэв хурдаа 2 дахин багасгавал тамирчны хөдөлгөөний энерги хэд дахин өөрчлөгдөх вэ?



Зураг 42.

Хөдөлгөөний энерги ба ажил

Үрэлтгүй хэвтээ гадарга дээр v_1 хурдтай m масстай бие гулсаж байв. Түүнд хэвтээ чигт зурагт үзүүлснээр тогтмол F хүч t хугацаанд үйлчлэн хурд нь v_2 болсон (Зураг 42). Энэ хооронд бие S зайд шилжсэн гэе. Энэ үед хийгдсэн ажил нь

$$A = F \cdot S \text{ байна.}$$

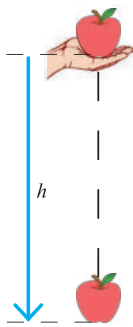
$$F = ma \text{ тул } S = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$$

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = E_2 - E_1 = \Delta E_k$$

$A = \Delta E_k$ кинетик энергийн өөрчлөлт нь ажилтай тэнцүү. Ажил нь өөр биед эсвэл өөр хэлбэрт хувирсан кинетик энергийн хэмжээг илэрхийлдэг. Жишээлбэл, үрэлтийн хүчний ажил 300 Ж гэвэл ийм хэмжээний кинетик энерги дулааны энергид хувирна гэсэн үг.

Дасгал Гөлгөр гадарга дээр 2 м/с хурдтай хөдөлж байгаа 4 кг масстай тэргэнцэрт хүч үйлчлэх үед түүний хурд 3 м/с болов. Уг хүчний хийсэн ажлыг тооцоол.

Кинетик энергийн өөрчлөлтийг ажил гэж нэрлэдэг. Кинетик энерги төлөвийн параметр бол ажил нь төлөвийн параметр биш, төлөвийн өөрчлөлтийг илэрхийлдэг.



Зураг 43.

Хүндийн хүчний потенциал энерги нь дэлхий болон биеийн гравитацийн харилцан үйлчлэлтэй холбоотой. Иймд хоёр биеийн масс ба хоорондох зайнаас хамаарна.

$$E_n = -\gamma \frac{m \cdot M}{r}$$

Үүний тухайн тохиолдол нь $E_n = mgh$ юм.

Потенциал энерги

Бид чөлөөт уналтын тухай мэднэ. Доош унаж байгаа бие дэлхийд татагдаж хурд нь хугацаа өнгөрөх тутам улам нэмэгддэг. Туулах зай хурдаас квадратаар хамаардаг.

$$h = \frac{v^2}{2g}. \text{ Энэ илэрхийллийн хоёр талыг массаар үржүүлж кинетик энерги рүү хувиргая } mgh = \frac{mv^2}{2}.$$

Илэрхийллийн баруун гар тал нь биеийн олж авсан кинетик энергитэй, зүүн гар тал нь хүндийн хүчний нөлөөгөөр h зайд шилжүүлэхэд хийгдсэн $A=mgh$ ажилтай тэнцүү байна. Энерги хадгалагдах хууль ёсоор энэ ажил нь биеийн потенциал энергийн хорогдсон хэмжээтэй тэнцүү байх ёстой.

Хүндийн хүчний потенциал энерги бол гравитацийн харилцан үйлчлэлийн энергийн нэг хэлбэр юм. Дэлхийн төвөөс $r = R + h$ ($R \gg h$) зайд орших m масстай биеийн гравитацийн харилцан үйлчлэлийн потенциал энерги


$$E_n = -\gamma \frac{Mm}{r}$$

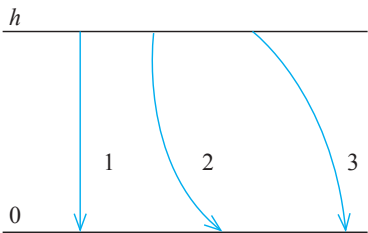
$(1+x)^n \approx 1+nx$ ($1 \gg x$) дөхөлтийг ашиглан дээрх илэрхийллийг хувиргавал

$$E_n = -\gamma \frac{Mm}{R} \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-1} \approx const + mgh$$

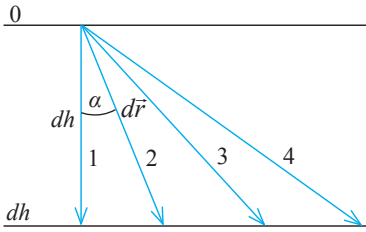
Үүний, $g = \gamma \frac{M}{R^2}$ чөлөөт уналтын хурдатгал. Энерги нь тооллын системээс хамаараад тодорхой тогтмолын нарийвчлалтай илэрхийлэгддэг хэмжигдэхүүн юм. Энергийн абсолют утга хэзээ ч хэрэглэгддэггүй, ямагт хоёр төлөвийн энергийн ялгавар хэрэглэгддэг. Энэ үед тогтмол устдаг. Иймд потенциал энергийг тодорхой цэгээс эхэлж тэг хэмээн тоолж эхэлдэг.

h өндөрт өргөгдсөн биеийн хүндийн хүчний потенциал энерги $E_n = mgh$. Хэдийгээр ингэж нэрлэж байгаа ч гэсэн энэ энергийг m масстай ганц биеийн энерги мэтээр ойлгох нь учир дутагдалтай байдаг. Энэ нь чухамдаа “дэлхий ба бие” системийн гравитацийн харилцан үйлчлэлийн энерги юм. Хүндийн хүчний хурдатгал нь дэлхийн масс ба радиусаас хамаарна. Иймд хүндийн хүчний потенциал энерги нь дэлхий ба биеийн массын үржвэрээс шууд, хоорондын зайнаас урвуу хамаарна. Таталцлын энерги сөрөг утгатай байдаг. Энэ нь таталцаж байгаа биесийг салгаж холдуулахын тулд энерги нэмж өгөх хэрэгтэй, үүний дүнд салж үйлчлэлгүй буюу тэг энергитэй болно гэсэн үг юм.

 **Дасгал** Бие h өндрөөс хүндийн хүчний үйлчлэлээр гурван өөр траектороор буужээ (Зураг 44а). Энэ үед



Зураг 44а.



Зураг 44б. Эдгээр шилжилтэд хийгдэх ажлууд тэнцүү байна.

хийсэн ажил нь траекторын хэлбэрээс хамаарах болов уу? Ажлын $A = F \cdot r \cos \alpha$ томъёо нь тогтмол хүчний үйлчлэлээр шулуун траекторын дагуу шилжилт хийхэд тохирно. Иймд муруй траекторыг хүч ба шилжилт нь тогтмол байх жижиг эгэл хэсэгт хувааж, уг жижиг хэсэгт харгалзах эгэл ажлуудыг олж нэмнэ.

Зургаас үзэхэд энэ эгэл ажил нь $\delta A = mg |d\vec{r}| \cos \alpha = mg dh$ болно.

$dh = |d\vec{r}| \cos \alpha$ катетийн хэмжээ 1, 2, 3, 4 шилжилтүүдийн хувьд ижилхэн байна. Иймд траекторын эгэл хэсгүүдэд хийгдэх эгэл ажил нь хүндийн хүч ба босоо шилжилтээр тодорхойлогдоно. h өндрөөс тэг түвшин хүртэл хийгдэх нийт ажил нь

$$A = mg \int_h^0 dh = mg(0 - h) = -mgh$$

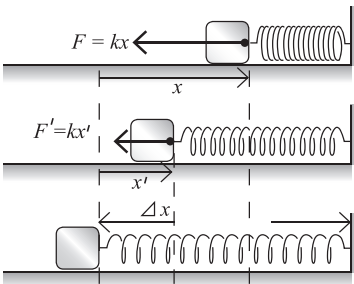
Иймд хүндийн хүчний ажил нь траекторын хэлбэрээс хамаарахгүй, зөвхөн эцсийн ба эхний төлөвийн байрлалаас хамаарна. Хүндийн хүчний ажил нь хүндийн хүчний потенциал энергийн буурсан хэмжээтэй тэнцүү байна. Энэ нь өндрөөс бие унахад потенциал энерги багасаж, тэр нь кинетик энергид хувирна гэдгийг үзүүлнэ.

Харимхайн (потенциал) энерги

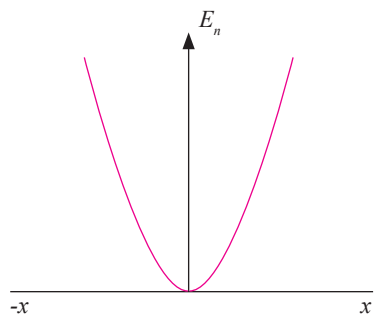
45-р зурагт үзүүлсэн биеийг пүршнээс бэхлээд анхны уртаас нь x хэмжээгээр агшаахад буцаад анхны байрлалдаа орох хүртэлх хөдөлгөөнийг бодож үзье. Биед харимхай хүч үйлчлэх учир харимхай хүч ажил хийж бие уг хүчний чиглэл дагуу шилжинэ. Үүнтэй ижлээр пүршийг x хэмжээгээр татаж сунгахад мөн л харимхай хүч ажил хийж анхны байрлалд аваачна. Тиймээс агшсан эсвэл сунгасан пүршинд энерги агуулагдаж байх нь. Энэ нь харимхай хүч үйлчилснээс болж байгаа учир харимхайн потенциал энерги гэж нэрлэгддэг. k хаттай пүрш x хэмжээгээр сунасан, эсвэл агшсан байх үед агуулагдаж

байгаа харимхайн потенциал энергийг $E_n = \frac{kx^2}{2}$ гэсэн тэгшитгэлээр илэрхийлнэ. Тиймээс x хэмжээгээр агшсан (сунасан) пүршинд агуулагдах харимхайн энерги нь буцаж анхны байрлалдаа орох хүртэл харимхай хүчний хийсэн ажилтай тэнцүү. Пүршний агшилт (суналт) x үед харимхай хүчний хэмжээ F_x бол Гукийн хуулиар $F_x = kx$ байна. Пүршийг өчүүхэн бага Δx хэмжээгээр агшаах (сунгах) үед үйлчлэх F_x харимхай хүчийг тогтмол гэж үзээд энэ хүчний хийх ажлыг 46-р зурагт үзүүлсэн харимхай хүч-суналтын диаграмм дээрх жижиг тэгш өнцөгтийн талбайгаар олж болно. Эндээс пүршний агшилт (суналт)

Траекторыг эгэл хэсгүүдэд хуваахад уг хэсэг бүр дэх ажил зөвхөн босоо шилжилтээс хамаарна.



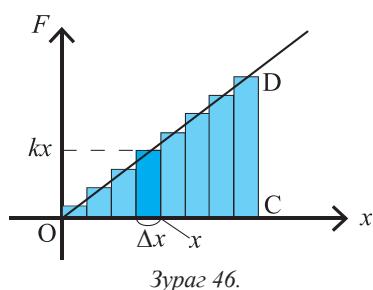
Зураг 45.



x -ээс 0 хүртэл өөрчлөгдөхөд харимхай хүчний хийх нийт ажил нь тэдгээр жижиг тэгш өнцөгтүүдийн нийт талбайгаар тодорхойлогдоно. Δx нь өчүүхэн жижиг байх үеийн хязгаарт шилжвэл хийгдэх ажил ΔOCD гурвалжны талбайгаар илэрхийлэгдэх нь харагдаж байна. Эндээс

$$E_n = \sum_{x=0}^x kx \Delta x = \frac{kx^2}{2} \text{ болно.}$$

50 Н/м хаттай пүршийг 2 см сунгасан бол хэдий хэр харимхайн потенциал энерги хуримтлагдаж байгаа вэ?



Зураг 46.

Чадал

Хэрэв бид шахуургаар ус татаж гаргах гэж байгаа бол их чадалтайг нь ашиглавал бага хугацаа зарцуулна гэдгийг мэднэ. Нэгж хугацаанд хийж байгаа ажлын хэмжээгээр тодорхойлогдох хэмжигдэхүүнийг физикт чадал гэдэг. t хугацаанд хүч A ажил хийсэн гэвэл зарцуулсан чадлыг

$$P = \frac{A}{t}$$

гэж олно. Чадалын нэгж Ватт ($1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Ж}}{\text{с}}$) – ыг хэрэглэдэг.

Ватт нь бага нэгж учир амьдралд кВт нэгжийг өргөн хэрэглэдэг. Чадал нь энергийг хувиргах хурд юм. Ихэвчлэн энерги хувиргах төхөөрөмжүүдэд хэрэглэдэг. 800 кВт ашигтай чадалтай дулааны хөдөлгүүр гэвэл 1 секундэд 800 кЖ дулааны энергийг механик энерги болгоно гэсэн утгатай.



Пүршийн харимхай хүчний потенциал энерги

$$E_n = \frac{kx^2}{2}$$



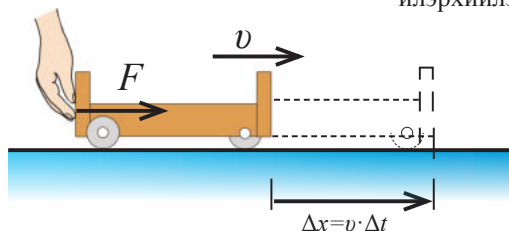
Дасгал Шахуургаар 3 м³ усыг 5 м өндөрт сорж гаргахад 10 мин зарцуулдаг. Шахуургын гаргаж байгаа чадлыг тооцоол. 1 м³ усны массыг 1000 кг гэж тооцоорой.

Чадал ба хурд

Биеийг өчүүхэн бага Δt хугацаанд тогтмол хэмжээтэй F хүчээр үйлчлэн хүчний чиглэл дагуу Δx зайд шилжүүлэхэд уг хүчний хийх ажил нь $\delta A = F \cdot \Delta x$ байна (Зураг 47). Биеийн

хурдыг v гэвэл $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ учир чадал дараах тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэнэ.

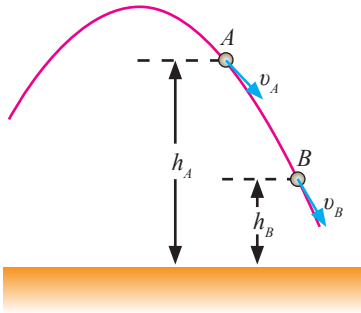
$$P = \frac{\delta A}{\Delta t} = F \frac{\Delta x}{\Delta t} = F \cdot v$$



Зураг 47.

 **Дасгал**

1. Хөдөлгүүрийн гаргаж байгаа чадал хэвээрээ байхад уулын налуу замаар өгсөж яваа машины хурд багасдаг. Яагаад ингэдэг юм бол?
2. Багануурт баригдаж байгаа цахилгаан станцын хүчин чадал 700 МВт гэсэн мэдээлэл сонинд хэвлэгджээ. Энэ юу гэсэн физик утгатай утгатай вэ?
3. Цахилгаан хөрөөг модноос холдуулахад хөдөлгүүрийн эргэлт хурдан болж байгааг дуугаар нь мэдэж болдог. Харин мод хөрөөдөх үед эргэлт нь удааширдаг. Яагаад ингэдэг юм бол?
4. Цахилгаан хөдөлгүүр эргэж байх үедээ бараг халдаггүй. Харин ямар нэг шалтгаанаар хөдөлгүүр гацаж эргэхээ болих үед хөдөлгүүрийг салгахгүй бол халж шатахад хүрдэг. Яагаад?



Зураг 48.



Бие зөвхөн хүндийн хүчний үйлчлэлээр унах үед хүндийн хүч ажил хийж, хугацаа өнгөрөхийн хэрээр потенциал энерги буурдаг ч хөдөлгөөний энерги ихсэж дүнд нь бүрэн механик энерги тогтмол хэвээр үлдэнэ. Битүү механик системийн бүрэн механик энерги хадгалагдах хэмжигдэхүүн байна.

Бүрэн механик энерги

Биеийн кинетик ба потенциал энергийн нийлбэрийг бүрэн механик энерги гэж нэрлэнэ.

Механик энерги хадгалагдах хууль

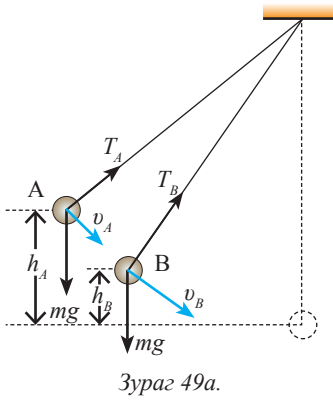
Газрын гадарга орчим шидсэн бие 48-р зурагт үзүүлсэн m масстай биеийн хөдөлгөөний явц дахь А цэгээс В цэгийн хооронд механик энергийг тооцож үзье. Хөдөлгөөний энергийн өөрчлөлт нь хийгдсэн ажилтай тэнцүү гэдгийг бид гаргасан. Тэр ёсоор энэ хоёр цэгийн хувьд дараах тэгшитгэлийг бичиж болно.

$$\frac{mv_A^2}{2} + mgh_A = \frac{mv_B^2}{2} + mgh_B$$

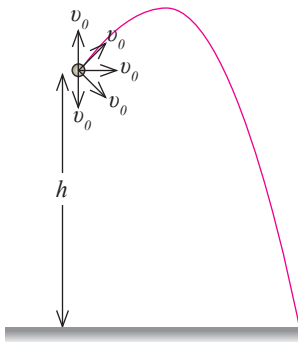
Дээрх тэгшитгэлийн зүүн гар талд бие А цэгийг дайрах агшин дахь кинетик энерги ба потенциал энергийн нийлбэр байна. Энэ нь А цэг дээрх биеийн бүрэн механик энерги гэсэн үг. Үүнтэй адилаар тэгшитгэлийн баруун талд бие В цэгийг дайрах үеийн кинетик ба потенциал энергийн нийлбэр байна. Эндээс дараах дүгнэлтийг хийж болно. Шидсэн чулууны бүрэн механик энерги хадгалагдана.

 **Дасгал**

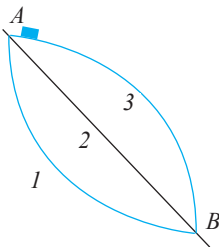
3 кг масстай чулуу 3 м өндрөөс анхны хурдгүй чөлөөтэй унав. Механик энерги хадгалагдах хуулийг ашиглан газарт хүрэх үед чулууны хурд хэд болохыг тооцоолно уу.



Зураг 49а.



Зураг 49б.



Зураг 49в.

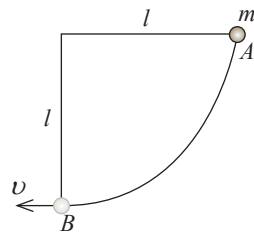
Дүүжингийн хөдөлгөөн

Утсанд зүүсэн ачаанд mg хүндийн хүчээс гадна T утасны татах хүч үйлчилнэ. Дүүжинг хазайлгаж байгаад тавихад эргээд анхны байрлалдаа буцаж ирэхийг ажиглаж болно. 49а-р зурагт үзүүлсэн дүүжингийн А цэгээс В цэг хүртэлх хөдөлгөөний явцыг ажиглавал утасны татах хүч T нь ачааны хөдөлгөөний чиглэлтэй перпендикуляр учраас ажил хийхгүй гэдгийг харж болно. Тиймээс зөвхөн хүндийн хүч ажил хийх бөгөөд унасан биеийн хөдөлгөөний явцтай адилаар дүүжин дэх ачааны бүрэн механик энерги өөрчлөгдөхгүй тогтмол хэвээр хадгалагдана гэдэг нь ойлгогдоно (энд орчны эсэргүүцэл болон үрэлтийг тооцоогүй).

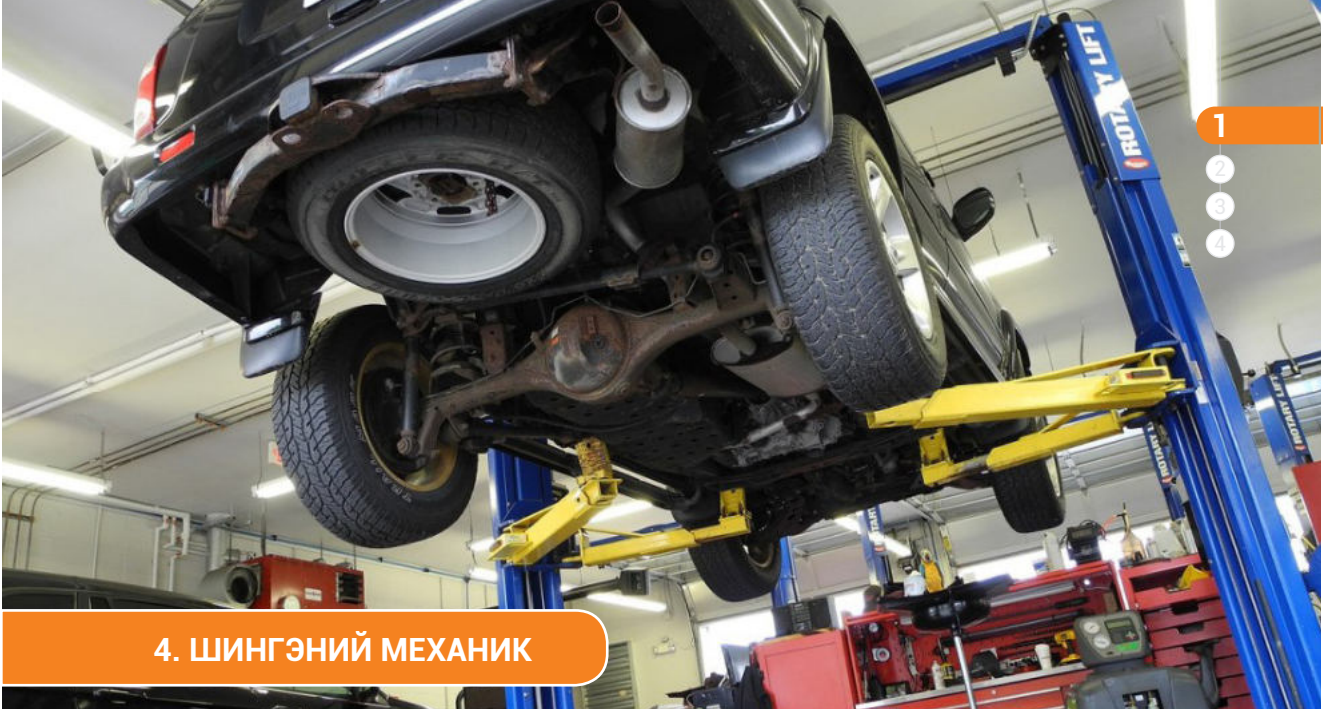
Дасгал h өндрөөс янз бүрийн чиглэлд чулууг ижилхэн анхны хурдтай шидэв. Агаарын эсэргүүцлийг тооцохгүй бол газарт хүрэх үеийн хурдны аль нь их байх вэ? (Зураг 49б).

Дасгал Биеийг А цэгээс гурван замаар гулсуулав. Бөмбөг В цэгт ирэх үед аль тохиолдлын хурд их байх вэ? Үрэлтийг тооцохгүй. В цэгт ирэх хугацаа нь ямар ялгаатай байх вэ? (Зураг 49в).

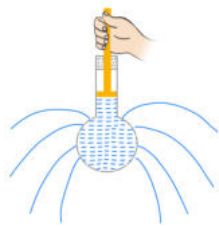
Дасгал Утсанд зүүсэн биеийг 90° өнцгөөр хазайлгаж тавив (Зураг 49г). Доод В цэгт ирэх үеийн хурд нь ямар болох вэ? Дүүжингийн урт l .



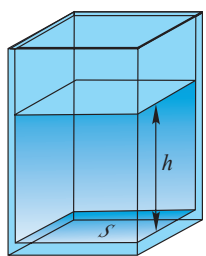
Зураг 49г.



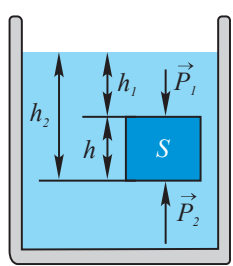
4. ШИНГЭНИЙ МЕХАНИК



Зураг 50.



Зураг 51.



Зураг 52.

Шингэнд үүсэх даралт

Шингэн даралтыг зүг бүрт ижил дамжуулна (Зураг 50). Үүнийг Паскалийн хууль гэдэг. Шингэний давхарга бүр нь доод давхаргадаа жингээрээ даралт учруулах тул шингэний гүн рүү даралт нэмэгдэнэ. Шингэний гүн дэх даралтыг тооцоолъё (Зураг 51).

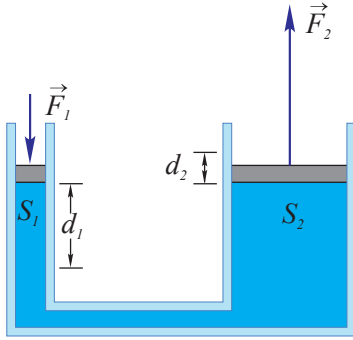
$$p = \frac{F}{S}, p = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho gh, p = \rho gh$$

Шингэний жингийн даралттай холбоотойгоор шингэн доторх биеийг өргөх хүч үүсдэг. Үүнийг Архимедийн хүч гэнэ. Шингэн дотор байгаа биеийн дээд доод талаас дарах даралтын хүчний зөрөөгөөр өргөх хүч үүснэ (Зураг 52).

$$F_A = p_2S - p_1S = \rho_y gh_2S - \rho_y gh_1S \\ = \rho_y gS(h_2 - h_1) = \rho_y gV = m_y g$$

Шингэн биеийг өргөх хүч нь түрэгдэж гарсан шингэний жинтэй тэнцүү байна. Бие шингэн дээр хөвж байхад хүндийн хүч, Архимедийн хүч хоёр тэнцэнэ.

Гидростатик парадокс. Савнуудын ёроолын талбай ижил бөгөөд хажуу ханын хэлбэр өөр байхад хийсэн шингэний түвшин ижил үед шингэний жин өөр өөр боловч савны ёроолд дарах хүч ижил байна. Энэхүү гидростатик парадоксыг салдаг ёроолтой сав ба жигнүүрээр шалгаж болдог. Шингэн даралтыг зүг бүрт дамжуулах чанар дээр үндэслэн шингэнт шахуургыг (Зураг 53) зохион бүтээсэн. Харилцах савны үүрэг гүйцэтгэх хоёр цилиндрт шингэн хийж бүлүүрүүдээр таглажээ. Шахуурга бүлүүрийн доорх даралт нь ажлын бүлүүрийн доорх даралттай тэнцүү.



Зураг 53.

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}, \quad \frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$$

Шахуурга бүлүүрийн талбай ажлын бүлүүрийн талбайгаас хичнээн дахин бага байна, хүчийг төчнөөн дахин хожно.

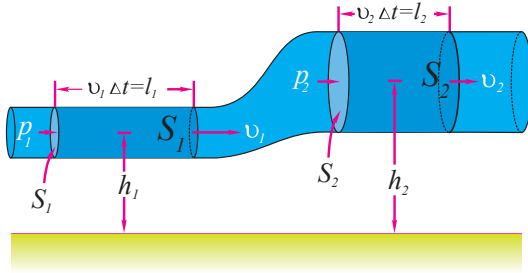
Бернуллийн тэгшитгэл

Янз бүрийн түвшинд, янз бүрийн огтлолтой хоолойгоор жигд урсах шингэний (Зураг 54) даралтуудын холбоог Бернуллийн тэгшитгэлээр илэрхийлнэ.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 = const$$

$$v_1 = v_2 = 0 \text{ үед } p_2 = p_1 + \rho g (h_1 - h_2)$$

$$h_1 = h_2 \text{ үед } p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$



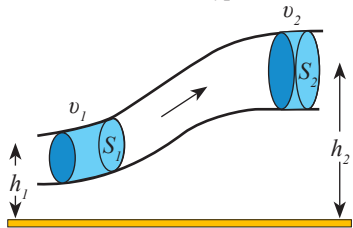
Зураг 54.

Урсгал тасралтгүйн тэгшитгэл Δt хугацаанд хоолойн нэг талаар урсаж орох шингэний эзлэхүүн нөгөө талаар урсаж гарах шингэний эзлэхүүнтэй тэнцүү (Зураг 55).

$$\Delta V = S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

Хоолойн огтлолын талбай нарийн болох тутам урсгалын хурд нэмэгддэг.



Зураг 55.

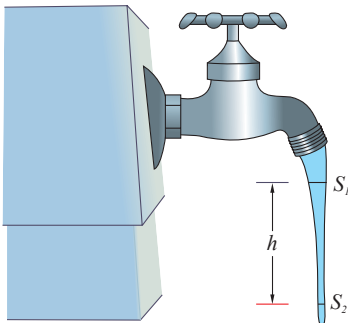
Жишээ дасгал: 56-р зурагт цоргоор гоожиж байгаа усыг харуулжээ. Дээд хэсгийн огтлолын талбай $S_1 = 1.2 \text{ см}^2$, доод хэсгийн огтлолын талбай $S_2 = 0.35 \text{ см}^2$. Усны хоёр түвшингийн хоорондох зай $h = 45 \text{ мм}$, цоргоноос ус гоожих хурд хичнээн бэ?

Бодолт

Урсгал тасралтгүйн тэгшитгэл ба чөлөөт уналтын тэгшитгэл хэрэглэе.

$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \quad v_2^2 = v_1^2 + 2gh \Rightarrow$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2ghS_2^2}{S_1^2 - S_2^2}} = 28.6 \frac{\text{см}}{\text{с}}, \quad S_1 v_1 = 34 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$$



Зураг 56.



Бүлэг 2

Молекул физик

- ▶ XVIII зууны газарзүйн их нээлт нь дулааны хөдөлгүүрийг бүтээх үйлсэд хүчтэй түлхэц болсон түүхтэй. Дулааны процесс, үзэгдлийн онол, түүнд суурилсан дулааны машины ажиллагааг асар олон бөөмөөс тогтсон макросистемийн энерги, ажил, эзлэхүүн, масс, температур зэрэг макро үзүүлэлтээр (параметрээр) тайлбарладаг термодинамик хэмээх физикийн салбар шинжлэх ухаан бүрэлдэн тогтсон билээ. XIX-XX зуунд хөгжиж ирсэн бодисын бүтцийн атом молекулын тухай сургаал нь термодинамикийн онолын суурь болсон. Ингээд термодинамик макросистемийн аливаа үзүүлэлтийг түүнийг бүрдүүлэгч атом, молекулын хөдөлгөөн, харилцан үйлчлэлээр тайлбарладаг молекул кинетик онол гарсан юм.

Эрчим хүчний үйлдвэрлэл, дэлхийн дулаарлын асуудлыг шийдвэрлэхэд термодинамикийн мэдлэг чухал төдийгүй орон байр, ахуй амьдралд холбоотой олон асуудлыг шийдвэрлэхэд нэн хэрэгтэй билээ.

Энэ бүлэгт дулааны онолын сургаал болох термодинамикийн үндсийг молекул физикийн мэдлэг, юуны өмнө бодисын бүтцийн молекул кинетик онолд тулгуурлан эхлэн судлах болно.

БҮЛГИЙН АГУУЛГА

- ▶ **1. ИДЕАЛ ХИЙ**
- 2. ТЕРМОДИНАМИК**



1. ИДЕАЛ ХИЙ

Бодит хий нь асар олон тооны бөөмөөс тогтох учир молекул бүрийн хөдөлгөөнийг нэг бүрчлэн тооцох боломжгүй.

Физик нь бодит ертөнцийг загварчлан таньж мэддэг. Үзэгдэл юмсын мөн чанарыг илтгэхүйц аль болох сайн загвар бүтээх нь чухал.

Физик загварт хамгийн гол, түгээмэл хүчин зүйлийг авч үзэн бусдыг үл тооцон орхидог.

Загварын үндсэн дээр хамгийн гол зүй тогтол, шүтэлцээг нээж тогтоодог.

Бие бөөмсөөс тогтдог

1827 онд Английн эмч, ургамал судлаач Р.Броун шингэн доторх өчүүхэн жижиг хатуу хэсгүүд (**Броуны бөөм**) тасралтгүй, эмх цэгцгүй хөдөлгөөн (**Броуны хөдөлгөөн**) хийж байдгийг микроскопоор анх ажиглаж тогтоосныг бид мэдэх билээ. Температур нэмэгдэхэд уг хөдөлгөөн улам идэвхждэг. Мөн сав доторх утааны бөөмсийн эмх цэгцгүй хөдөлгөөнийг ч микроскопоор харж болно. Энэ нь агаар бас шингэний адил бөөмсөөс тогтдог, тэдгээр нь утааны бөөмсийг тал талаас нь жигд бусаар мөргөсний үр дагавар юм (Зураг 1).

Броуны хөдөлгөөн нь бүх бие, юмс нүдэнд үл үзэгдэх маш жижиг бөөмөөс тогтдогийн нотолгоо юм. Ийм бөөмсийг атом молекул гэж нэрлэдгийг бид сайн мэднэ.

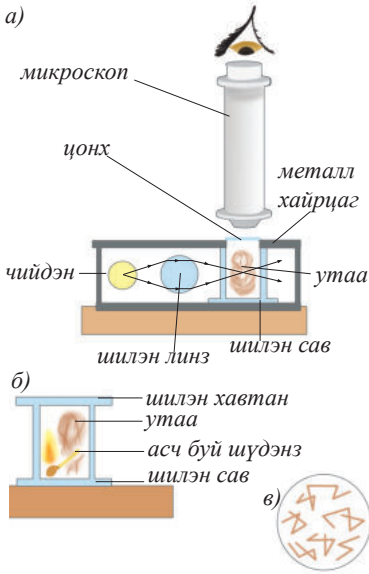
Туршлагын баримт сөхье.

Авогадрийн хууль. Хэвийн нөхцөлд (1 атм даралт, 0°C температурт) нэг моль хий 22.4 л эзлэхүүнтэй байдаг.

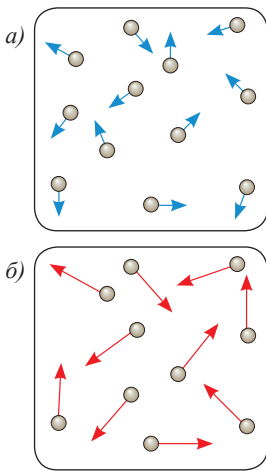
Эндээс үзэхэд молекулын бүтэц, хэлбэр хэмжээ нь ялгаатай хийнүүд савны хананд ижилхэн даралт учруулж байгааг харж болно. Иймд хийн молекулын хэлбэр хэмжээ, хоорондын таталцлыг тооцохгүйгээр, хийн молекулууд эмх замбараагүй хөдөлнө, мөргөлдөнө гэж үзэж болно. Хийн ийм загварыг **идеал хий** гэнэ.

Хийн төлөв

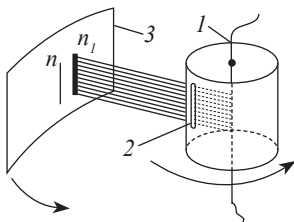
Хий ямар ч савыг дүүргэдэг. Үүгээрээ шингэн болон хатуу биеэс ялгаатай. Хий ямар ч эзлэхүүнтэй саванд даралт, температураа өөрчлөн зохицдог. Үүнийг хий тодорхой төлөвт оршин байна гэдэг. Эзлэхүүн, даралт, температур зэрэг хэмжигдэхүүнүүдийг **төлөвийн параметр** гэж



Зураг 1. Утаан дахь бөөмсийн хөдөлгөөнийг ажиглах нь



Зураг 2. Молекулын хөдөлгөөн температураас хамаарах
а) температур бага үед
б) температур их үед



Зураг 3. Штерний туршилтын схем

нэрлэнэ. Хийн нэг төлөвт түүний эзлэхүүн, температур, даралтын тодорхой утга харгалздаг. Нэг төлөвөөс нөгөө төлөвт шилжихийг процесс явагдах гэж нэрлэдэг.

Температур ба молекулын дулааны хөдөлгөөн

Бид температур их байвал молекулын хөдөлгөөний эрчим их, температур бага бол молекулын хөдөлгөөний эрчим бага байна гэдгийг мэднэ (Зураг 2). Эхний дөхөлтийн хувьд хийн молекулыг дунджаар ижил хурдтай, ижил кинетик энергитэй хөдөлнө гэж үзэж болно. Онолоор, молекулын давших хөдөлгөөний дундаж кинетик энерги нь үнэмлэхүй температуртай дараах холбоотой гэдгийг баталдаг.

$$\langle E_k \rangle = \frac{1}{2} m_0 \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} kT$$

Үүний, $\langle v^2 \rangle$ нь молекулуудын хурдны квадратын дундаж, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Ж/К нь Больцманы тогтмол.

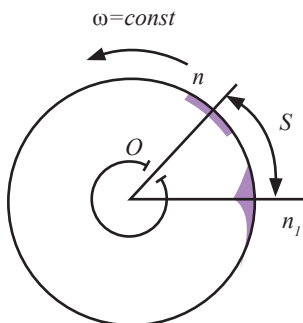
Эндээс үзэхэд, үнэмлэхүй тэг ($T=0$ К) температурт молекулын давших хөдөлгөөн зогсдог байна. Нөгөө талаас, үнэмлэхүй температур нь бөөмийн дулааны хөдөлгөөний дундаж кинетик энергиэр тодорхойлогддог байна. Хийн холимгийн хувьд молекулуудын дундаж кинетик энерги тэнцүү байна. Иймд масс ихтэй молекулууд удаан хөдөлж, масс багатай нь хурдан хөдөлдөг.

Молекулын хурдыг тодорхойлсон Штерний туршилт

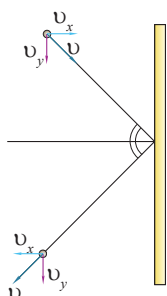
1920 онд Германы эрдэмтэн Штерн молекулын хурдыг тодорхойлох туршилт хийжээ (Зураг 3). Өндөр вакуум үүстэл агаарыг нь соруулсан 2 ба 3 цилиндрүүдийн тэнхлэг давхцах бөгөөд уг тэнхлэгийн дагуу байрлах мөнгөөр хучсан алтан утас-1 татжээ. Утсыг гүйдлээр халаахад ууршсан мөнгөний атомууд 2 цилиндрт гаргасан завсраар гарч 3 цилиндрийн дотор хананд сууна. 2 ба 3 цилиндрийг хамтад нь хөдөлгүүрийн тусламжтайгаар эргүүлнэ. Цилиндрүүдийг эргүүлээгүй үед молекулууд n зурвас үүсгэх ба цилиндруудийг эргүүлэхэд молекулууд n_1 зурвас үүсгэнэ. Штерн цилиндруудийн радиус R ба r , тэдгээрийн өнцөг хурд ω , молекулуудын зурвасын шилжилт S -ийг мэдсэнээр молекулын дундаж хурд $\langle v \rangle$ -ыг тодорхойлжээ.

$$\langle v \rangle = \frac{\omega R(R-r)}{S}$$

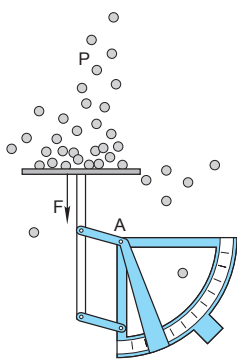
Энэ туршилтын үед хананд суусан молекулууд нь жигд бус зузаантай тодорхой өргөнтэй зурвас үүсгэж байжээ (Зураг 4). Мөнгөний зурвасын хэсэг бүрт харгалзах шилжилт өөр, өөр байгаа нь тодорхой температуртай



Зураг 4. Штерний туршилтын үед гадна талын цилиндрийн хананд суусан мөнгөний зурвасын зураг



Зураг 5. Молекул ханыг харимхай мөргөх нь



Зураг 6. Савны хананд бөөмс даралт үзүүлэх нь жингийн тавгийг хатуу бөмбөгүүд цохих үйлчлэлтэй төстэй

биеийн молекулууд нь өөр өөр хурдтай хөдөлдөг болохыг харуулж байна. Мөн гадна талын хананд суусан мөнгөний зурвасын зузаан нь жигд биш байгаа нь тухайн хурданд харгалзах молекулын тоо өөр өөр байхыг харуулж байна.

Хийн даралт ба молекулын мөргөлт

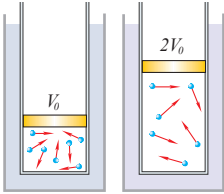
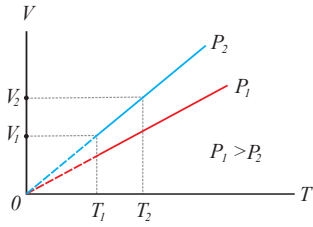
Савны хананд учруулах хийн даралт нь хийн молекулууд ханыг мөргөснөөс болж үүсдэг. Бид механикаас даралт бол нэгж талбайд үйлчлэх перпендикуляр хүчээр, харин хүч нь нэгж хугацаанд дахь хөдөлгөөний тоо хэмжээний өөрчлөлтөөр илэрхийлэгддэгийг мэднэ. Ханыг мөргөж байгаа молекул бүр тодорхой хэмжээний импульс хананд учруулна. (Зураг 5). Иймд олон молекул их хэмжээний импульс учруулна. Нэгж хугацаанд, савны хананы нэгж талбайд ирж мөргөх молекулын өгсөн нийлбэр импульстэй хийн даралт тоон утгаар тэнцүү байна. Үүнийг жингийн таваг дээр олон бөмбөлөг эгц унагахад тавагт үйлчлэх хүчтэй зүйрлэж болох юм (Зураг 6). Цай буцалгахад халсан уур савны таганд даралт учруулснаар таг өргөгдөж байдгийг бид мэднэ. Молекулын хурд нэмэгдэхэд савны ханыг мөргөх молекулын өгөх импульс нэмэгдэнэ. Хийн концентрац их бол олон молекул ханыг мөргөх учир өгөх нийлбэр импульс нь их байна. Тооцоолж үзэхэд хийн даралт нь хийн концентрац ба молекулын дундаж кинетик энергиэс шууд хамаардаг байна.

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle = nkT$$

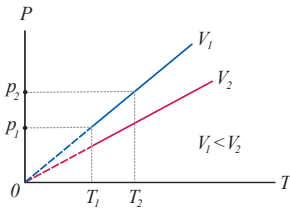
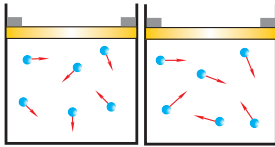
Үүнд, $n = \frac{N}{V}$ нь хийн концентрац (нэгж эзлэхүүнд оногдох молекулын тоогоор илэрхийлэгдэнэ). Дээрх илэрхийллүүдээс үзэхэд хийн температур ба даралт гэсэн хийг бүхэлд нь илэрхийлэх макро хэмжигдэхүүнүүд нь нүдэнд үл үзэгдэх молекулын хөдөлгөөнтэй холбоотой ажээ. Хийн даралт температур нь олон молекулаар дунджилсан параметрээр илэрхийлэгддэг учир нэг молекулын даралт, температур гэж ярих боломжгүй байдаг.

Идеал хийн хуулиуд

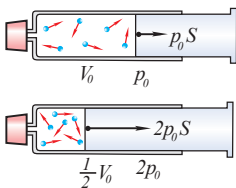
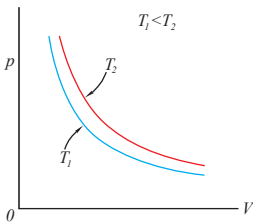
А. Тогтмол даралтад явагдах изобар процесс. Хийн даралтыг тогтмол барих хамгийн хялбар арга бол хийг босоо саванд хийж бүлүүрээр таглан дээр нь туухай тавьж, бүлүүрийг бэхлэхгүй сул орхино. Ингэхэд бүлүүрт үйлчлэх хүндийн хүч нь түүнд хийн зүгээс дээш үйлчлэх pS даралтын хүчтэй тэнцэж, бүлүүр тэнцвэрт орно. Процессын үед энэ нөхцөл өөрчлөгдөхгүй учир процесс изобар байх болно.



Зураг 7. Хийн эзлэхүүн температураас хамаарна



Зураг 8. Хийн даралт температураас хамаарна



Зураг 9. Хийн даралт эзлэхүүнээс хамаарна

Халаахад хий тэлж, бүлүүр дээш өргөгдөнө. Туршлагаас үзэхэд, өгөгдсөн хийн **даралт тогтмол** үед хийн эзлэхүүн температураас шууд пропорционал хамаардаг байна (Зураг 7).

$$p = \text{const} \text{ үед } V \sim T \Rightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Даралт тогтмол үед хийн эзлэхүүн температураас хамаарсан хамаарлын график нь координатын эхийг дайрсан шулуун байна. Хийн даралт их байвал шулууны өнцгийн коэффициент бага байна.

Б. Тогтмол эзлэхүүнтэй изохор процесс. Хийн бүлүүрийг хөдөлгөөнгүй бэхэлж эзлэхүүнийг тогтмол барина. Хийг халаахад хийн даралт нэмэгдэнэ.

$$V = \text{const} \text{ үед } p \sim T \Rightarrow \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Эзлэхүүн тогтмол үед өгөгдсөн хийн даралт температураас шууд пропорционал хамаардаг. Эзлэхүүн тогтмол үед идеал хийн даралт эзлэхүүнээс хамаарсан хамаарлын график нь координатын эхийг дайрсан шулуун байна. Хийн эзлэхүүн их байвал шулууны өнцгийн коэффициент бага байна (Зураг 8).

В. Тогтмол температурт явагдах изотерм процесс. Хийг дулаан сайн дамжуулдаг саванд хийж орчинтой дулаан солилцуулах замаар температурыг тогтмол барьж болно. Хий тэлэхэд даралт буурна. **Температур тогтмол** үед өгөгдсөн хийн даралт эзлэхүүнээс урвуу пропорционал хамаардаг.

$$T = \text{const} \text{ үед } pV = \text{const} \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Температур их бол изотерм муруй координатын эхээс хол зурагдана (Зураг 9).

Идеал хийн изопроцессын хуулиуд нь бодит хийг идеал гэсэн загвар биелэх хязгаарт хүчинтэй байна. Энд хийн температур багасахад хийн эзлэхүүн тэг болж байна. Энэ нь хийн молекулын хувийн эзлэхүүнийг тооцоогүй болохыг харуулж байна. Мэдээж хэрэг, ямар ч хий үнэмлэхүй тэг температур хүртэл хөргөхөд хий хэвээрээ орших боломжгүй, шингэн болон хатуу төлөвт шилжинэ. Иймд идеал хийн загварыг өргөтгөх шаардлагатай нь үүнээс харагдаж байна.

Идеал хийн төлөвийн тэгшитгэл

Олон тооны бөөмөөс тогтох бодисын тоо хэмжээг илэрхийлэхэд моль гэсэн нэгж хэрэглэдэг. Нэг моль хийд $N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$ (Авогадрогийн тоо гэдэг) тооны молекул оршдог. Нэг моль бодисын массыг молийн масс гэнэ. Хийн молекулын тоог Авогадрогийн тоонд харьцуулсныг молийн тоо гэнэ. Нэг молекулын массыг m_0 гэвэл хийн



Идеал хийд (масс болон молийн масс тогтмол) явагдах аливаа процессын үед даралт ба эзлэхүүний үржвэрийг температурт харьцуулсан харьцаа тогтмол байна.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Клапейрон
Менделеевийн хууль

масс $m = m_0 \cdot N$, хийн молийн масс $\mu = m_0 \cdot N_A$ болно.

$$v = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{\mu}$$

Идеал хийн изопроцессын хуулиудыг нэгтгэвэл **идеал хийн даралт эзлэхүүн хоёрын үржвэрийг температурт харьцуулсан харьцаа тогтмол** гэсэн дүгнэлтэд хүрч болно. Туршлагаас үзэхэд pV/T харьцаа нь хийн масс ба молийн массын харьцаанаас шууд пропорционал хамаардаг.

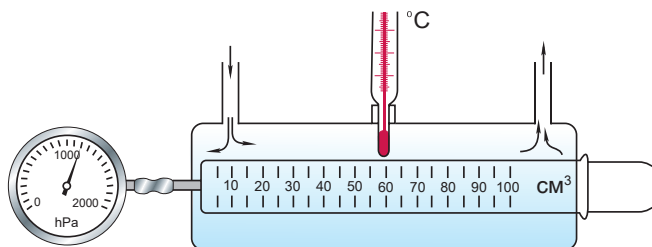
$$\frac{pV}{T} = const \Rightarrow \frac{pV}{T} = R \frac{m}{\mu}$$

Пропорционалын коэффициент R -ийг хийн түгээмэл тогтмол гэдэг. Хийн түгээмэл тогтмол нь Больцманы тогтмолыг Авогадрийн тоогоор үржүүлсэнтэй тэнцүү гэдгийг харуулж болно.

$$R = k \cdot N_A$$



Туршилт Хийн даралт, температур, эзлэхүүнийг хэмжих боломжтой багаж бэлтгэнэ. Ингээд pV/T харьцаа тогтмол байгаа эсэхийг шалгана.



Дальтоны хууль

$$P_{\text{холимог}} = p_1 + p_2 + \dots + p_N$$

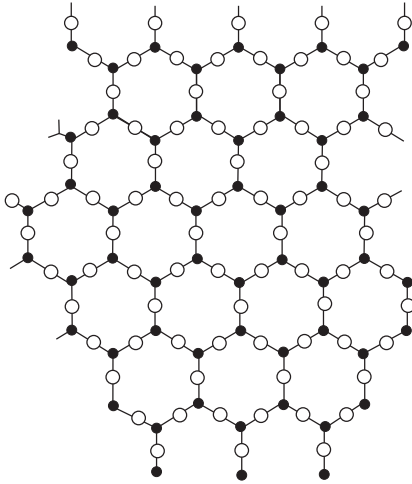


Савны хананд дарах даралт нь хий тус бүрийн парциал даралтуудын нийлбэртэй тэнцүү байна.

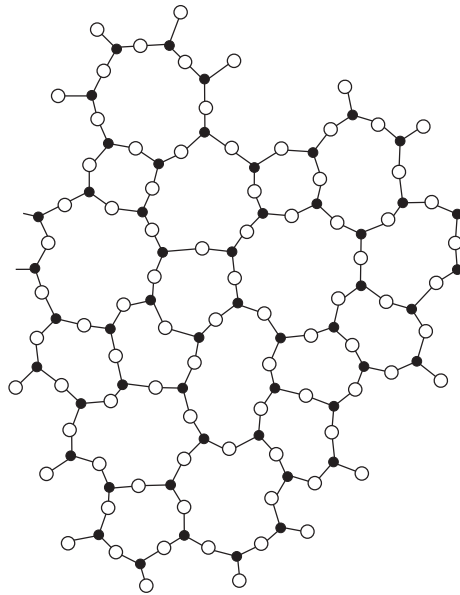
Хийн холимгийн даралт

Ихэнх тохиолдолд саванд агуулагдаж буй хий нь дан нэг төрлийн хийнээс тогтдоггүй. Жишээлбэл агаар нь азот, хүчилтөрөгч, аргон, нүүрсхүчлийн хий зэрэг хийнүүдээс тогтдог. Хольцод байгаа хий тус бүр савныхаа бүх эзлэхүүнийг дүүргэх бөгөөд мөн хий тус бүрийн температур адилхан байна. Хольцод байгаа хий тус бүрийн савны хананд учруулах даралтыг тухайн хийн парциал (хувийн) даралт гэнэ. Савны хананд дарах даралт нь хий тус бүрийн парциал (хувийн) даралтуудын нийлбэртэй тэнцүү байна.

Бодисын агрегат төлөв



*а. Болор (SiO₂)-ын талст тор
хар цэг - цахиурын атом, цагаан дугуй - хучилтөрөгчийн атом*



б. Болор шил (SiO₂)-ний аморф тор

Хатуу биеийн бүтэц

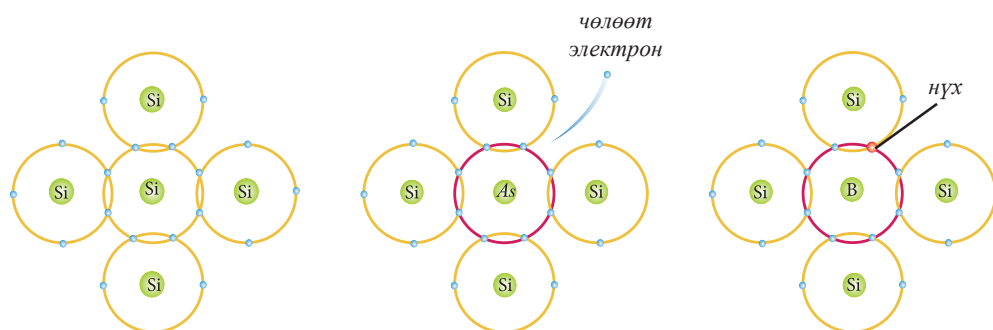
Бодис бүхэн (атом, молекул, ион) бөөмсөөс тогтох бөгөөд хий, шингэн, хатуу бие гэгдэх гурван үндсэн агрегат төлөвт оршдогийг бид мэднэ. Хий шингэний молекулууд хоорондоо холбогдоогүй байдаг учраас чөлөөтэй, эмх замбараагүй хөдөлгөөн хийж байдаг. Тэгвэл хатуу биеийг бүрдүүлж байгаа бөөмс нь бие биетэйгээ химийн холбоосоор холбогдож, тодорхой байрлалд оршин түүнийхээ орчим зөвхөн хэлбэлзэх хөдөлгөөн хийх боломжтой байдаг. Хатуу биеийг үүсгэж буй бөөмсийн харилцан байршил, хоорондоо хэрхэн холбогдсон байна гэдгээс шалтгаалан олон янзын бүтэцтэй байна. Хатуу биеийг **талст** ба **аморф** гэж хоёр том ангид хувааж болно. Талст дахь атом буюу ион нь **талст торын зангилаанд** байрладаг. Талстын атомууд их зайд эрэмбээ хадгалан яв цав үелэн байрладаг бөгөөд үүнийг **алсын эрэмбэтэй** байна гэдэг. Гэтэл аморф бие алсын эрэмбэгүй, зөвхөн **ойрын эрэмбэтэй** байна. Энэ нь аморф биеийн атом бүрийн орчимд тодорхой бүтэц хадгалагдана гэсэн үг юм. Дээрх зурагт талст болон болор шилний бүтцийн ялгааг харуулав. Бүтцийн ийм ялгаанаас болоод талст болон аморф биеийн физик шинж чанар өөр өөр болдог. Тухайлбал, талст анизотроп (шинж чанар нь чиглэлээс хамаардаг) бол аморф бие изотроп (шинж чанар нь бүх чиглэлд адилхан) байна.

Талст бүтэцтэй биеийн торын эвдрэл

Яг нарийн тэгш хэмтэй, яв цав үелсэн бүтэцтэй огторгуйт тор бол талст бодисын атом бүтцийн идеал загвар юм. Бодит талстууд ямагт согогтой (эвдрэлтэй), өөрөөр хэлбэл, идеал загвараас гажсан бүтэцтэй байдаг. Талст бүтцийн согогийн хамгийн энгийн төрөл бол цэгэн согог юм. Талстын огторгуйт торны зангилаан дээр орших аль нэг атомын оронд гадны хольц болох элементийн атом байрших, огторгуйт торны зангилаан дахь атом хоорондын хоосон зайд шургаж орсон хольц болох атом, зангилаан дахь атом байхгүй байх (үүнийг ваканс гэж нэрлэдэг) зэрэг бол цэгэн эвдрэлийн жишээ юм.

Хагас дамжуулагч цахиурын талст торын цахиурын атомын оронд суусан (донор хольц гэж нэрлэгддэг) арсений атом нэг электроноо талст торонд өгч түүнийг n төрлийн цахилгаан дамжуулалтай болгодог бол акцептор хольц болох борын атом талст торноос нэг электрон авч p төрлийн буюу нүхэн дамжуулалтай болдгийг бид мэдэх билээ.

Талст тор дахь цахиурын атом хамгийн ойрын хөрш 4 цахиурын атомтайгаа ковалент холбоос үүсгэдгийг хавтгай дээр дүрслэн үзүүлэв. Дараах зурагт уг цахиурын атомыг арсений (As) болон бор (B)-ын атом халж цэгэн согог үүсгэж байгааг харуулав.



Нэмэлт

Молекул кинетик онолын үндэслэлүүд

1. Аливаа бие бөөмсөөс (атом, молекул) тогтоно.

Тайлбар 1: Нэг моль бодист $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ тооны бөөмс (атом, молекул) байдаг. Авогадрийн тоо нь систем (макро биес) асар олон тооны бөөмсийн (атом, молекул) нэгдэл гэдгийг илтгэдэг, макро хэмжигдэхүүн ба микро хэмжигдэхүүний холбоог тогтоодог томьёонд “зуучлагч” үүрэгтэй ордог чухал физик хэмжигдэхүүн юм. Италийн эрдэмтэн А.Авогадро өөрийн хуулиа (1811 он) нээж, Францын Ж.Перрен (1912 он) туршлагаар нотолсон.

2. Биеийг бүрдүүлэгч бөөмс тасралтгүй дулааны эмх замбараагүй (эмх цэгцгүй) хөдөлгөөн хийдэг.

Тайлбар 2: Бөөмс хөдлөх хурдны чиглэл нь агшин бүрт санамсаргүй байдлаар өөрчлөгддөг онцлогийг илэрхийлж хөдөлгөөн гэдэг үгийн өмнө “дулааны эмх замбараагүй” гэсэн угтвар хэрэглэдэг.

Дулааны хөдөлгөөний шинж төрх юунаас хамаардаг вэ? Бөөмсийн харилцан үйлчлэлээс хамаардаг. Агрегат төлөвийн хувирал, шилжилтээс хамаарч өөрчлөгддөг. Хөдөлгөөний энерги системийн температураас шууд хамаардаг. Дулааны хөдөлгөөний шинж төрхийг шууд ажиглан, тооцоолж нотолсон анхдагч туршилтуудыг нэрлэе.

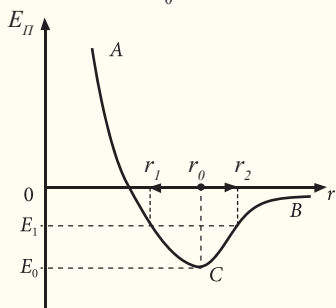
1827 онд Британы ургамал зүйч Роберт Броун усанд хөвсөн цэцгийн тоосонцрыг микроскопоор ажиглаж ус тогтонги байсан ч тоосонцор зогсолтгүй, эрэмбэгүй тахирласан траектороор хөдөлж байгааг илрүүлжээ. Энэ эмх замбараагүй хөдөлгөөнийг хожим Броуны хөдөлгөөн гэх болов. Броуны хөдөлгөөн нь усны молекулуудын хөдөлгөөн дулааны эмх замбараагүй шинжтэйн тусгал байжээ.

1905 онд А.Эйнштейн молекул кинетик онолд суурилсан тооцоо хийж молекулын хэмжээг ойролцоогоор $\sim 10^{-10}$ м гэж гаргасан нь чухал баталгаа болов.

3. Биеийн бөөмс (атом, молекулууд) таталцаж түлхэлцэн харилцан үйлчилж байдаг.

Тайлбар 3: Бөөмсийн харилцан үйлчлэлийг цахилгаан соронзон хүч хэрэгжүүлнэ. Харилцан үйлчлэлийн $E_{\text{П}}$ -потенциал энерги бөөмс ойртох зайнаас хамаарах онцлогийг графикаар харуулжээ. Зургийг ажиглаж, тайлбар уншаарай. Зургаас дараах зүйлийг илрүүлж болно.

1. Потенциал энерги хамгийн бага E_0 сөрөг утгатай байх r_0 зайд бөөмс түлхэлцэх ба таталцах хүч тэнцэнэ.
2. Бөөмс $r < r_0$ зайд ойртож эхэлмэгц хоёр бөөм бие биеэ түлхэх хүч давамгайлна. (СА муруй түлхэх хүчний өсөх онцлогийг илэрхийлнэ.)
3. Бөөмс $r > r_0$ зайд холдож эхэлмэгц хоёр бөөм бие биеэ татах хүч давамгайлна.



Зураг. $E_{\text{П}}(r)$ хамаарлын график

(СВ-муруй татах хүч өсөх онцлогийг илэрхийлнэ)
Потенциал энерги $E_0 < E_1 < 0$ байх E_1 утгад бөөмс $r_1 < r < r_2$ завсарт өөрөөр хэлбэл, r_0 тэнцвэрт зайнаас бага r_1 ба их r_2 зайн дахь цэгүүдийн хооронд тогтвортой хэлбэлзэх хөдөлгөөн хийнэ. Бөөмс ийм тогтвортой төлөвт байхад бие хатуу төлөвт ордог. Молекул кинетик онолын үндэслэлд суурилан бодисын ерөнхий загвар (бодисыг ойлгох ерөнхий төсөөлөл) боловсруулдаг.

Молекул кинетик загвар. Бодисыг дулааны эмх замбараагүй хөдөлгөөнтэй, харилцан үйлчлэлцэгч бөөмсийн (атом, молекул) нэгдэл гэж үздэг. Үүнийг

бодисын молекул кинетик загвар гэж товчлон нэрлэдэг.

Бодисын макро төлөв. Бодисыг бүхэлд нь тодорхойлдог, туршлагаар шууд хэмжиж, хүртэж мэдэрч болдог хэмжигдэхүүний нэгдлээр илэрхийлнэ.

Жишээ нь: Хийн төлөвийг даралт p , эзлэхүүн V , масс m , нэг моль хийн масс буюу моль масс μ зэрэг макро шинж чанарууд тодорхойлдог учраас эдгээр макро хэмжигдэхүүнийг төлөвийн параметрууд гэдэг.

Бодисын микро төлөв. Бодисыг бүрдүүлэгч микро бөөмсийн шинж чанарыг тодорхойлдог, шууд мэдрэх боломжгүй микро (молекулын диаметр, масс, кинетик ба харилцан үйлчлэлийн потенциал энерги, хөдөлгөөний тоо хэмжээ гэх мэт) хэмжигдэхүүний нэгдлээр илэрхийлнэ.

Молекул кинетик онолын үндсэн томъёо ба тэгшитгэл. Молекул кинетик онолын үндэслэл, кинетик загвар, тооцоолох арга ашиглан гаргасан хоёр шүтэлцээг сонгож тайлбарлая.

1. Бөөмсийн эмх замбараагүй давших хөдөлгөөний дундаж кинетик энерги $\langle E_k \rangle$

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \left(\frac{R}{N_A} \right) T = \frac{m_0 \cdot \langle v^2 \rangle}{2}$$

Хурдны квадратын дундаж $\langle v^2 \rangle$ ба дундаж кинетик энерги $\langle E_k \rangle$, бөөмийн масс m_0 нь нэг бөөмд оногдох микро хэмжигдэхүүн, T нь системийн төлөвийн параметр болох макро хэмжигдэхүүн, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Ж/К нь Больцманы тогтмол, $R = 8.31$ Ж/К·моль нь хийн түгээмэл тогтмол. Абсолют температур нь молекулын дундаж кинетик

энергээр илэрхийлэгддэг болох нь дээрх томъёоноос харагдаж байна.

Биеийн температур. Молекулуудын дулааны эмх замбараагүй хөдөлгөөний дундаж кинетик энергийн хэмжүүр.

2. *Идеал хийн даралт.* Молекул кинетик онолын үндэслэл, кинетик загвар, хөдөлгөөний тоо хэмжээ хадгалагдах хууль, Ньютоны II хууль, даралтын тодорхойлолт ашиглан молекул кинетик онолын үндсэн тэгшитгэлийг гаргадаг.

$$p = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot \langle v^2 \rangle = \frac{2}{3} n \cdot \langle E_k \rangle$$

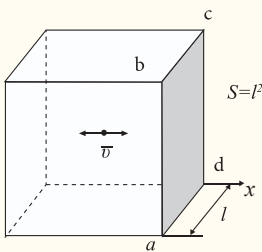
Энэ тэгшитгэл нь макро хэмжигдэхүүн концентрац n , даралт p (бөөмсийн тоо, харилцан үйлчлэлийн макро илрэлүүд) ба бөөмийн масс m_0 , хурд v , энерги $\langle E_k \rangle$ зэрэг микро хэмжигдэхүүний (бөөмсийн дулааны эмх замбараагүй хөдөлгөөний илрэл) холбоог тогтоодог. Иймд тулгуур гурван үндэслэл агуулсан учраас молекул кинетик онолын үндсэн тэгшитгэл гэдэг. Энэ томъёоноос идеал хийн төлөвийн тэгшитгэл шууд гардаг.

$$p = n \cdot k \cdot T$$

Томъёоны хялбаршуулсан гаргалгаа хийх үйлдэл сунжруу мэт боловч өөрийгөө дайчлан үр дүнд хүрвээс итгэл үнэмшил төрүүлдэг тооцооны болон загварчлалын аргад сургадаг ач холбогдолтойг санаарай. Механикт биеийн хэлбэр, хэмжээ, деформац зэрэг олон шинжийг орхиж давших хөдөлгөөнийг судлахад зайлшгүй хэрэгтэй массыг сонгож үлдээн “материал цэг” хэмээх загвар хэрэглэдэг. Бодисын микро шинж чанарыг молекул кинетик онолын кинетик загвараар судлахад хамгийн тохиромжтой, хялбар, ерөнхий загвар бол идеал хий юм.

Идеал хий-дулааны хөдөлгөөн хийдэг, уян харимхай мөргөлтөд санамсаргүй ордог бөөмсийн (материал цэгүүдийн) систем.

Идеал хийн молекул кинетик онолын үндсэн тэгшитгэл ба төлөвийн тэгшитгэл (Менделеев-Клапейроны тэгшитгэл) гаргацгаая.



l -урт ирмэгтэй $V = l^3$ эзлэхүүнтэй шоо саванд ижилхэн m_0 масстай, N тооны молекул бүхий идеал хий байгаа гэе. Эхлээд нэг молекулын хөдөлгөөн сонгоё (Зураг). Молекул $S = l^2$ талбайтай $abcd$ талд тусаж уян харимхай мөргөн ойход түүний x тэнхлэгийн дагуух v_x хурдны чиг эсрэгээр өөрчлөгдөнө. Молекул ханыг нэг удаа мөргөхөд хөдөлгөөний тоо хэмжээний өөрчлөлт

$$\Delta p = m_0 \cdot v_x - (-m_0 \cdot v_x) = 2m_0 \cdot v_x$$

хоёр хананы хооронд хөдөлсөн молекулын туулах зам нь $2l$ ба хугацаа $\Delta t = \frac{2l}{v_x}$;

Ханыг нэг молекул мөргөж үйлчлэх дундаж хүч

$$\langle f \rangle = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2m_0 \cdot v_x}{2l/v_x} = \frac{m_0 \cdot v_x^2}{l}$$

Бүх молекулын $abcd$ хананд үйлчлэх даралтын хүч

$$F = \sum \langle f_i \rangle = \sum \frac{m_0 \cdot v_{i,x}^2}{l} = \frac{Nm_0 \cdot \langle v_x^2 \rangle}{l}$$

Хананд үйлчлэх даралт

$$\sum v_{i,x}^2 = v_{1,x}^2 + v_{2,x}^2 + \dots + v_{N,x}^2 = N \cdot \langle v_x^2 \rangle$$

$$p = \frac{F}{l^2} = \frac{Nm_0 \cdot \langle v_x^2 \rangle}{l^3} = \frac{Nm_0 \cdot \langle v_x^2 \rangle}{V}$$

Маш олон бөөмсөөс тогтсон систем учир “материал” цэг болох нэг бөөмтэй зүйрлэжгүй нарийн нийлмэл загвар. Санамсаргүйн (эмх замбараагүй) хууль үйлчлэх учраас физик хэмжигдэхүүний дундаж утгуудыг тодорхойлно. Ердийн нөхцөлд ориших хийд идеал нөхцөл биелэх учраас идеал хийн кинетик загвар ашиглан практикт хэрэгтэй хууль, харьцаа, дүгнэлтүүд гардаг.

Үүнд $\langle v_x^2 \rangle$ нь молекулуудын х тэнхлэгийн дагуух хурдны квадратын дундаж.

Молекулууд х, у, z тэнхлэгийн дагуу хөдлөх боломжтой. Биеийн хурдны хэмжээ нь тэнхлэгүүдийн дагуух хурднуудын хэмжээнээс дараах байдлаар тодорхойлогддог.

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

Иймд молекулын хурдны квадратын дундаж нь х, у, z тэнхлэгийн дагуух хурдны квадратын дундажуудын нийлбэртэй тэнцүү.

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$$

Чөлөөт идеал хийн хувьд бүх чиглэл тэгш хэмтэй учир

$$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle = \frac{\langle v^2 \rangle}{3}$$

байна. Үүнийг тооцон хийн хананд учруулах даралтыг молекулын хурдны квадратын дундаж утга болон дундаж кинетик энергиэр илэрхийлбэл

$$p = \frac{N}{V} \cdot \frac{m_0 \cdot \langle v^2 \rangle}{3} = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$$

Үүний $n = \frac{N}{V}$ нь хийн концентрац.

Ийнхүү молекул кинетик онолын үндсэн тэгшитгэл гарав.

$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$ томъёог харьцуулах аргаар гаргадаг. Хийн туршилтын хуулиудаас (Бойль-Мариотт, Гей-Люссак) Менделеев-Клапейроны тэгшитгэл гардаг.

$$pV = N \frac{R}{N_A} T = NkT$$

Молекул кинетик онолын үндсэн тэгшитгэлийг $pV = \frac{2}{3} N \langle E_k \rangle$ тэгшитгэлтэй харьцуулбал молекулын хөдөлгөөний дундаж кинетик энерги ба температурын холбоо гарах ба улмаар молекулын дундаж хурд ба температурын холбоог тодорхойлж болно.

$$NkT = \frac{2}{3} N \langle E_k \rangle \Rightarrow \langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT = \frac{m_0 \cdot \langle v^2 \rangle}{2} \Rightarrow \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

Идеал хийн төлөвийн тэгшитгэлийг дараах байдлаар бичиж болно.

$$pV = \nu RT = \frac{m}{\mu} RT = \frac{N}{N_A} RT$$

Мөн хийн төлөвийн тэгшитгэлийн дараах хэлбэрүүдийг задгай хийн хувьд хэрэглэхэд

тохиромжтой байдаг.

$$p = nkT$$

$$p = \frac{m}{V\mu} RT = \frac{\rho}{\mu} RT$$

Өгөгдсөн масстай хийн хувьд $m = const$ болон $\mu = const$ байх тул

$$\frac{pV}{T} = const \Rightarrow \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Энэ тэгшитгэлийг Клапейроны тэгшитгэл гэж нэрлэдэг. Хийн хольцын даралтыг тодорхойлох Дальтоны хуулийг идеал хийн төлөвийн тэгшитгэлийг ашиглан гаргаж болно. n өөр өөр хийнээс тогтох хийн хольц авч үзье. Саванд байгаа бүх хий бүгд ижилхэн температуртай байх ба мөн бүх хий агуулж байгаа савныхаа эзлэхүүнийг дүүргэн оршино. Саванд байгаа хийнүүдийн хувьд идеал хийн төлөвийн тэгшитгэлийг бичин тэдгээрийг нэмж хийн хольцын даралтыг тодорхойлно.

$$p_i \cdot V = \nu_i \cdot RT$$

$$(p_1 + \dots + p_n) V = (\nu_1 + \dots + \nu_n) RT = \nu RT = pV \Rightarrow$$

$$p = p_1 + \dots + p_n$$

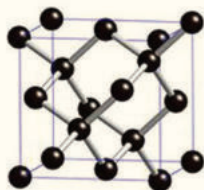
Молекулын дулааны хөдөлгөөний дундаж кинетик энерги ба абсолют температурын хоорондын хамаарлаас харвал молекулын хөдөлгөөн зогсвол $\langle v^2 \rangle = 0$ болох учир $\langle E_k \rangle = 0$ ба улмаар $T=0$ К болно. Иймд молекулын хөдөлгөөн зогсох температурыг абсолют тэг температур гэдэг.

Бодисын агрегат төлөвийн онцлог шинж

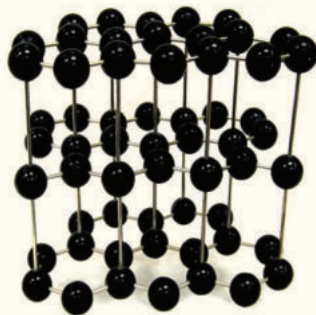
А. Хатуу бие

Хатуу биеийг талст ба аморф гэж ялгадаг.

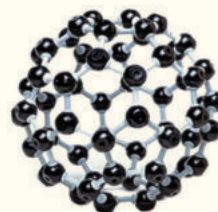
1. Талстын-атом, молекулууд нь эзлэхүүнийхээ бүх хэсэгт чанд дараалалтай, жигд “алсын эрэмбэтэй” байрладаг. Алсын эрэмбэтэй тогтоцыг *талстын тор*, бөөмс тогтвортой байрлах төвүүдийг *торын зангилаа* гэнэ. Хоолны давс, сахар, металлууд талст бүтэцтэй. Нүүрстөрөгч нь хэд хэдэн талст төлөвт оршино: алмаз, бал чулуу, фулерен гэх мэт.



а. Алмаз



б. Бал чулуу



в. Фулерен

Талстын онцлог шинжүүд

- а. Геометрийн тэгш хэмт тогтоцтой, өөрийн эзлэхүүнтэй.
 - б. Тодорхой температуртай болмогц хайлдаг. Энэ температурыг хайлах цэг гэнэ.
 - в. Анизотроп чанартай: шинж чанар нь (механик, цахилгаан, соронзон, дулаан тэлэлт) чиглэл бүрт өөр байдаг.
 - г. Хоорондоо аяндаа холилдоггүй.
2. Аморф бие-атом, молекулууд нь тэнцвэрт байрлалын орчимд зүй тогтолт байршилтай, “*ойрын эрэмбэтэй*”, эзлэхүүний бүх хэсэгт алсын эрэмбэ алдагдсан тогтоцтой. Ийм тогтоцын улмаас талстаас ялгагдах онцлогуудтай
- а. изотроп чанартай: физик шинжүүд чиглэл бүрт ижилхэн;
 - б. хайлах тодорхой цэг байхгүй;
 - в. температур өсөхөд урсамтгай буюу шингэний шинж төрхтэй болдог. Шил, пластмасс, лааны тос, давирхай зэрэг нь аморф хатуу биес юм.

Б. Шингэний онцлог шинжүүд

- а. Өөрийн эзлэхүүн ба нягттай, бараг шахагдахгүй (энэ талаараа хатуу биетэй төстэй).
- б. Өөрийн хэлбэр дүрсгүй, агуулсан савны хэлбэрийг даган давтдаг (хийтэй төстэй).
- в. Урсамтгай (хийтэй төстэй).
- г. Зарим шингэн хоорондоо холилдоно, зарим нь холилдоггүй олон янз. Шингэн (ус) амьд организм оршин тогтнох эх сурвалж, ахуй амьдрал, техник хэрэглээнд онцгой үүрэгтэй.

В. Хийн онцлог шинжүүд

- а. Тогтсон эзлэхүүн хэлбэргүй, агуулсан орчны бүх хэсэгт тардаг (хатуу бие, шингэнээс ялгаатай).
- б. Урсамтгай (шингэнтэй төстэй).
- в. Хоорондоо ямар ч харьцаагаар холилдог.

Г. Плазмын онцлог шинжүүд

- а. Плазм нь цахилгаан цэнэгтэй (эерэг, сөрөг ионууд, электронууд) ба цэнэггүй (атом, молекулууд) бөөмсийн систем. Эерэг цэнэгүүдийн нийт хэмжээ сөрөг цэнэгүүдийн нийт хэмжээтэй тэнцүү учраас плазм бүхэлдээ цахилгаан саармаг байна.
 - б. Плазмын бөөмс чөлөөтэй хөдлөх учраас (хийтэй төсөөтэй) тогтсон хэлбэр, хэмжээгүй.
 - в. Урсамтгай.
 - г. Плазмд цэнэгүүдийн үүсгэх цахилгаан ба соронзон орон байдаг учраас бөөмс эдгээр оронтой харилцан үйлчилж цацрал гаргаж байдаг.
 - д. Гадаад орчны цахилгаан ба соронзон оронтой харилцан, улмаас (цацрагийн бүсүүд, туйлын туяа зэрэг) янз бүрийн үзэгдэл дагуулдаг.
- Орчлонгийн бүх бодисын 99.9% плазм байдаг. Аянга цахилгаан, лааны дөл, түймрийн гал, зууханд дүрэлзэж байгаа гал, Нар, одод, мананцар, амьд организмын доторх электролит шингэн бүгд плазм мөн. Бодисын агрегат төлөвүүдийн молекул

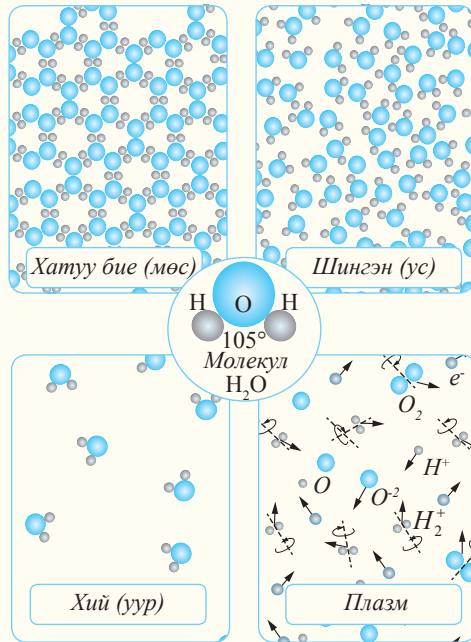
кинетик онолын тайлбарыг эмхэтгэн хүснэгтэд багцлав. Молекул кинетик онол яаж тайлбарлаж байгааг анхааралтай шинжээрэй.

Хүснэгт

Харьцуулах үзүүлэлт	Бодисын агрегат төлөв		
	Хий	Шингэн	Хатуу бие
Атом, молекулуудын байрлал	Бөөмсийн түгэлт эрэмбэгүй, нягт нь агуулсан савны эзлэхүүнээс хамаарна.	Бөөмсийн түгэлт ойрын эрэмбэтэй, тогтмол нягттай.	Бөөмсийн байрлал алсын юм уу ойрын эрэмбэтэй тогтмол нягттай.
Молекулуудын хоорондох дундаж зай	Нягтаас хамаарч янз бүр, хамгийн бага зай: ~3.3 нм	Бага (0.2-0.3) нм	Маш бага ~0.1-0.2 нм
Молекулуудын харилцан үйлчлэх хүч	Маш бага, зөвхөн мөргөлдөх үед илэрнэ.	Хатуу биеийн бөөмсийн харилцан үйлчлэлээс бага, шингэн эзлэхүүнээ хадгалах шалтгаан болдог.	Маш их, хатуу бие хэлбэр ба эзлэхүүнээ хадгалах шалтгаан болдог.
Бөөмсийн дулааны эмх замбараагүй хөдөлгөөний дундаж кинетик энерги ба харилцан үйлчлэлийн потенциал энергийн харьцаа	$\langle E_k \rangle \gg E_{\Pi}$ бөөмсийн хоорондох зай их учраас E_{Π} бага, $\langle E_k \rangle$ их	$\langle E_k \rangle \sim E_{\Pi}$ $\langle E_k \rangle$ дундаж кинетик энерги ба харилцан үйлчлэлийн E_{Π} энерги ойролцоо учраас зөвхөн ойрын эрэмбэ хадгалагдана.	$\langle E_k \rangle \ll E_{\Pi}$ Харилцан үйлчлэлийн E_{Π} потенциал энерги маш их учраас алсын эрэмбэ хадгалагдана. Деформац (хэв гажилт) нь харимхайн шалтгаан болдог.
Бөөмсийн дулааны эмх замбараагүй хөдөлгөөний онцлог төрх	Эмх цэгцгүй давших хөдөлгөөн хийж, уян харимхай мөргөлдөж байдаг. Броуны хөдөлгөөн хийдэг.	Тогтворгүй, тэнцвэрийн орчимд эргэх хэлбэлзэх хөдөлгөөн хийх боловч тэнцвэрийн байрлалаас амархан гарч өөр тэнцвэрт байрлалд шилжин үсчиг байдаг.	Талст торын зангилаа буюу тогтвортой тэнцвэрийн орчим эмх замбараагүй хэлбэлзэх хөдөлгөөн хийдэг.
Хөдөлгөөний дүрслэл			

Усны агрегат төлөвүүдийн молекул-кинетик загварын дүрслэлийг зурагт харуулав. Ажиглаж асуултад хариулан тайлбар бичээрэй. Усны онцлогийн талаар бичсэн материал судалж өгүүлэл бичвээс амжилт олно.

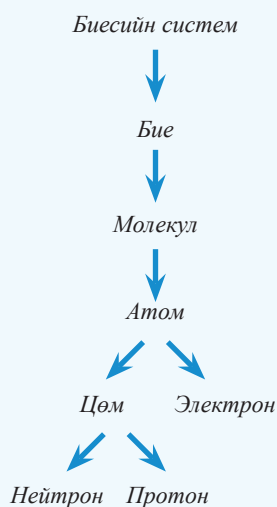
- Зурагт усны ямар агрегат төлөвүүдийг дүрсэлсэн бэ?
- Усны молекул ямар бөөмсөөс бүтсэн бэ? Усны моль масс хэд вэ?
- Усны молекул агрегат төлөвүүдэд ялгаатай дулааны хөдөлгөөн хийдэг. Ямар хөдөлгөөнүүд байх вэ? Дүрслэн зурж тайлбар хийгээрэй.
- Усны агрегат төлөв бүхэнд E_{Π} ба $\langle E_K \rangle$ -ийн харьцаа ямар байх вэ?
- Молекулын харилцан үйлчлэлийн E_{Π} потенциал энерги молекул хоорондох зайнаас хамаарах графикийг $E_{\Pi} \sim r$ диаграммд зураарай. Зураг дээр E_{Π} ямар утгатай байвал хатуу, шингэн, хийн (уур) төлөвт орохыг зурж гэмдэглээрэй.



- Өвөл нуур, цөөрөм, гол, мөрөн хөлдөхөд дээд талд нь мөс, доод талд нь ус байдгийн учир юу вэ? Загас жараахай, замаг ургамлын амьдрал хэвийн үргэлжлэх физик нөхцөл юу вэ? Мөс уснаас нягт багатай байдаг. Учир нь юу вэ?
- Цасан ширхэг 6 өнцөгт хэлбэртэй байдаг. Үүнийг усны молекулын геометр бүтэцтэй холбоотой гэдэг. Энэ ямар учиртай талаар хэлэлцэнэ үү.



2. ТЕРМОДИНАМИК



Физикт энергийн үнэмлэхүй утга ашиглагддаггүй, харин эцсийн ба эхний төлөвийн энергийн зөрөө хэрэглэгддэг.

Дотоод энерги

Бие молекулуудаас, молекул нь атомуудаас, атом нь электронууд ба цөмөөс, цөм нь протон, нейтроноос тогтдог гэдгийг бид мэднэ. Бодисын зохион байгуулалтын энэ бүх түвшний бөөмс тодорхой хөдөлгөөн хийж байдаг, мөн хоорондоо харилцан үйлчилж байдаг. Тухайлбал, атомын доторх электронууд хөдөлж байдаг, мөн электронууд хоорондоо түлхэлцэж, цөмтэйгээ таталцаж байдаг. Харин молекул дахь атомууд хэлбэлзэх хөдөлгөөн хийж өөр хоорондоо ойртвол түлхэлцэж, холдвол таталцдаг. Молекул эмх замбараагүй давших болон эргэх хөдөлгөөн хийхийн зэрэгцээ, хоорондоо үйлчилж байдаг. Бие бүхэлдээ хөдөлж, бусад биесийн үйлчлэл доор оршин байдаг. Энэ бүх хөдөлгөөн болон харилцан үйлчлэлийг энерги гэсэн хэмжигдэхүүний тусламжтайгаар илэрхийлж болно. Ерөнхий тохиолдолд, биесийн дотоод энерги гэж биесийн бүрэлдэхүүний бүх түвшний энергийн нийлбэрийг ойлгодог. Ихэнх процесст атом молекулуудын химийн болон цөмийн холбоос энерги өөрчлөгдөхгүй тул дотоод энергид дулааны хөдөлгөөний энергийг авч тооцдог. Харин хийг хэдэн мянган градус хүртэл халаахад молекул диссоциацлагдаж, улмаар атом иончлогдох тул молекулын болон атомын түвшний энергид өөрчлөлт орно. Химийн урвалын үед атом молекулын түвшний энергид өөрчлөлт ордог, харин цөмийн түвшинд өөрчлөлт ордоггүй. Нарны төвд хэдэн сая градусын халуунд цөмийн урвал явагдаж байдаг. Энэ нөхцөлд цөмийн түвшний энергид хувирал явагдана. Иймд системийн дотоод энерги гэдэгт тухайн процессын үед өөрчлөгдөж байгаа энергийн тэрхүү хэсгийг ойлгодог.

Бодит хийн хувьд молекулуудын харилцан байршлаас хамаарсан харилцан үйлчлэлийн энерги бага боловч нөлөөтэй байдаг учир тооцдог.

Шингэний бөөмс давших, хэлбэлзэх хөдөлгөөн голлон хийдэг бол хатуу биеийн бөөмс хэлбэлзэх хөдөлгөөн хийдэг. Шингэн ба хатуу биеийн хувьд тэдгээрийг бүрдүүлэгч бөөмсийн байршлаас хамаарсан харилцан үйлчлэлийн энерги хөдөлгөөний энергийн нэгэн адил онцгой үүрэгтэй байна.

Идеал хийн дотоод энерги

Хийн "идеал" гэсэн загварчлалын хүрээнд молекулууд дулааны хөдөлгөөн хийдэг, өөр хоорондоо болон савны ханатай харимхай мөргөлдөөн хийнэ гэж үздэг. Иймд молекулуудын харилцан байршлын энерги тооцогдохгүй учраас дотоод энерги зөвхөн молекулуудын кинетик энергийн нийлбэрээс тогтоно. Идеал хийн дотоод энергийг нэг молекулд оногдох дундаж кинетик энерги $\langle E_k \rangle$ ба молекулын тоо (N)-ны үржвэр хэлбэртэй бичиж болно.

$$U = N \cdot \langle E_k \rangle$$

Молекулын давших хөдөлгөөний дундаж кинетик энерги $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}kT$ болон $R = k \cdot N_A$ болохыг тооцвол нэг моль идеал хийн дотоод энергийг дараах хэлбэртэй бичиж болно.

$$v = 1 \text{ моль үед } U_1 = N_A \cdot \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}RT$$

(Нэг моль идеал хийн дотоод энерги)

Эндээс үзэхэд идеал хийн дотоод энерги нь зөвхөн температураас хамаардаг болох нь харагдаж байна. Хийг том савд, эсвэл бага савд хийлээ гээд хийн молекулын хөдөлгөөний дундаж кинетик энерги өөрчлөгдөхгүй гэсэн үг юм.

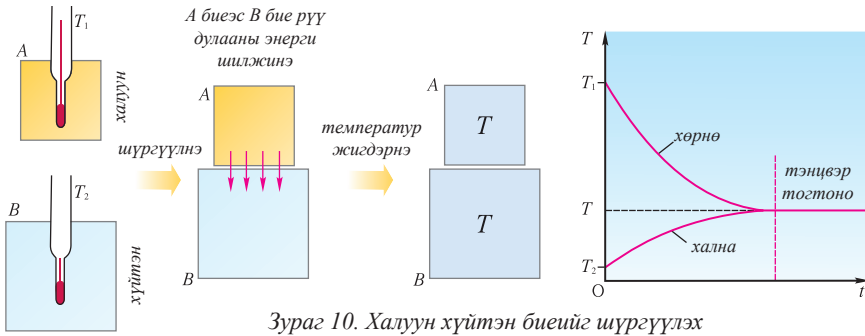
Дотоод энергийн өөрчлөлт

Дотоод энергийг өөрчлөхийн тулд яах ёстой вэ? Энэ асуултад хариулахын тулд дотоод энерги гэж юу билээ, юуг өөрчилбөл дотоод энерги өөрчлөгдөх билээ гэдгийг бодох ёстой.

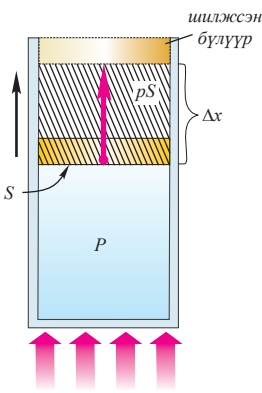
Гаднаас энерги өгөх хэрэгтэй. Энерги өгөх ямар ямар арга зам байж болох вэ? Хялбарчлаад савтай усыг хэрхэн хурдан халаах вэ, хэрхэн хурдан хөргөх вэ гээд саналаа уралдуулаарай. Боломжтой бол туршаад үз. Санаануудаа самбарт бичээд ангилахыг оролдоорой. Гаднаас өгсөн энерги ямар замаар молекулын хөдөлгөөний энерги болоод байгааг анхаараарай.

Идеал хийн дотоод энерги молекулуудын дулааны хөдөлгөөний кинетик энергийн нийлбэртэй тэнцүү.

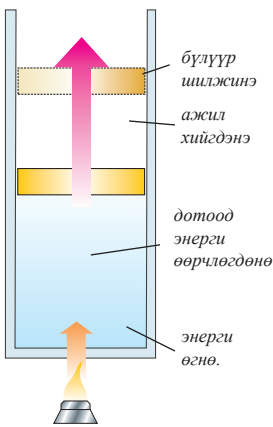




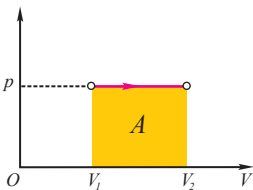
Зураг 10. Халуун хүйтэн биеийг шүргүүлэх



Зураг 11. $A = p\Delta V$



Зураг 12. $Q = \Delta U + A$



Зураг 13. Ажил дүрсийн талбайгаар тодорхойлогдоно.

Биеийг халаах, хөргөх талаар бидэнд амьдралын хангалттай туршлага бий. Анзаарвал энд дулааны энергийг шууд дамжуулах, эсвэл өөр хэлбэрийн энергийг дулааны энергид дамжуулах аргууд байдаг.

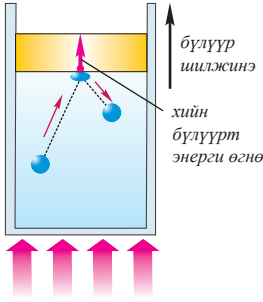
Халуун хүйтэн биеийг шүргүүлж тавихад температур ихтэй биеэс хүйтэн биед дулааны энерги дамжина. Бөөмөн загварын үүднээс үзвэл, температур ихтэй биеийн бөөмийн дулааны хөдөлгөөний кинетик энерги их байна. Ийм кинетик энерги ихтэй бөөм хүйтэн биеийн кинетик энерги багатай бөөмтэй мөргөлдөж энерги өгнө. Ингээд эцэст нь ижилхэн температуртай болохыг эрмэлзэнэ. Үүнийг дулааны тэнцвэрт орох гэдэг (Зураг 10). Хамгийн хялбараар нь идеал хийн дотоод энергийг өөрчилье гэвэл температурыг өөрчлөх хэрэгтэй. Энэ нь хийн молекулын дулааны хөдөлгөөний кинетик энергийг өөрчилнө гэсэн үг.

Термодинамикийн 1-р хууль

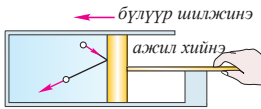
Дулааны процессын хувьд бичигдсэн энерги хадгалагдах хуулийн илэрхийллийг термодинамикийн 1-р хууль гэж нэрлэдэг. Газар зүйн их нээлтийн үед далайгаар хол газар аялахад, уурхайд булчингийн хүчийг орлосон хөдөлгүүр бүтээх зэрэгт дулааны энергийг ашиглах асуудал чухлаар тавигдаж байжээ. Түүхэнд дулааны энергээр ажилладаг төхөөрөмж зохиох бүтэлтэй, бүтэлгүй оролдлогуудыг нэгтгэж термодинамикийн онолыг боловсруулсан байдаг. Дулааны энергийг хэрхэн механик энерги болгох вэ, хэрхэн хамгийн үр ашигтай машин бүтээх вэ гэдэг асуудалд термодинамикийн онол хариулт өгдөг.

Термодинамикийн хуулийг ойлгохын тулд хийг халаах хялбар туршилт хийе. Хийн температур нэмэгдэхийн зэрэгцээ бүлүүр тодорхой зайд дээшилнэ. Энэ процессыг энерги хадгалагдах хуулийн үүднээс үзвэл хийд гаднаас өгсөн дулааны энергийн зарим хэсэг нь хийн дотоод энергийг нэмэгдүүлэхэд, зарим хэсэг нь бүлүүрийг өргөх ажилд зарцуулагдана гэж тайлбарлана (Зураг 11). Үүнийг Термодинамикийн 1-р хууль гэдэг.

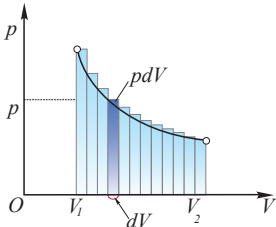
$$Q = \Delta U + A$$



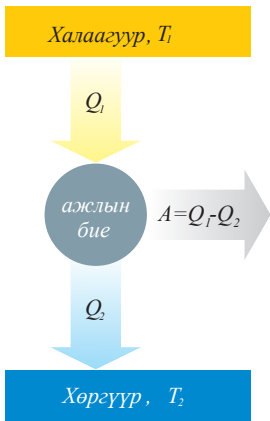
Зураг 14. Холдож байгаа бүлүүрээс молекул ойход хурд нь багасна.



Зураг 15. Ойртож байгаа бүлүүрээс молекул ойход хурд нь ихсэнэ.



Зураг 16. Ерөнхий тохиолдолд ажил нь $p(V)$ хамаарлын муруйн доор хашигдсан дүрсийн талбайгаар илэрхийлэгдэнэ.

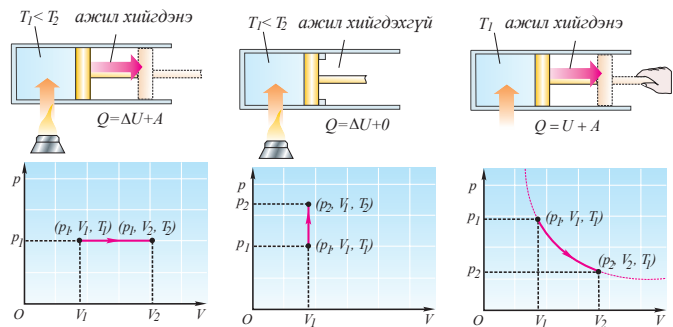


$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$$

Хийн тэлэлтийн ажлыг хялбар тохиолдол болох тогтмол даралттай процессын хувьд үзье. Хий бүлүүрт $F=pS$ хүчээр үйлчилж үүний дүнд бүлүүр Δx зайд шилжсэн гэе (Зураг 12). Энд бүлүүрт хийгдсэн ажил буюу бүлүүрт өгсөн энерги нь

$$A = F \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V$$

Үүний, $\Delta V = S\Delta x$ нь хийн эзлэхүүний өөрчлөлт. Зургаас үзэхэд хийн гүйцэтгэсэн ажил нь графикаар хашигдсан дүрсийн талбайтай тэнцүү байна (Зураг 13). Ажлыг тооцоолохдоо хий бүлүүрт энерги өгч байна уу, эсвэл бүлүүр хийд энерги өгч байна уу гэдгийг байнга анхаарах хэрэгтэй. Бөөмөн загварын үүднээс үзвэл бүлүүр хөдлөхгүй бол хийн молекул бүлүүрийг харимхай мөргөөд ойно. Энэ үед молекулын хурд өөрчлөгдөхгүй. Харин хий тэлэхэд хийн молекул бүлүүрийн хойноос хөөж мөргөнө. Энэ үед ойсны дараа молекулын хурд өмнөхөөс багасна, молекул энергийнхээ зарим хэсгийг бүлүүрт өгнө (Зураг 14). Хэрэв цохиурыг ухраавал бөмбөгний ойх хурд багасдагтай үүнийг адилтгаж болно. Эсрэгээр, хийг шахвал бүлүүр хийд энерги өгнө, хийн молекулын хурд нэмэгдэнэ (Зураг 15).



Даралт тогтмол үед гаднаас өгсөн энерги нь дотоод энергийг нэмэгдүүлэх болон бүлүүрийг өргөх ажилд зарцуулагдана. $Q = \Delta U + A$

Эзлэхүүн тогтмол үед ажил хийгдэхгүй. Гаднаас өгсөн энерги нь дотоод энергийг нэмэгдүүлэхэд зарцуулагдана. $Q = \Delta U + 0$

Температур тогтмол үед дотоод энерги өөрчлөгдөхгүй, гаднаас өгсөн энерги нь бүлүүрийг шилжүүлэх ажилд зарцуулагдана. $Q = 0 + A$

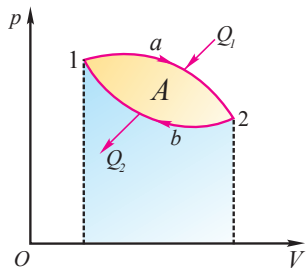
Дулаан солилцоогүй үед хий дотоод энергийнхээ хэсгийг бүлүүрийг шилжүүлэх ажилд зарцуулна.

$$Q = \Delta U + A$$



Мөнхийн хөдөлгүүр (Латинаар Perpetuum Mobile) гэж авсан энергиэсээ илүү ажил хийж чадах (АҮК>100%) төхөөрөмжийг хэлнэ. 1-р төрлийн мөнхийн хөдөлгүүр: Нэг л ажиллуулаад орхивол, түлш буюу бусад энергийн нөөцийг зарцуулахгүйгээр ажлыг төгсгөлгүй удаан хугацаагаар хийх чадвартай төхөөрөмж юм. 2-р төрлийн мөнхийн хөдөлгүүр: Өгсөн дулааныг бүгдийг нь ажил болгодог дулааны хөдөлгүүр юм.

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$$



Зураг 17. Дулааны хөдөлгүүр цикл процессоор ажилладаг.

Дулааны хөдөлгүүр

Дулааны энергийг хэрхэн механик ажил болгох вэ? Нэг удаа бус, дахин давтан ажил хийхийн тулд хөдөлгүүр ямар зарчмаар ажиллах ёстой вэ гэсэн асуудал тулгарна. Иймд дулааны хөдөлгүүрийг дараах байдлаар загварчилж болох юм. Юуны өмнө, гаднаас энерги авах ёстой, гадны бие дээр ажил хийх ёстой, зарим энерги ажил болгож чадалгүй гадагш алдаж болзошгүй. Иймд дулааны хөдөлгүүрийг T_1 температуртай халаагуур (энерги өгөх бие), ажлын бие (хий), T_2 температуртай хөргүүр (сарнисан энергийг авах бие) гэсэн гурван хэсгээс тогтоно гэж загварчилж болно. Халаагуураас Q_1 энерги авна, Q_2 энерги гадагш алдана. $A=Q_1-Q_2$ ажил хийнэ. Ингэвэл хөдөлгүүрийн ашигт үйлийн коэффициент (АҮК) нь ашигтай ажлыг зарцуулсан нийт энергид харьцуулсантай тэнцүү байна.

Эндээс үзвэл, хөдөлгүүр 100%-аас их АҮК-тэй байх боломжгүй гэдэг нь харагдаж байна. Зарцуулсан энергиэсээ илүү ажил хийдэг 1-р төрлийн мөнхийн хөдөлгүүр бүтээх боломжгүй юм. Ийм хөдөлгүүр хийх оролдлого дундад зууны үед маш их хийгдэж байжээ. Үүнд термодинамикийн 1-р хууль цэг тавьсан юм.

Тэгвэл ядаж 100%-ийн АҮК-тэй 2-р төрлийн мөнхийн хөдөлгүүр бүтээх боломжтой юу? гэсэн асуулт гарна. Энерги хадгалагдах хууль үүнийг үгүйсгэж чадахгүй. Дулааны хөдөлгүүрийн АҮК-ийн томъёоноос $Q_2=0$ буюу дулааны ямар ч алдагдалгүй ажиллах тохиолдолд АҮК 100% байх болно.

С.Карно дулааны хөдөлгүүр ямар процессоор ажиллавал хамгийн их АҮК-тэй байх вэ? гэдгийг судалж дулааны хөдөлгүүрийн онолыг боловсруулжээ.

Карногийн онолоор хамгийн их АҮК нь дээрх томъёогоор илэрхийлэгддэг. Жишээлбэл, $T_1=700$ К температуртай халаагуур, $T_2=300$ К температуртай хөргүүр ашиглан гаргаж авч чадах хамгийн их АҮК нь

$$\eta_{\max} = \frac{700 - 300}{700} \cdot 100\% = 57\% \text{ байна гэсэн үг. Бодит}$$

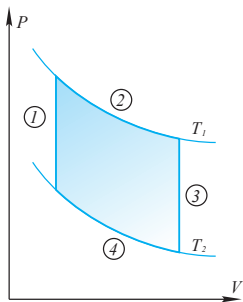
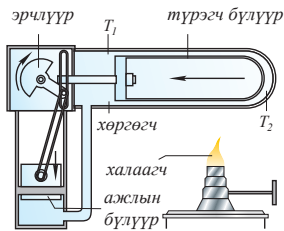
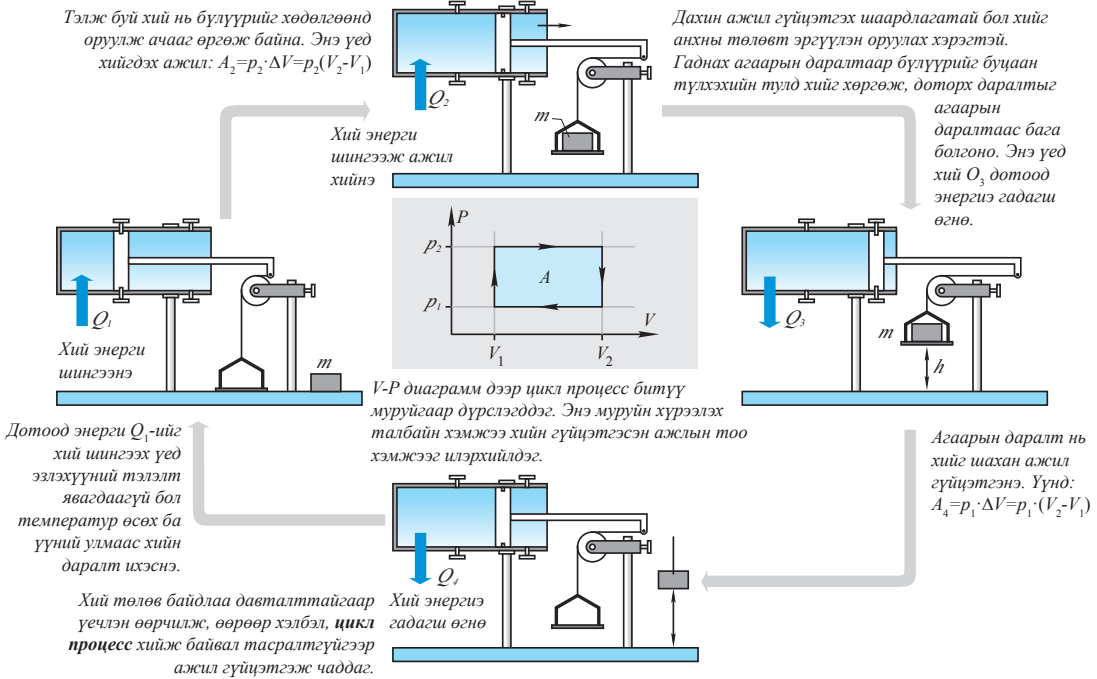
хөдөлгүүрийн хувьд дулааны алдагдал энэ хязгаарын утгаас ямагт их байдаг. Иймд бодит хөдөлгүүр хэзээ ч онолын дээд утгад харгалзсан АҮК гаргаж чаддаггүй.

Дулааны хөдөлгүүр давтагдах процессоор ажилладаг учраас давталт бүрийн дараа анхныхаа төлөвт ирж байх ёстой. Нэг цикл процессыг хоёр хэсэгт хувааж ойлгож болно.

Хий тэлэх 1a2 процессын үед 1 төлөвөөс 2 төлөв хүртэл температур ихтэй мужаар явж гаднаас Q_1 энерги авч эерэг ажил хийнэ. Шахах 2b1 процессын үед 2 төлөвөөс 1 төлөв хүртэл температур багатай мужаар явж гадагш нь Q_2 энерги алдаж сөрөг ажил хийнэ. Энд нийт хийгдсэн ажил $A = Q_1 - Q_2$ нь процессын графикаар хүрээлэгдсэн талбайтай тоон утгаараа тэнцүү байна (Зураг 17).

Дулааны хөдөлгүүрийн ажиллагаа

Уурын машиныг бүтээснээр аж үйлдвэрийн хувьсгал эхэлсэн билээ. Шаталтын үед чөлөөлөгдөх энергийг уурын машины тусламжтайгаар механик энергид хувиргадаг байна. Ингэснээр хүний биеийн хүчээр гүйцэтгэх ажлыг хөнгөвчлөх буюу чөлөөлөх боломжтой болжээ.



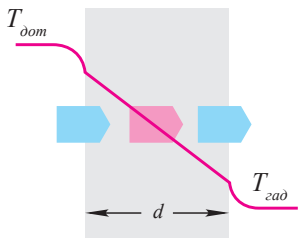
Зураг 18. Хоёр бүлүүртэй Стирлингийн мотор (а), хийн цикл процесс (б)

Стирлингийн хөдөлгүүр

Өнөөгийн автомашины гол хөдөлгүүр болох Н.А.Отто хөдөлгүүрийг бүтээхээс өмнө 1816 онд Роберт Стирлинг халуун агаараар ажиллагч хөдөлгүүрийн патентыг авсан байна. Энэ хөдөлгүүрийн доторх түрэгч бүлүүрийн халуун болон хүйтэн хэсгийн хоорондох хөдлөгч хийн хэмжээ өөрчлөгддөггүй. Хий цикл процесст орох ба үүний хамт ажлын бүлүүрт ажил гүйцэтгэгдэнэ. Цикл процессын дөрвөн мөчлөгийг идеал байдлаар дүрслэн үзүүлж p - V диаграммаар тайлбарлаж болно.

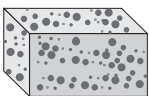
1. Хийн эзлэхүүнийг тогтмолоор халааж энерги өгнө. Хий ямар нэг ажил хийхгүй.
2. Температур тогтмолоор тэлэх процесс. Энэ үед гаднаас энерги өгнө. Хий ажил хийнэ.
3. Эзлэхүүнийг тогтмолоор хөргөнө. Хий ажил хийхгүй.
4. Температурыг өөрчлөхгүйгээр шахна. Энэ үед энергийг гадагшлуулна. Хийг шахах ажил хийгдэнэ.

Хөргөх болон халаах ажиллагааг хөдөлгүүрийн хүйтэн болон дөлөөр халаасан хэсэгт дулаан өгөх буюу авах замаар явуулна (Зураг 18).

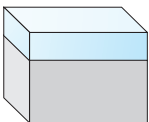


Зураг 19. Ханаар дулаан нэвтрэх

Барилгын материал



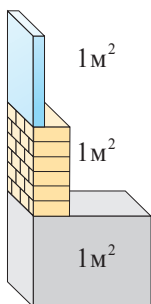
Нэмэлт дулаан тусгаарлагч



$\lambda = 0.02$ Вт/м·К
тусгаарлагч материал

$\lambda = 0.2$ Вт/м·К
сүвэрхэг тоосго

$\lambda = 2$ Вт/м·К
бетон



Өөр өөр материалын дулаан тусгаарлалт

Зураг 20. Дулаан тусгаарлагч

Дулаан дамжуулал

Дулааны солилцоо (дулаан тархах ба зөөгдөх)-г дулаан дамжуулал, хий шингэний урсгал (конвекц), цацаргалтаар гүйцэтгэх боломжтойг бид мэдэх билээ.

Дулаан дамжуулал нь орчинд температурын ялгаа байдгийн улмаас үүсдэг. Дулаан дамжуулал температур жигдрэх чиглэлд явагддаг. Бидний амьдралд байдаг жишээг үзье.

Гаднах орчны $T_{сэд}$ температур гэрийн доторх $T_{дот}$ температураас бага болбол халаалтаар гэрийн дулааныг тогтмол байлгахын тулд Δt хугацааны туршид ΔE энергийг нөхөж байх шаардлагатай. Энерги d зузаантай ханаар нэвтрэнэ (Зураг 19). ΔE энергийн хэмжээ ханын талбай A , ханын хийцийн материалын дулаан дамжуулал

λ ба температурын уналтын хэмжээ $\frac{\Delta T}{d}$ -ээс хамаарна. Ханын гадаргын дагуу температурын ялгаа байхгүй гэж үзэн хялбарчилбал

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$$

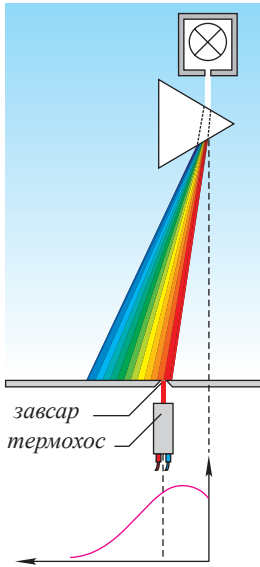
Энергийн дамжуулалд агаар ба ханын гадарга хоорондох шилжилт нөлөөлнө. Энэ бүх нөлөөллийг дулааны нэвтрэлтийн коэффициент k -д нэгтгэн авч үзвэл

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = k \cdot A \cdot \Delta T$$

Дулааны алдагдлыг багасгахын тулд k -ийн бага утгатай нэмэлт дулаан тусгаарлагч барилгын материал хэрэглэдэг (Зураг 20). Барилгын стандартад дулаан тусгаарлалтын зөвшөөрөгдсөн хязгаарын утгуудыг зааж өгдөг. Орчин үеийн техник технологийн ололтыг барилгын стандартад тусган шинэчилж байдаг.

Дулаан цацаргалт

Нарны энерги асар хол зайг туулан дэлхийд хүрч ирдэг. Энэ энергийг зөөх ямар нэг биет шаардлагагүй. Цацаргалт нь цацралын үүсгэгчийн температураас хамаардаг тул дулаан цацаргалт гэдэг. Металлыг галд халаан улайсгаж болно. Цааш халаахад шар дараа нь цагаан өнгөтэй болдог. Цацруулагчийн температур хангалттай өндөр үед дулааны цацрал нүдэнд үзэгддэг. Энэ цацрал олон өнгийн спектрийг үүсгэнэ. Өнгө тус бүр долгионы уртын тодорхой утганд харгалздаг. Хөх өнгийн гэрэл нь улаанаасаа богино долгионы урттай байна. Чийдэнгийн гэрлийн спектрт шар өнгийн гэрэл илүү хурц байна. Термохосоор үзэгдэх гэрлийн мужийн гадна цацаргалт байгааг тогтоосон. Улаан гэрлээс урт долгионы мужид байх **хэт улаан туяаны** цацралын чадал, үзэгдэх гэрлийнхээс их байдаг



Зураг 21. Чийдэнгийн гэрлийн цацралын хэмжилт

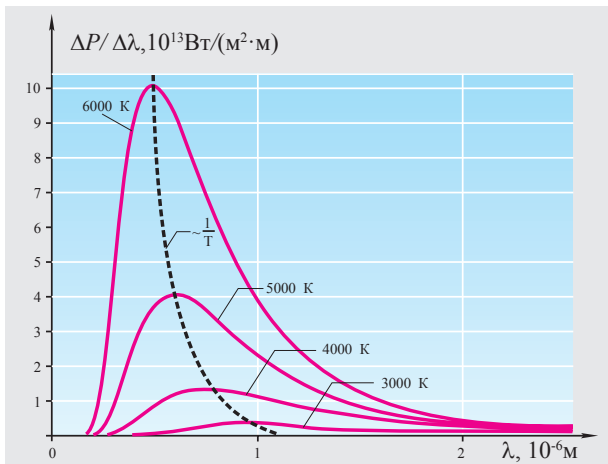
(Зураг 21). Хүний нүд дулаан цацаргалтын үзэгдэх гэрлийн мужид байх хэсгийг хардаг бол хүний арьс нүдэнд харагдахгүй дулааны цацралыг мэдэрдэг. Зарим амьтад дулааны цацралын тусламжтайгаар шөнө өөрийн олзыг олж хардаг байна. Бие нь ямар ч температурт туяа цацаргаж байдаг.

Температур, цацаргалт

Спектрийг тасралтгүй (нэл) ба тасралттай спектр гэж ангилдаг. Тасралттай спектр температураас хамааралгүйгээр атомын дотоод процессуудын дүнд үүсдэг. Тасралтгүй спектр биеийн дулааны хөдөлгөөний үр дүнд бий болдог. Дулааны цацрал бие дээр тусахдаа ойх буюу шингээгддэг. Гэрэл ойлгож буй эсэхээс үл хамааран бие үргэлж дулаан цацруулж байдаг.

Макс Планк (1858-1947) бүх цацралыг 100% өөртөө шингээдэг үнэмлэхүй хар биеийн тодорхойлолтыг гарган түүний цацаргалтын спектрийн температурын хамаарлыг математик томъёонд оруулан тайлбарласан (Зураг 22). Чийдэн, нар, индүү зэрэг бодит цацаргагчийн спектр хар биеийн спектртэй сайн тохирдог.

Хар биеийн цацралын энерги тодорхой долгионы уртын утга λ_{\max} -ын үед хамгийн их утгатай байна. Температур багасахад λ_{\max} ихсэнэ. Нийт цацаргалтын чадал температурыг дагалдан өсдөг.



Зураг 22. Хар биеийн цацаргалтын спектрийн температурын хамаарал

Нарны цацаргалтын чадал

22-р зураг дээр буй графикаас дараах 2 хуулийг гарган авч болох ба эндээс “хар бие” нарны цацаргалтын чадлыг тооцож болно.

Виний шилжилтийн хууль

Хар биеийн хамгийн их цацаргалтын чадалд харгалзах долгионы урт λ_{\max} нь биеийн температуртай урвуу пропорционал хамааралтай.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \text{ үүнд } b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Стефан-Больцманы хууль

Хар биеийн цацаргалтын чадал P , гадаргын A талбайн харьцаа нь температурын 4 зэрэгтэй пропорционал хамааралтай.

$$\frac{P}{A} = \sigma \cdot T^4,$$

үүний: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$

БҮЛЭГ 2. МОЛЕКУЛ ФИЗИК

Энэ хуулиар бид нарны температур ба цацаргалтын чадлыг тооцож чадна. Нарны спектр $\lambda_{\max} = 550$ нм долгионы уртад чадлын максимум утгатай байдаг. Үүгээр нарны гадаргын температурыг $T = 5800$ К гэж тодорхойлно.

Нар $A_{\text{нар}} = 4\pi r^2 = 6.1 \cdot 10^{18} \text{ м}^2$ гадаргын талбайтай байх тул нарны цацаргалтын чадал

$$P_{\text{нар}} = 3.9 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$

Нарнаас алслагдсан дэлхий дээр нарны энерги нь дэлхий нарны хоорондох зайн хэмжээтэй адил радиустай бөмбөрцгийн гадаргад хуваарилагдан түгээгдэнэ. Дэлхий дээр ирэх нарны цацралын чадал

$$P = 1.7 \cdot 10^{17} \text{ Вт байдаг.}$$

Дэлхийд нар эгц тусах гадаргын метр квадрат бүрт $S = \frac{P}{A_{\text{дэлхий}}} = 1340 \text{ Вт/м}^2$ хэмжээтэй

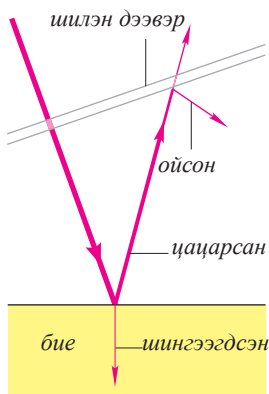
цацралын чадал оногдоно. S -нарны тогтмол. Илүү нарийвчлан тодорхойлсон хэмжээ нь $S = 1368 \text{ Вт/м}^2$ байдаг. Нарнаас ирж буй цацраг агаар мандалд шингээгдсэнээр чадлын нэг хэсэг нь алдагдана. Газрын гадаргад энэ чадал хамгийн ихдээ 1000 Вт/м^2 байдаг. Нарны байрлал, улирал, өдрийн цаг мөн үүл, газар зүйн өргөргийн байдлаас шалтгаалж энэ утга хэлбэлзэн өөрчлөгдөж байдаг байна.

Дэлхийн дундаж температур

Наранд тавьсан машин дотор хүн тогтохын аргагүй халдгийг бид мэднэ. Энэ халалт нь дулааны тэнцвэрт байдал тогтох хүртэл үргэлжилж температур өсдөг. Дулааны тэнцвэрийн үед машины цацруулж буй дулааны хэмжээ нь нарнаас авч буй энергийн хэмжээтэй тэнцүү болно. Нартай харьцуулахад машины температур бага учраас түүний цацруулалтын чадлын максимум утгад харгалзах долгионы урт λ_{\max} нь мөн л богино байна.

Дэлхийн хувьд ч мөн машиныхтай адил байна. Нарны цацаргалтын 30% нь огторгуйд буцан ойж сарнина. Үлдсэн 70% нь агаар мандал болон газрын гадаргыг халаана. Секунд тутамд $E = 0.7 \cdot P_{\text{нар}} \cdot t = 0.7 \cdot 1.7 \cdot 10^{17} \text{ Вт} \cdot 1\text{с} = 1.19 \cdot 10^{17} \text{ Ж}$ энергийг дэлхийд өгдөг.

Дэлхий дулааны тэнцвэрт байх тул ийм хэмжээний энергийг цацна. Стефан-Больцманы хуулиар $E_{\text{цац}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \cdot t$, $E = E_{\text{цац}}$ байх тул Дэлхийн дундаж температур $T = 251 \text{ К}$, $t = -22^\circ\text{C}$ болно. Бодит байдалд $t = 15^\circ\text{C}$ байдаг нь агаар мандлын нөлөөлөл болон хүлэмжийн эффекттэй холбоотой.

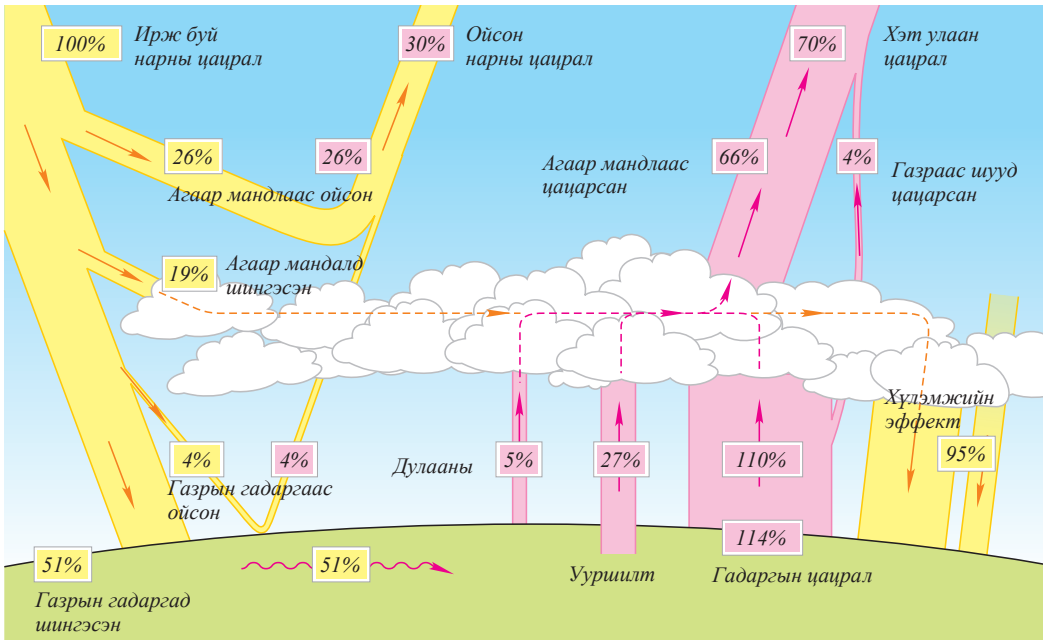


Зураг 23. Хүлэмжийн эффекттийг тайлбарлах

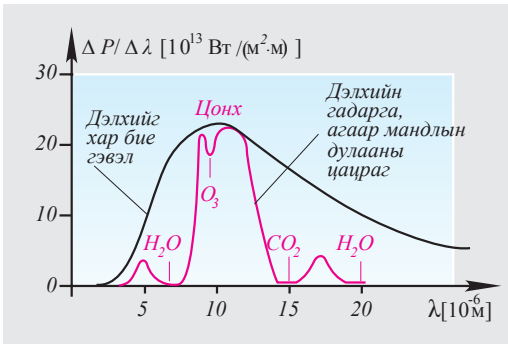
Хүлэмжийн эффект

Шилэн дээвэртэй хүлэмжийн дотор талд гаднах температур бага байсан ч дулаахан байдаг. Орчин үеийн энерги хэмнэх зохиомжтой барилгуудад энэ эффекттийг тусгайлан байрлуулсан цонхны тусламжтай хэрэгжүүлж байна. 23-р зураг дээр түүний үйлчлэх зарчмыг харуулав. Нарны энерги нь шилээр бараг саадгүй нэвтэрч шалан дээр тусаж түүнийг халаана. Шалнаас цацрах дулааны цацрал нь илүү урт долгионы урттай байх тул нарны гэрлээс илүүгээр шилэнд шингэх буюу түүнээс буцан ойно. Нийтдээ энергийн нэг хэсэг нь цацаргалтаар буцаж өрөөг халаана. Энэ халаалт нь шилэн хаалтгүй байснаас илүү их байна.

Дэлхийн агаар мандал нь хүлэмжийн шилэн хаалт шиг үйлчилгээг үзүүлдэг. Агаар мандал нь үзэгдэх гэрлийг саадгүй нэвтрүүлж, харин дэлхийгээс гарч буй дулааны цацаргалтыг илүү шингээдэг.



Зураг 24. Агаар мандал дахь үзэгдлүүд ба дэлхийн гадарга дээрх энергийн хувирал өөрчлөлтийн холбоо



Зураг 25. Дэлхийн сансрын огторгуй руу дулаан цацаргах нь

Дэлхийн хамгийн их эрчимтэй цацаргах долгионы урттай цацрагийг хүлэмжийн хий шингээж авдаг. Энд харгалзах долгионы уртыг "Цонх" гэж нэрлэдэг

24-р зурагт нар, дэлхийн гадарга, агаар мандлын хооронд явагдах энергийн шилжилтийг бүхэлд нь харуулсан байна. Нарны болон дэлхийн гадаргын дулааны цацаргалтаар халсан агаар мандал дэлхийн гадарга руу буцаан дулааныг цацруулна. Үүний улмаас дэлхийн гадарга нарны цацралын нэг хэсгийг дахин хүлээн авна. Ингэснээр дэлхийн гадаргын ойролцоо температур өснө. Үүний хамт дэлхийн гадаргын энергийн цацаргалт нэмэгдэж, гадаргын ойролцоо дулааны тэнцвэрт байдал тогтох хүртэл явагдана. Энэ температур нь дэлхий-нарны цацаргалтын дулааны тэнцвэрт байдлын температураас өндөр байна. Дэлхийн гадарга хөндлөн огтлолоосоо 4 дахин их байдаг тул гадаргын дундаж цацаргалтын чадал нь нарны тогтмолоос 4 дахин бага буюу $342 \text{ Вт}/\text{м}^2$ байна. Яг газрын гадаргаас 14% нь цацардаг. Энэ нь $390 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Стефан-Больцманы хуулийн дагуу үүнд харгалзах температур нь $T = (390/5.7 \cdot 10^{-8})^{0.25} \text{ К} = 288 \text{ К} = 15^\circ\text{C}$ байна. Энэ нь дэлхийн гадаргын бодит дундаж

БҮЛЭГ 2. МОЛЕКУЛ ФИЗИК

температур юм. Тэгэхээр хүлэмжийн эффект бидний санааг зовоох бус харин түүний өөрчлөлт л биднийг түгшүүлж байна.

Хүлэмжийн хий

Усны уур	+ 20,6 К	60%
Нүүрсхүчлийн хий	+7,2 К	22%
Озон	+ 2,4 К	7%
Инээлгэгч хий (N ₂ O)	+ 1,4 К	4%
Метан	+ 0,8 К	2.5%

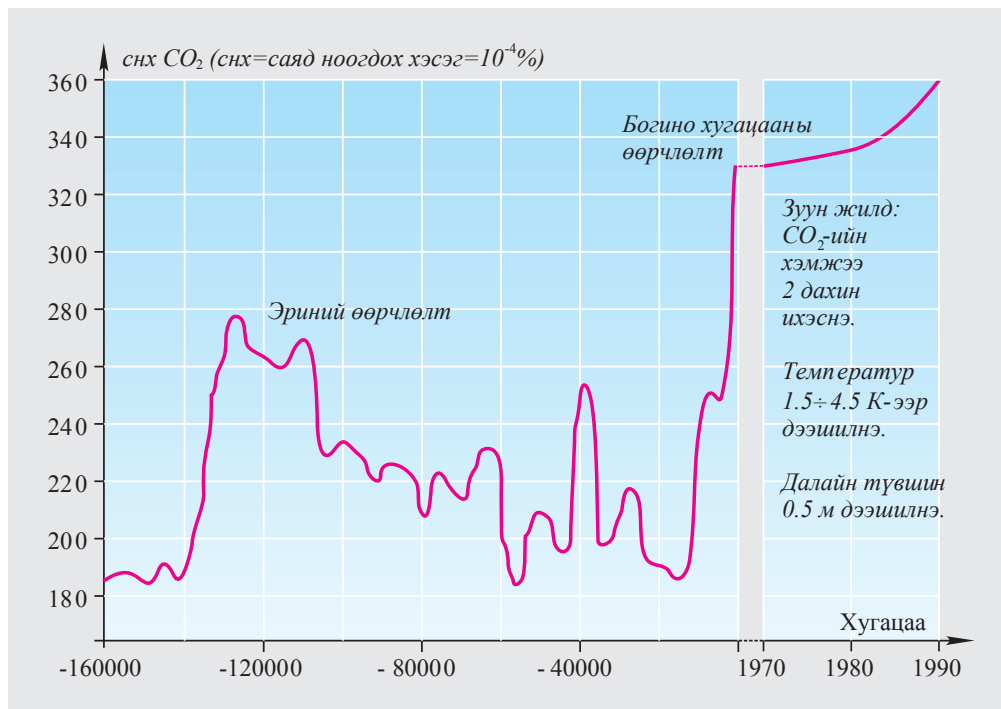
Хүлэмжийн хий

Хүлэмжийн эффект байгаагүй бол дэлхий тэсэхийн аргагүй хүйтэн байж түүн дээр амьдрал үүсэхгүй байсан биз. Энэ эффектийн ачаар дэлхий-нар-дэлхийн дулааны тэнцвэрээс даруй 33 К-ээр илүү халуун болсон билээ. Үүнд агаарт байх зарим нэг хий хувь нэмрээ оруулдаг.

Аж үйлдвэр, ахуйн хэрэгцээ, тээвэр, хөдөө аж ахуйд агаар мандлын хүлэмжийн эффектийг улам эрчимжүүлдэг хийг ихээхэн хэмжээгээр үйлдвэрлэдэг. Эдгээр хий тус бүртээ тодорхой долгионы уртад харгалзах цацралыг илүү ихээр

шингээдэг байна. Хүлэмжийн хийнүүдэд энэ шингээлт болох хамгийн их утга нь дэлхийн цацруулах дулааны цацаргалтын хэмжээнд буюу $\lambda=10$ мкм орчим байдаг байна.

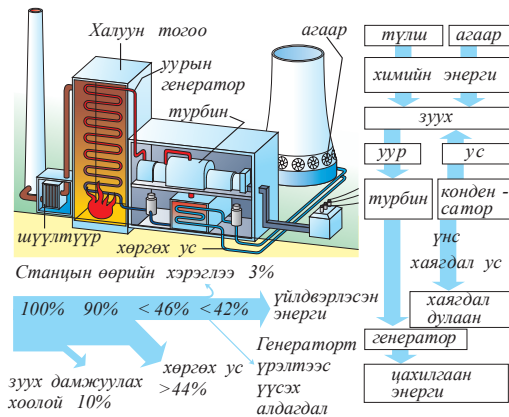
Агаар мандал тодорхой долгионы урттай цацралыг бүрэн шингээнэ (Зураг 24). 10 мкм-ийн ойролцоо байх цонхгүйгээр дэлхийн температур илүү өндөр байх байсан билээ. Энэ завсраар агаар мандлын дундуур энергийг нэвтрүүлдэг. Хөдөө аж ахуй болон үйлдвэрлэл нь энэ долгионы уртад шингээдэг метан, инээлгэдэг хий болон бусад олон төрлийн нүүрсгөрөгчийн нэгдлийг ялгаруулдаг. CO₂ хийн агууламж ихсэхэд 15 мкм-ийн ойролцоох шингээлт ихэсч цонхны хэмжээ багасдаг. Харин усны уурын хэмжээний ихсэлт нь шингээлтэд бараг нөлөөлдөггүй байна. Нүүрс, занар, нефтийн бүтээгдэхүүнийг шатаахад азотын исэл, хүхрийн давхар исэл болон юуны түрүүн нүүрсхүчлийн хий үүсдэг.



Зураг 26. Агаар мандал дахь нүүрсхүчлийн хийн өөрчлөлт

Нүүрсхүчлийн хий асар их хэмжээгээр ялгардаг учир түүнийг шүүлтүүр болон катализатор хэрэглэн цуглуулж авч чаддаггүй. Эрчим хүчний аж үйлдвэрт үйлдвэрлэж буй кВт·цаг цахилгаан энерги тутамдаа 1 кг CO₂-ийг агаарт цацаж байдаг. Машинаар 100 км явах бүр ойролцоогоор 20 кг CO₂-ийг агаарт хаядаг. Дэлхийн хэмжээгээр хүний үйл ажиллагааны үр дүнд жил бүр 36 · 10⁹ тонн CO₂ үүсдэг байна. Үүний нэг хэсэг нь байгалийн жамаар (ургамалд шингээгдэх болон далайд уусах гэх мэт) цэвэрлэгддэг ба 11 · 10⁹ тонн нь агаарт үлддэг. Өнгөрсөн үед агаар дахь CO₂-ийн хэмжээ хэлбэлзэж байсан боловч өнөөдөр бид хамгийн их агууламжийг бий болгоод байна. (Зураг 26). Үүний эсрэг ямар ч том арга хэмжээ авсан энэ агууламж буурахгүй шинжтэй байна. CO₂-ийн агууламжийн өсөлт нь агаарын дундаж температурын өсөлт, түүнтэй уялдсан хур тунадасны хэмжээний өөрчлөлтийг араасаа дагуулж буйд эргэлзэх зүйл алга.

Цаг уурын бүсийн хил өөрчлөгдөж, мөсөн голууд, туйлын мөсөн бүрхүүл хайлж, үүний улмаас далайн эрэг орчмын газрууд үерт автаж байна. Байгалийн гамшиг болох гол, мөрөн савнаасаа хальж үерлэх, цаг уурын аюултай үзэгдлүүдийн давтамж ихсэх хандлага өнөөдөр ажиглагдаж байна. Монгол орны хувьд дэлхийн дулаарлын нөлөөгөөр, уур амьсгал хуурайшиж, цөлжилт эрчимжиж, хил нь улам бүр хойд зүгт тэлсээр байна.



Зураг 27. Цахилгаан станцыг "энерги-түүхий эд"-ийн урсгалын систем гэж үзэх нь

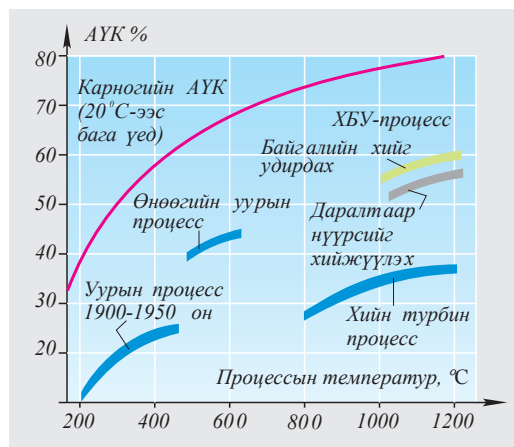


Зураг 28. Төрөл бүрийн цахилгаан станцын энергийн урсгалын диаграмм

Цахилгаан станц

Монгол улсад хэрэглэгчдэд очиж буй нийт цахилгаанд хувиргасан энергийг бараг бүхэлд нь нүүрсээр галладаг цахилгаан станцад үйлдвэрлэдэг. Ийм станцыг бодис ба энергийг гаднаас өгч, гаралт дээр нь мөн л бодис ба энергийг гарган авдаг нэг төрлийн систем гэж үзэж болно (Зураг 27). Энергийг хувирган өөрчлөх гинжин хэлхээний нийт ашигт үйлийн коэффициент нь хэлхээ тус бүрийн АҮК-уудын үржвэртэй тэнцүү.

Орчин үеийн цахилгаан станцуудад тохиромжтой нөхцөлийг бүрдүүлсэн үед нийт АҮК, $\eta = 42\%$ хүрдэг. Энерги гарган авахад бодисыг хувиргах зайлшгүй шаардлагатай. Үйлдвэрээс гарч буй бодис ашиглагдаагүй энергитэй адилаар орчныг бохирдуулдаг. Техникийн арга хэмжээ бохирдолтыг багасгах боловч мөн л энерги шаарддаг сул талтай. Цахилгаан станцын орчим хангалттай хэмжээний дулааны хэрэгцээ байвал түүнийг үйлдвэрээс гарч буй хаягдал дулаанаар хангаж болох юм. Ийм ажиллагаатай станцыг **дулааны цахилгаан станц** гэдэг. Ийм станцад дулаан-эрчим хүчний тусгай холболтыг хийж өгдөг. Шаардлагатай температур бүхий уурыг халаалтын буюу үйлдвэрлэлийн зориулалтаар цикл процессын хэсгүүд дээр салаалан авдаг.



Зураг 29. Дулааны цахилгаан станцын АУК дээшлэлт

Энерги хэмнэх

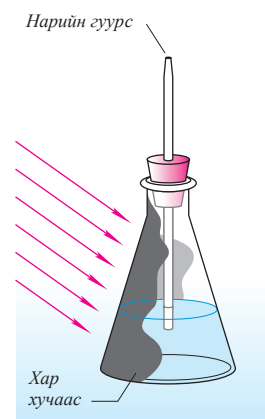
Энергийн хэрэглээ газрын доорх баялаг буюу дахин нөхөгддөггүй түлштэй салшгүй холбоотой. Иймд дахин сэргээгддэггүй түлшийг ариг гамтай хэрэглэх нь чухал. Цахилгаан станц боломжтой хамгийн их ба хамгийн бага температуртай уурыг хэрэглэн, өндөр АУК-тэй ажилладаг бөгөөд гэхдээ уурын температур орчны температураас бага байж болохгүй. Шаталтаас үүссэн халуун (1300°C) хийг турбины сэнс рүү үлээлгэдэг. Үүнээс гарах хаягдал хийн температур дэндүү өндөр (800°C) байх тул хийн турбины АУК уурын турбиныхаас ямагт бага байдаг. Энэ хаягдал хийг уур гарган авахад хэрэглэвэл, хавсарсан **хий ба уурын төхөөрөмжийн** ашигт ажиллагаа нь өндөр болох ба АУК нь 50%-аас их байдаг (Зураг 29). Ахуйн хэрэгцээний энергийн 50%-аас их хувийг орон байр халаахад зарцуулдаг.

Нарны энергийг ашиглах

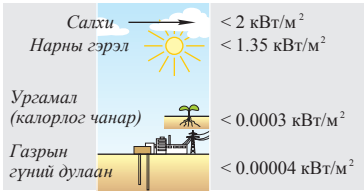
Монгол улсын нутаг дэвсгэр дээр тусаж буй нарны энергийн хэмжээ нь асар их бөгөөд түүний өчүүхэн хэсэг нь л улсын нийт хэрэгцээг хангахад хүрэх юм. Харамсалтай нь нарны энерги цаг үргэлж бэлэн байдаггүй. Мөн механик болон цахилгаан энергид хувиргахад хялбар бус.

Туршилт

1. Ундааны хөнгөн цагаан лааз ашиглан Героны Нарны усан оргилуурыг хийнэ. Савыг хараар будсан байна. Саванд агаар гаднаас орохгүйгээр нягт бөглөнө. Нар хурцаар шарах үед ус дээшээ олгойдно (Зураг 30).
2. Зэс хөнгөн цагаан лаазны (5 см х 5 см) ялтсуудыг киноны аппаратын гэрлээр шарж температурыг хугацаанаас хамааруулан хэмжинэ. Ингэхдээ гадаргыг гөлгөр эсвэл арзгар ялтсууд, цагаан хөөсөнцөрт суулгасан ялтас, шилээр хаасан ялтас зэргээр сонгож үзэгдлийг судлана уу. Ямар ч ялтас авсан бай хэсэг хугацааны дараа температур цааш өсөхгүй. Энэ температур туршлагын нөхцөлөөс хамаардаг.
3. Нарны элементэд R эсэргүүцлийг холбоно. Гэрэлтүүлэлтийн хэмжээ янз бүр байх нөхцөлд эсэргүүцлээр дамжих цахилгаан гүйдлийн хүч, хүчдэлийг хэмжинэ. $R = 0$ байхад богино холболтын гүйдлийн хүчийг хэмжинэ. Энэ гүйдлийн хүч нь гэрэлтүүлэлтийн эрчим ихсэхэд хамт өснө. Мөн нарны зайн гэрлийн цацралтай үүсгэх өнцгөөс хамаарна.



Зураг 30. Нарны усан оргилуур



Зураг 31. Сэргээгдэх эрчим хүчний нэгж талбайгаас гарах чадал

Нар бол энергийн эх үүсвэр

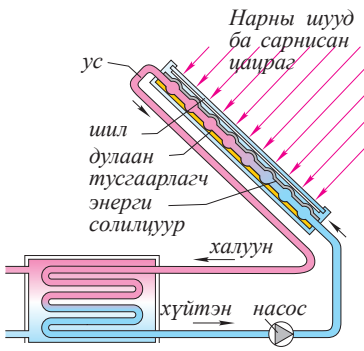
Нар нь энергийг дулааны цацаргалт байдлаар өгдөг. Үүний нэг хэсгийг бид гэрэл гэж хүлээн авдаг. Нарны гэрэл гадаргад эгц тусдаггүй мөн нар руу хандсан тал дээр тусдаг тул дунджаар 335 Вт/м^2 байдаг. Үүний 51% нь л газрын гадаргад хүрч ирдэг. Нэг секундийн дотор энэ нь $7.5 \cdot 10^{16} \text{ Вт}\cdot\text{с}$ буюу 60 сая том цахилгаан станцаас гаргах энергитэй тэнцүү хэмжээний энерги юм. Нар нийт хүн төрөлхтөний үйлдвэрлэдэг энергигээс 10000 дахин их

энергийг дэлхийн гадаргад өгдөг.

Нарны энергийг цахилгаан энергид хувиргах 1200 МВт станцыг баривал хамгийн сайн нөхцөлөөр тооцоход (АҮК 100%, цацрал эгц тусах гадаргад ирэх цацралын чадал 1000 Вт/м^2) 1.2 км^2 талбай шаардлагатай. Бодит амьдрал дээр тусаж буй цацралын энергийн хэмжээ бага байна.

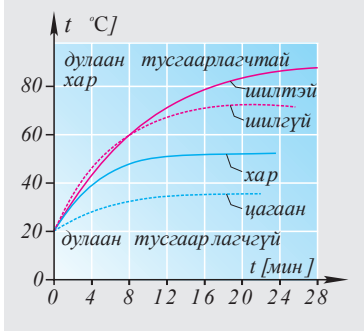
Нарны цацралын чадал нь 1 м^2 талбайд 335 Вт байна. Энэ нь газар нутгийн онцлог, цаг хугацаанаас хамаарч өөрчлөгдөж байдаг.

Нарны энерги нь зөвхөн газрын доор ашигт малтмал хэлбэрээр бус, мөн амьтан ургамлаас үүсэх түүхий эд, агаар мандлын хөдөлгөөнөөр явагдах салхи, усны эргэлтэд хадгалагдан үлддэг (Зураг 31).



Нарны энергийг дулааны хэрэглээнд ашиглах

Биеийн гадаргын бүтэц, шинж чанар, байрлалаас шалтгаалан нарны энергийг харилцан адилгүй шингээж дотоод энергидээ хувиргадаг. Далай тэнгис нь мэдээж хамгийн том шингээгч гадаргатай. Иймд тэдгээр нь Дэлхийн хамгийн том энергийн хуримтлуур юм. Нарны цацралын дулааныг хэрэглэх хоёр арга зарчим байдаг. Галт шил буюу хүнхэр толины тусламжтайгаар цаасыг ноцоож болдог. Энэ нь нарны энергийн нэгж талбайн энерги харьцангуй бага боловч түүнийг нэг цэгт цуглуулснаар өндөр температур гаргах боломжтойг харуулж байна. Энэ арга нь нарны цацрал тогтвортой байхыг шаарддаг тул нарны шууд цацрал ихтэй газруудад хэрэглэнэ. Хэрэглэж буй хүнхэр толийг нарны хөдөлгөөнийг дагуулан хөдөлгөдөг.



Хавтгай цуглуулагч (коллектор) нь нарны энергийг хар гадаргын тусламжтай шингээдэг. Нар үүлээр халхлагдсан байсан ч бүх чиглэлээс ирж буй сарнисан цацралыг шингээдэг. Энэ цацрал нь манай өргөрөгт нийт цацралын 50%-ийг бүрдүүлдэг. 32-р зурагт хавтгай коллекторын ажиллах зарчим, өнгө болон дулаан тусгаарлалт, хучилт зэргийн нөлөөллийг үзүүлсэн байна.

Коллекторын АҮК

$$\eta = \frac{P_{\text{ашигт}}}{P_{\text{цац}}}$$

үүнд $P_{\text{цац}} = S \cdot A$.

S - нэгж талбайд тусах нарны цацралын чадал,

A - Коллекторын гадаргын талбай

Зураг 32. Хавтгай коллекторын бүтэц, халаалтанд дулаан тусгаарлагчийн үзүүлэх нөлөө

Коллекторын шилэн хавтан нь нийт цацралын τ хэсгийг нэвтрүүлнэ. Энэ нэвтэрсэн гэрлийн α хэсэг нь шингээгдэнэ. k коэффициенттэй материалаар дулаан тусгаарлавал ΔT температурын үед $k \cdot \Delta T \cdot A$ дулаан алдагдана. Иймээс

$$P_{\text{ашигт}} = \alpha \cdot \tau \cdot S \cdot A - k \cdot \Delta T \cdot A \quad \text{ба} \quad \eta = \alpha \cdot \tau - \frac{k \cdot \Delta T}{S}$$

Коллекторууд нь халаасан усны температур хэт өндөр байхыг шаардаагүй үед хамгийн их АҮК-тэй байдаг (Зураг 32).

Нэмэлт

Карногийн цикл

Францын инженер Сади Карно чухам ямар цикл процесс хэрэглэвэл дулааны хөдөлгүүрийн АҮК хамгийн их байх боломжтойг нээжээ.

Карногийн цикл хоёр изотерм процесс ба хоёр адиабатаас бүрддэг цикл процесс.

Карногийн циклийг P - V диаграммд дүрсэлсэн графикууд ашиглан тайлбарлая.

- Ажлын бие (1-2) изотерм тэлэлтийн үед ажлын бие (хий)-ийн хийх ажил: $A_{12} = A_{\text{тэл}} = Q_1$
- Дараагийн (2-3) адиабат тэлэлтэд ($Q = 0$) хий хөрч температур нь T_2 болж буурна.
- Ажлын бие (3-4) изотерм шахалтын үед гадны бие (бүлүүр)-ийн хийх ажил

$$A_{34} = A_{\text{шах}} = Q_2$$

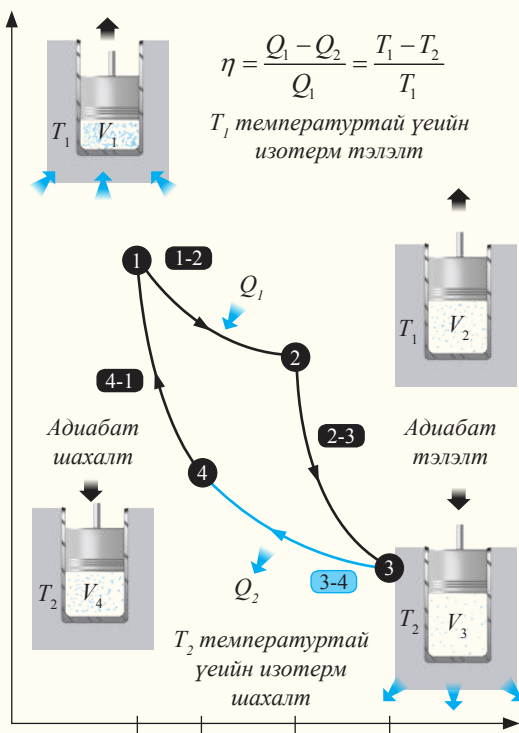
Сүүлчийн (4-1) адиабат шахалтад ($Q = 0$) хий халж температур нь T_1 болж өснө.

Энэ цикл дахин давтагдана.

Карногийн циклийн АҮК бүх төрлийн дулааны машинаас өндөр байдаг.

$$\eta_{\text{max}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Карногийн цикл ба түүний АҮК нь аливаа дулааны хөдөлгүүрийн АҮК нэмэгдүүлэхэд чухам юунд анхаарах ёстойг заасан удирдамж юм. Хөргөгчийн температурыг аль болох бууруулахын зэрэгцээ халаагчийн температурыг өсгөх ёстой.



Өөрийгөө сорриорой

1. Автомашины 15°C температурт байгаа дугуйг 190 кПа болтол хийлжээ. Машин явж байх үед дугуй доторх температур 40°C болсон бол дугуй доторх даралтыг анхны хэмжээнд оруулахын тулд агаарын хэдэн хувийг гадагш гаргах хэрэгтэй вэ? Яагаад заавал хийг гадагш гаргах хэрэгтэй юм бэ?
2. $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$ тэгшитгэлийг ямар нөхцөлд бодит хийд ашиглаж болох вэ? Хийн кинетик онолын тэгшитгэл $p \cdot V = \frac{1}{3} \cdot m_0 \cdot N \cdot \langle v^2 \rangle$. Энд хэрэглэгдэж байгаа хэмжигдэхүүнүүдийн утга учир юу вэ? Идеал хийн загварын ямар гол санаанууд дээр энэ тэгшитгэл тулгуурлаж байгаа вэ?
3. Тасалгааны температурт байгаа хийн молекулын хурд 500 м/с орчим байдаг бол өрөөний нэг өнцгөөс үнэртэй усны үнэр нөгөө өнцөгт үнэртэхэд яагаад дор хаяж минутын хугацаа шаардагддаг вэ?
4. Моль хийн эзлэхүүн $V=22.4\text{ л}$ гэж бид химийн хичээл дээр үзсэн билээ. Энэ нь тодорхой нөхцөлд үнэн байдаг. Энэ ямар нөхцөл вэ? Тооцоогоор батална уу.
5. Уурын машины хувьд яагаад орж, гарч байгаа уурын температурын ялгаа чухал байдаг юм бэ? Үүнийг тайлбарлана уу.
6. Хөргөгч дотор хүйтэн биеэс халуун бие рүү дулаан шилждэг. Энэ нь термодинамикийн 2-р хуулийг зөрчиж байгаа юм биш үү?
7. Дөрвөн цилиндртэй Отто хөдөлгүүр нэг цилиндртэйгээсээ юугаараа илүү вэ?
8. Нэг дусал усны эзлэхүүнийг үнэлнэ үү? Үүнд усны хэдэн молекул агуулагдах вэ?
9. 25 см^2 талбайтай гадаргыг 2 мкм зузаан мөнгөөр өнгөлөв. Өнгөлгөөнд мөнгөний хэдэн атом орсон бэ?
10. 373 К нь Цельсийн хэдэн градус болох вэ?
11. 20 атм даралт, 27°C температурт байгаа 20 л устөрөгч болон хүчилтөрөгч хийн массыг олно уу?
12. Баллонтой хийн даралт 52°C температуртай үед $p_1 = 2 \cdot 10^5\text{ Па}$ байсан бол ямар температуртай болоход даралт нь $p_2 = 2.5 \cdot 10^5\text{ Па}$ болох вэ?
13. Хүчилтөрөгчийн температур 320 К ба даралт нь $p = 4 \cdot 10^5\text{ Па}$ бол түүний нягтыг тодорхойлно уу. $\mu = 0.032\text{ кг/моль}$, $R = 8.31\text{ Ж/моль}\cdot\text{К}$.
14. 20°C температуртай, 1 атм даралтад байгаа 2 л агаарыг 4°C температуртай усан доор 136 м гүнд оруулбал ямар эзлэхүүнтэй болох вэ?
15. Савтай хийн даралт 2 атм , температур нь 127°C байв. Уг хийн хагасыг нь гаргахад температур нь 50°C болж буурчээ. Хийн даралт ямар болох вэ?
16. Хийн температур хоёр дахин ихсэх үед молекулын хурд хэрхэн өөрчлөгдөх вэ?
17. Хүчилтөрөгч хийн концентраци $n = 1.5 \cdot 10^{26}\text{ м}^{-3}$ бол хийн нягт ямар байх вэ?
18. Хийн молекулын дундаж кинетик энерги $2.5 \cdot 10^{-20}\text{ Ж}$ бол хийн температурыг Цельсийн хуваариар илэрхийлж олно уу.
19. Хийн дотоод энергийг хэрхэн өөрчилж болох вэ?

20. 100 г гелийг 50°C-ээс 100°C хүртэл халаасан бол хийн дотоод энергийн өөрчлөлтийг олно уу?
21. Термодинамикийн I хуулийг өөрийн үгээр тайлбарлаж хэлнэ үү.
22. Хийн эзлэхүүнийг тогтмол $p_0=10^5$ Па даралтаар хоёр дахин ихэсгэхэд хийн гадагшаа хийх ажлыг олно уу? Хийн анхны эзлэхүүнийг 5 л гэж үзнэ үү.
23. 1 моль хийн температурыг 50°C-ээс 100°C хүртэл халаасан бол хийд хийсэн ажлыг олно уу.
24. Системийн дотоод энергийг 80 Ж-аар нэмэгдүүлэхийн тулд 200 Ж дулаан өгчээ. Систем ямар ажил хийх вэ?
25. Дулааны хөдөлгүүрийн хөргүүр 27°C температуртай. АҮК нь 80% бол халаагуурын температур хэдэн градус байх вэ?
26. Мөнхийн хөдөлгүүр гэж юу вэ? Түүнийг бүтээх боломжтой юу?
27. Монгол гэрт суудаг нэг айл жилдээ ойролцоогоор 4 т буюу нэг машин нүүрс хэрэглэдэг гэж үзвэл нэг айл агаар мандалд ямар хэмжээний нүүрсхүчлийн хий ялгаруулах вэ? Нүүрсний шатах урвал $C_2+2O_2 = 2CO_2$ болно.
28. Хэрвээ айл бүр жилд хэрэглэх нүүрсээ 50%-аар хэмнэвэл нийт Монгол улсын хэмжээгээр хичнээн CO_2 -ийг агаар мандалд цацахгүй байх вэ?
29. Хэрвээ хатуу, битүүмжилсэн саван дахь агаарын Кельвиний температурыг хоёр дахин нэмэгдтэл халаавал саван дахь агаарын даралт мөн хоёр дахин өснө. Харин тэр саван дахь агаарын Цельсийн температур нь хоёр дахин нэмэгдвэл дээрхтэй нэг адил үр дүн гарах болов уу?
30. Нэг металлын хувийн дулаан багтаамжийг тодорхойлох шаардлагатай болжээ. Дээжийг жигнэхэд, жин нь 28 Н болов. Дараа нь дээжид $1.25 \cdot 10^4$ Ж дулааны энергийг өгөхөд дээжийн температур 18.0°C-ээр өссөнийг тогтоов. Дээжийн хувийн дулаан багтаамж ямар байх вэ?
31. Амьсгалах үеийн дулааны алдагдал.
Ид хүйтний улиралд хүний биеийн дулаанаа алдах зонхилох механизм бол амьсгалах бүрдээ уушгиндаа авсан агаараа халаахад энерги зарцуулах явдал юм.
 - а) -20°C температуртай өвлийн хүйтэн өдөр амьсгалах бүртээ солилцдог 0.5 л агаарыг халаахад хүний биед (37°C) хичнээн хэмжээний дулаан хэрэгтэй вэ? Агаарын хувийн дулаан багтаамж $1020 \text{ Ж/кг}\cdot\text{K}$ бөгөөд 1.0 л агаарын масс 1.310^{-3} кг.
 - б) Хэрэв нэг минутад 20 удаа амьсгалдаг бол цагт ямар хэмжээний дулаан алдах вэ?



Бүлэг 3

Цахилгаан орон ба соронзон орон

- ▶ Энэ бүлэгт бид цахилгаан орон, түүнийг хүчний шугамаар дүрслэх болон орны хүчлэг, орны потенциалаар илэрхийлэх талаар авч үзнэ. Түүнчлэн соронзон орныг индукцийн шугамаар дүрслэх болон орны индукцээр хэрхэн илэрхийлэхийг судална. Мөн цахилгаан болон соронзон оронд цэнэгт бөөмс хэрхэн хөдөлдөг, түүнийг техник технологид хэрэглэх жишээ болон байгаль дахь илрэлийн тухай үзнэ. Эцэст нь металл, хий, шингэн, хагас дамжуулагч дахь цахилгаан гүйдлийн тухай болон цахилгаан хэлхээнд тооцоолол хийх аргуудтай танилцах болно.

- ▶
 1. ЦАХИЛГААН ОРОН
 2. СОРОНЗОН ОРОН
 3. ОРЧИН ДАХЬ ЦАХИЛГААН ГҮЙДЭЛ
 4. ЦАХИЛГААН ХЭЛХЭЭ



1. ЦАХИЛГААН ОРОН



*Шарле Кулон (1736-1806)
Францын эрдэмтэн 1785 онд
цахилгаан статистикийн тулгуур
хуулийг туршилагаар нээсэн.*

хэмжээгээрээ тэнцүү байх тул атом цахилгаан саармаг төлөвт оршино. Хэрэв биеийг бүрдүүлж буй атом нэг буюу хэд хэдэн электроноо алдвал эсвэл нэмж электронтой болбол уг биеийг цэнэгтэй бие гэнэ. Цэнэгтэй биеийн цэнэгийн хэмжээг q гэвэл: $q = \pm N \cdot e$. Үүний e – эгэл цэнэг, N – эгэл цэнэгийн тоо.

Тусгаарлагдсан системд цахилгаан цэнэгийн нийлбэр буюу эерэг, сөрөг цэнэгүүдийн алгебр нийлбэр тогтмол байдаг. Үүнийг цахилгаан цэнэг хадгалагдах хууль гэнэ.

Дээрх ойлголтуудаас гадна цэнэгтэй биесийн харилцан үйлчлэлийг судлахад цэгэн цэнэг гэсэн загварыг хэрэглэдэг. Биеийн шугаман хэмжээг тооцохгүй байж болох цэнэгтэй биеийг цэгэн цэнэг гэнэ.

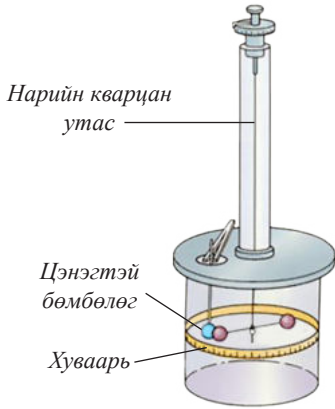
Цахилгаан цэнэгүүдийн харилцан үйлчлэл

Цэнэгтэй биесийн харилцан үйлчлэл нь байгаль дахь харилцан үйлчлэлийн нэг төдийгүй цэнэгт бөөмсийн хоорондох харилцан үйлчлэлийг гүйцэтгэдэг учир бодисын дотоодод үйлчилдэг гол хүч юм.

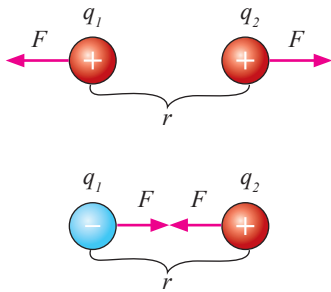
Бид биеийг цахилгаанжуулах туршилт болон бодисын цахилгаан бүтцийн талаарх мэдлэгээ ашиглан дараах зүйлсийг хэлж чадна. Үүнд:

- Байгаль дээр эерэг ба сөрөг цэнэгүүд байдаг.
- Ижил цэнэгтэй биес түлхэлцэж, эсрэг цэнэгтэй биес таталцдаг.
- Сөрөг цэнэгийг зөөгч нь электрон, эерэг цэнэгийг зөөгч нь протон байдаг.
- Цахилгаан саармаг биеийн хувьд электрон ба протоны тоо тэнцүү.

Цахилгаан цэнэгийн хамгийн эгэл хэмжээ нь $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Электрон ба протоны цэнэгийн тоон хэмжээ тэнцүү. Бүх бие атомаас тогтдог. Иймээс бүхий л биесийн бүтцэд цахилгаан цэнэг оролцдог байна. Ердийн нөхцөлд атом дахь нэмэх (+), хасах (–) цэнэгүүд



Зураг 1.



Зураг 2.

Ш.Кулон 1-р зурагт үзүүлсэн багажийг ашиглан хоёр цэнэгтэй бөмбөлгийн хоорондын харилцан үйлчлэлийг цэнэгийн хэмжээ ба хоорондын зайнаас хэрхэн хамаарч буйг судлан цахилгаан харилцан үйлчлэлийн хуулийг нээжээ. Тэрээр цэгэн цэнэгүүдийн харилцан үйлчлэлийн хүч нь цэнэгүүдийн хэмжээнд шууд пропорционал, тэдгээрийн хоорондох зайн квадратад урвуу пропорционал бөгөөд цэнэгүүдийг холбосон шулууны дагуу үйлчилдэг болохыг тогтоожээ. Үүнийг Кулоны хууль гэх ба математик илэрхийлэл нь

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Энд пропорционалын коэффициентийг Кулоны коэффициент

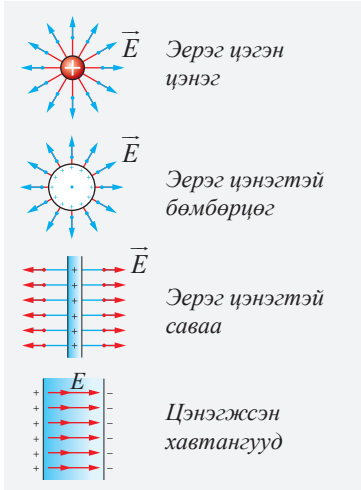
гэх ба СИ системд $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ гэж авдаг.

Үүний $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ цахилгаан тогтмол болно.

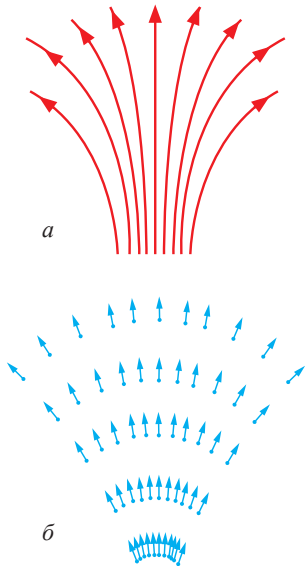
Жигд цэнэглэгдсэн бөмбөлгүүдийн харилцан үйлчлэлийг тооцоолоход бүх цэнэг нь төвдөө хуримтлагдсан гэж үзээд цэгэн цэнэг мэт төсөөлж болдог. Кулоны хүч нь бидний сайн мэдэх гравитацын хүчний адилаар харилцан үйлчилж буй биесийн хоорондох зайн квадратаас урвуу хамаардаг байна.

Кулоны хуулийг гравитацын хуультай жишвэл

Гравитацын харилцан үйлчлэл		Цахилгаан харилцан үйлчлэл	
Биесийн масс	m_1, m_2	Биесийн цахилгаан цэнэгийн хэмжээ	q_1, q_2
Биесийн хүндийн төв хоорондын зай	r	Цэнэгтэй биесийн төв хоорондын зай	r
Гравитацын тогтмол	$\gamma = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$	Цахилгаан тогтмол	$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$
Бүх ертөнцийн таталцлын хууль	$F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$	Кулоны хууль	$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$
Илрэл	Гравитацын харилцан үйлчлэлээр	Илрэл	Цахилгаан харилцан үйлчлэлээр

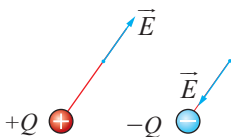


Зураг 3.



Зураг 4.

Хүчлэг нь цахилгаан орныг хүчний талаас нь илэрхийлэх вектор хэмжигдэхүүн бөгөөд нэгж нь СИ системд Н/Кл байна.



Зураг 5a.

Цахилгаан орны хүчлэг

Физик орон нь орон зай бус орон зайд орших бодит зүйл (матери) юм. Физикт материйн өвөрмөц хэлбэрийг орон гэж ойлгодог. Орныг бид харах, сонсох зэргээр мэдэрч чаддаггүй.

Цахилгаан орон цэнэгээр үүсэх ба гол шинж нь цэнэгтэй биед хүчээр үйлчилдэгт оршино. Хэдийгээр бид цахилгаан орныг мэдрэхгүй боловч түүнийг хүчний үйлчлэлээр нь илрүүлж, бас илэрхийлж болно.

Цахилгаан орон бодитойгоор оршин байдаг бол хүчний шугам үнэн хэрэгтэй байхгүй. Хүчний шугам бол цахилгаан орныг график аргаар нүдэнд харагдахуйцаар дүрслэн харуулж буй загвар юм. Тухайлбал 3-р зурагт үзүүлсэн төрөл бүрийн хэлбэртэй цэнэгтэй биеийн үүсгэх цахилгаан орны хүчний шугамын төрхөөс орны зүгээс цэнэгтэй биед үйлчлэх хүчний хэмжээ ба чиглэлийн талаар тодорхой мэдээллийг авч болно. Орны хүчний шугам нь дараах шинжийг агуулсан байдаг. Үүнд:

- Хүчний шугам ямагт эерэг цэнэг дээрээс гарч сөрөг цэнэг дээр төгсдөг. Тэд хэзээ ч огтлолцдоггүй.
- Хүчний шугамын чиглэл цахилгаан орноос цэнэгтэй биед үйлчлэх хүчний чиглэлийг заана. Сумны чиглэл эерэг цэнэгт үйлчлэх хүчний чиглэлтэй давхцана.
- Тухайн мужаар гарах хүчний шугамын тоо хэчнээн олон бол цэнэгт үйлчлэх хүчний хэмжээ төдий чинээ их байна.
- Хүчний шугам орныг үүсгэж буй цэнэгтэй биеийн гадаргад ямагт перпендикуляр байна.

Цахилгаан орны хүчний үйлчлэлийг судлахын тулд орон дотор турших эерэг цэгэн цэнэг оруулан орны цэг бүрт турших цэнэгт үйлчлэх хүчийг хэмжиж болох юм. (Зураг 4б) Туршлагын баримтаас үзэхэд, турших цэнэгт үйлчлэх хүч нь турших цэнэгийн хэмжээнээс шууд пропорционал хамаардаг байна.

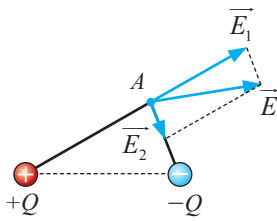
$$F \sim q$$

Хэрэв турших цэнэгт үйлчлэх хүчийг цэнэгийн хэмжээнд харьцуулбал, энэ харьцаа нь турших цэнэгээс хамаарахгүй зөвхөн орноос хамаарна. Иймд цахилгаан орныг энэ харьцаагаар илэрхийлж болох ба энэ хэмжигдэхүүнийг цахилгаан орны хүчлэг гэнэ.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Тэгвэл Кулоны хуулийг ашиглан Q цэгэн цэнэгийн орны хүчлэгийн хэмжээг олбол

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$



Зураг 5б.

Цахилгаан орны хүчлэгийн вектор нь орны хүчний шугамд үргэлж шүргэгчээр чиглэнэ.

Хэд хэдэн цэнэг орон үүсгэж байвал орнууд бие биедээ нөлөөлдөггүй, харин нэмэгддэг. Нийлбэр орны хүчлэг нь тухайн цэгт орон тус бүрийн үүсгэх орны хүчлэгийн нийлбэртэй тэнцүү байна. (Зураг 5б)

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

Үүнийг цахилгаан орны суперпозицийн буюу давхцлын зарчим гэнэ.

Жишээ бодлого Адил талт гурвалжны оройнууд дээр $+Q$, $+Q$, $-Q$ цэгэн цэнэгүүдийг байрлуулав. Гурвалжны талууд a бол түүний төв дэх орны хүчлэгийг олъё.

Алхам-1: Гурвалжны төв цэгт цэнэг тус бүрийн орны хүчлэгийн чиглэлийг тодорхойлон зурна (Зураг 6).

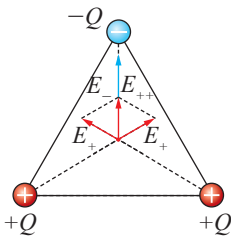
Алхам-2: Адил талт гурвалжны орой тус бүрээс гурвалжны

төв хүртэлх зай ижил $r = \frac{a}{\sqrt{3}}$, цэнэгийн хэмжээ ижилхэн

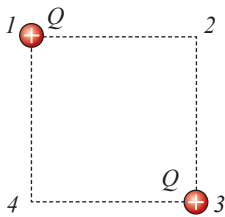
Q тул Кулоны хууль ёсоор цэнэг тус бүрийн хүчлэгийн хэмжээ тэнцүү байна. $E_{++} = E_- = k \frac{3Q}{a^2}$

Алхам-3: Зургаас $+Q$ цэнэгүүдийн орны хүчлэгийн векторууд хоорондоо 120° өнцөг үүсгэж байгаа тул тэдгээрийн вектор нийлбэр $E = k \frac{3Q}{a^2}$ тэнцүү.

Алхам-4: $-Q$ цэнэгийн орны хүчлэг $+Q$ цэнэгүүдийн нийлбэр орны хүчлэгтэй хэмжээгээрээ тэнцүү чиглэлээрээ ижил байх тул гурвалжны төвд орны хүчлэг $E = k \frac{6Q}{a^2}$.



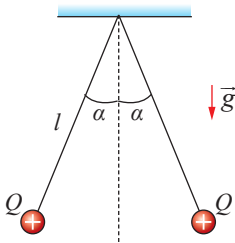
Зураг 6.



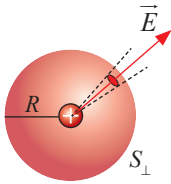
Зураг 7.

Дасгал

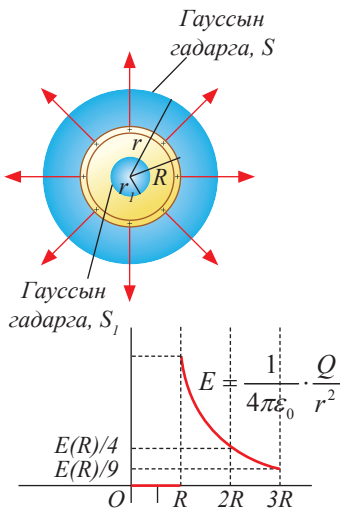
1. 5 нКл цэнэг 2 кН/Кл хүчлэгтэй цахилгаан оронд байв. Орны зүгээс цэнэгт ямар хүчээр үйлчлэх вэ?
2. Цахилгаан орон дахь 1.5 нКл цэнэгт орны зүгээс 3мкН хүч үйлчилж байсан бол тухайн цэг дэх орны хүчлэг ямар байх вэ?
3. Керосин дотор $2 \cdot 10^{-7}$ Кл ба $6 \cdot 10^{-7}$ Кл цэгэн цэнэгүүд бие биеэсээ 0.4 м зайтай байрлана. Цэнэгүүдийн төвийг холбосон хэрчмийн төв цэгт орны хүчлэгийг тодорхойл.
4. Нэгэн төрлийн цахилгаан оронд электрон $3.2 \cdot 10^{13}$ м/с² хурдатгалтай хөдөлж байв. Электроны масс $9.1 \cdot 10^{-31}$ кг, цэнэг $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл бол орны хүчлэгийг тодорхойл.
5. Ижил тэмдэгтэй 0.27 мкКл ба 0.17 мкКл хэмжээтэй цэнэгүүд хоорондоо 20 см зайд байрлана. Орны хүчлэг тэг байх цэгийн байрлалыг тодорхойл.
6. $a=30$ см талтай 1234 квадратын 1 ба 3 оройнууд дээр



Зураг 8.



Зураг 9.



Зураг 10.

- ижил $Q=2 \cdot 10^{-7}$ Кл цэнэг орших бол 2 ба 3 оройнууд дээрх цахилгаан орны хүчлэгийг тодорхойл (Зураг 7).
7. Ижилхэн m масстай металл үрлүүдийг l урттай торгон утсанд бэхэлж дүүжлэв. Үрлүүдэд ижил хэмжээний Q цэнэг шилжүүлсэн бол бие биеэсээ ямар зайд холдох вэ? Энд дэлхийн хүндийн хүчний хурдатгалыг g гэж үзнэ. Үрлийн шугаман хэмжээг тооцохгүй (Зураг 8).

Цахилгаан орны хүчлэгийн урсгал

Цахилгаан орны хэмжээ нь орны хүчний шугамын нягтад шууд пропорционал бөгөөд үүнийг цахилгаан орны урсгал хэмээх хэмжигдэхүүнээр илэрхийлдэг.

Цахилгаан орны урсгал нь орны хүчлэгт перпендикуляр гадаргын талбайг түүгээр нэвтрэх цахилгаан орны хүчлэгээр үржүүлсэнтэй тэнцүү байна.

$$\Phi_E = ES_{\perp}$$

Битүү гадарга дотор агуулагдах цэнэгийн хэмжээг цахилгаан тогтмолд харьцуулсан харьцаа нь уг битүү гадаргаар нэвтрэх цахилгаан орны урсгалтай тэнцүү байна. Үүнийг Гауссын теорем гэнэ.

$$\frac{1}{\epsilon_0} \sum_i Q_i = ES$$

Гауссын теоремийг ашиглан зөв хэлбэртэй цэнэгтэй биеийн цахилгаан орныг дурын цэгт тодорхойлж болдог.

Жишээ бодлого

Жигд цэнэглэгдсэн Q цэнэгтэй бөмбөлгийн гаднах ба доторх цахилгаан орны хүчлэгийг тодорхойлъё.

Цэнэгтэй бөмбөлгийг агуулсан түүний орны хүчлэгт перпендикуляр битүү гадарга нь $R < r$ радиустай бөмбөлөг байх тул битүү гадаргын талбай $S = 4\pi r^2$ болно.

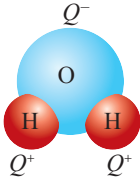
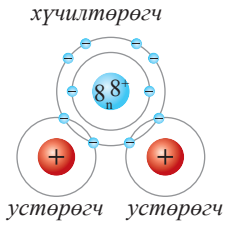
Битүү гадарга дотор цэнэглэгдсэн бөмбөлөг байх тул гадаргад агуулагдах цэнэгийн хэмжээ Q байх ба уг цэнэгийн гадарга дахь цахилгаан орны урсгал $\Phi_E = 4\pi r^2 E$ болно. Иймд Q цэнэгтэй бөмбөлөг гадаргын гадна орны

хүчлэг $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ байна. Харин жигд цэнэглэгдсэн бөмбөлгийн доторх дурын битүү гадарга бүрт цэнэг агуулагдаагүй байх тул Гауссын теорем ёсоор бөмбөлгийн дотор цахилгаан орны хүчлэг тэгтэй тэнцүү байна.

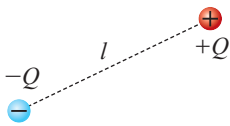
Дасгал

1. Жигд цэнэглэгдсэн R радиустай бөмбөрцгийн дотор ($r < R$) ба гадна ($r > R$) дурын цэг дэх орны хүчлэгийг Гауссын теорем ашиглан тодорхойлоорой.

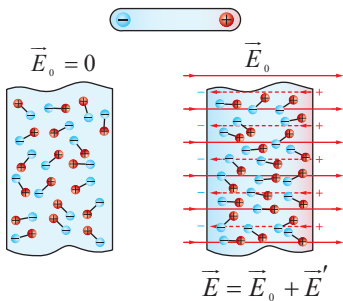
а. Бөмбөрцгийн гадна ($r > R$) цэгийн хувьд Гауссын гадарга хэлбэртэй. Гадаргын талбай



Зураг 11. Усны молекул

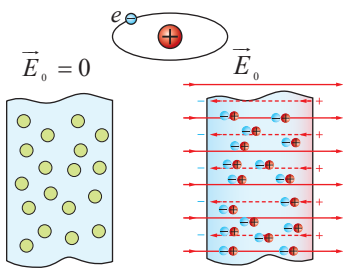


Зураг 12. Диполь



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

Зураг 13а.



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

Зураг 13б. Диэлектрикийн туйлширал

- б. Гауссын гадарга дотор агуулагдах цэнэгийн хэмжээ Гауссын теорем ёсоор бөмбөрцгийн гадна ($r > R$) цэг дэх орны хүчлэг
- в. Бөмбөрцгийн дотор ($r < R$) цэгийн хувьд Гауссын гадарга хэлбэртэй. Гадаргын талбай
- г. Гауссын гадарга дотор агуулагдах цэнэгийн хэмжээ Гауссын теорем ёсоор бөмбөрцгийн дотор ($r < R$) цэг дэх орны хүчлэг
- д. Дээрх хариултаа ашиглан жигд цэнэглэгдсэн бөмбөрцгийн орны хүчлэг E бөмбөрцгийн төвөөс тухайн цэг хүртэлх зай r -ээс хамаарах хамаарлын графикийг байгуулаарай.

Цахилгаан орон дахь металл ба диэлектрик

Цахилгаан дамжуулдаггүй бодис буюу тусгаарлагчийн дотоод бүтцийг үзвэл электронууд нь атомтайгаа баг бөх холбоотой байдаг. Иймд цахилгаан дамжуулдаггүй бодисын дотор чөлөөт электрон бараг байхгүй гэж үзэж болно.

Цахилгаан дамжуулдаггүй зарим бодисын молекулын эерэг, сөрөг цэнэг нь хоорондоо ялгарсан байдалтай байдаг. Жишээлбэл, усны молекулын хүчилтөрөгчийн атом нь устөрөгчийн атомын электроныг илүү татсанаар хүчилтөрөгчийн атом нь илүү сөрөг цэнэгтэй, устөрөгч нь эерэг цэнэгтэй болж цэнэгийн төв нь шилжсэн байдаг (Зураг 11). Ийм бодисын молекулыг туйлт молекул гэнэ. Хоорондоо тодорхой зайд орших эерэг сөрөг хос цэнэгийг диполь гэж нэрлэдэг (Зураг 12). Тусгаарлагч биеийг эмх замбараагүй байрласан олон диполиудаас тогтсон систем мэтээр загварчилж болдог. Ийм бүтэцтэй тусгаарлагч бодисыг диэлектрик (ди-хос, электрик-цэнэг) гэж нэрлэдэг.

Гадны цахилгаан оронд диэлектрикийг оруулахад дипольд үйлчлэх хос хүчний нөлөөгөөр диполиуд нь эргэж орны дагуу байрладаг (Зураг 13а).

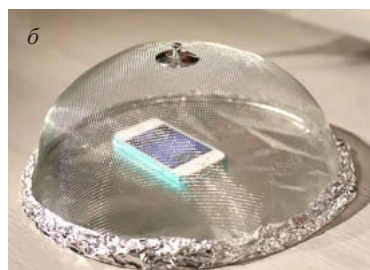
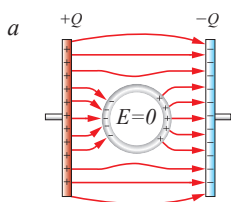
Зарим тусгаарлагч бодисын молекулын эерэг сөрөг цэнэг ялгараагүй буюу диполь хэлбэрт ороогүй байдаг. Ийм бодисын молекулыг туйлгүй молекулууд гэнэ. Ийм бодисыг цахилгаан оронд оруулахад молекулууд нь туйлширч диполь хэлбэрт ордог байна (Зураг 13б). Ийнхүү тусгаарлагч бодисыг цахилгаан оронд оруулахад диполиуд нь зүгширсэн байрлалд орох үзэгдлийг диэлектрикийн туйлширал гэдэг.

Туйлширсан диэлектрикийн төв хэсэгт эерэг сөрөг цэнэгүүд тэнцүү учир нэмэлт цахилгаан орон үүсгэдэггүй. Харин диэлектрикийн захад компенсацлагдаагүй эерэг сөрөг цэнэгүүд үлддэг. Эдгээр компенсацлагдаагүй

БҮЛЭГ 3. СОРОНЗОН ОРОН

Зарим бодисын харьцангуй диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар

Бодис	ϵ
вакуум	1.000
агаар	1.0006
цаас	2.2-4.2
хув	2.8
шил	4-12
пластик	6.1
глицерин	43
ус	80



Зураг 14.

(усталцахгүй) цэнэгүүд нэмэлт цахилгаан орон үүсгэдэг. Тэр орон нь гадны орны эсрэг чиглэлтэй байдаг. Иймээс суперпозицийн зарчмаар тусгаарлагчийн доторх цахилгаан орон сулардаг байна.

$$E = \frac{E_0}{\epsilon}$$

Диэлектрик дотор цахилгаан орон хэд дахин суларч байгааг илэрхийлэх хэмжигдэхүүнийг тусгаарлагчийн харьцангуй диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар гэнэ. Энэ нь тухайн тусгаарлагчийн шинж чанараас хамааран бодис бүрт өөр өөр байдаг. Харин вакуумд $\epsilon = 1$ байна.

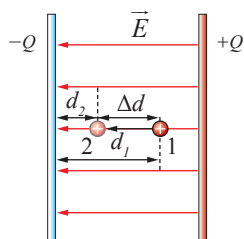
Цахилгаан оронд металл цагариг оруулбал орны нөлөөгөөр металлын чөлөөт электронууд шилжиж туйлширна. Туйлширсан чөлөөт цэнэгүүдийн үүсгэх цахилгаан орон нь туйлшруулагч орны эсрэг чиглэлтэй үүснэ. Металлын чөлөөт электроны шилжилт нийлбэр орон тэг болох хүртэл явагдана. Ингэснээр цагаргийн дотор цахилгаан орон үгүй болно (Зураг 14а). Ийнхүү гадны цахилгаан орон дотор байгаа металл биеийн дотор цахилгаан орон байхгүй учраас металлыг цахилгаан орныг халхалдаг гэж ярьдаг. Металл дотор хангалттай тооны чөлөөт электрон байдаг тул гадны оронг бүрэн халхалж чаддаг байна. Энэ чанарыг ашиглан М.Фарадей гадны цахилгаан орноос хамгаалах Фарадейн торыг бүтээсэн байдаг. Орчин үеийн барилгууд төмөр карказ бүхий бүтэцтэй баригддаг учраас зарим барилгад гар утасны сүлжээ унах тохиолдол гардаг. Учир нь барилгын төмөр карказ Фарадейн торны үүрэг гүйцэтгэн гар утасны цахилгаан соронзон долгионыг саатуулдаг ажээ.

Цахилгаан орны потенциал

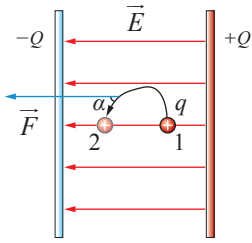
Гравитацийн орон дотор байгаа m масстай бие байрлалаасаа хамааран потенциал энергитэй бөгөөд бие татах хүчний чиглэлийн эсрэг зүгт хөдөлбөл түүнд ажил хийгдэж, потенциал энерги нь нэмэгдэнэ, харин татах хүчний чиглэлийн дагуу хөдөлбөл потенциал энерги нь хөдөлгөөний энергид хувирдаг билээ.

Цахилгаан орон дотор байгаа цэнэгтэй бие яг үүнтэй адил байрлалаас хамаарсан потенциал энергитэй байдаг. Тухайлбал хавтгай конденсаторын нэгэн төрлийн цахилгаан оронд эерэг цэнэгтэй турших цэнэгийг оруулахад түүнд $\vec{F} = q\vec{E}$ хүч үйлчилнэ. Тэгвэл цэнэгийг 15а зурагт үзүүлснээр конденсаторын доторх цахилгаан орны дагуу 1-р цэгээс 2-р цэгт шилжүүлэхэд хийгдэх ажил

$$A = qE(d_1 - d_2) = qE \cdot \Delta d$$



Зураг 15а.



Зураг 15б.

Цахилгаан орны потенциал нь орныг энергийн талаас нь илэрхийлдэг хэмжигдэхүүн юм. Потенциалын нэгж: нэг вольт (1В=1 Ж/Кл)

Хэрэв биеийг цахилгаан оронд муруй траектороор шилжүүлбэл биеийн шилжилтийг орны шугамд перпендикуляр болон параллел чиглэлд задалж болно (Зураг 15б). Орны шугамд перпендикуляр хөдлөхөд хүчний чиглэл ба шилжилт харилцан перпендикуляр тул ажил хийгдэхгүй. Иймд цахилгаан оронд цэнэглэгдсэн бие дурын чиглэлд хөдлөхөд хийгдэх ажил зөвхөн орны дагуух параллел шилжилтийн ажилтай тэнцэнэ. Орны зүгээс хийгдэх ажил нь цэнэгтэй биеийн потенциал энергийн ялгаврыг сөрөг тэмдэгтэй авсантай тэнцүү байна.

$$A = -(E_{n2} - E_{n1}) = -\Delta E_n$$

Тэгвэл нэгэн төрлийн цахилгаан оронд байх цэнэгтэй биеийн потенциал энерги дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ.

$$E_{n1} = qE \cdot d_1, E_{n2} = qE \cdot d_2$$

Цахилгаан орон дахь цэнэгтэй биеийн потенциал энергийг түүний цэнэгийн тоо хэмжээнд харьцуулбал цэнэгтэй биеэс үл хамаарах хэмжигдэхүүн гарна. Энэ харьцааг тухайн цэг дэх цахилгаан орны потенциал гэнэ.

$$\phi_i = \frac{E_{ni}}{q}$$

Бид хүчдэл буюу потенциалын ялгавар нь цэнэгийг салгахад шаардагдах энергиэр илэрхийлэгддэг болохыг мэднэ.

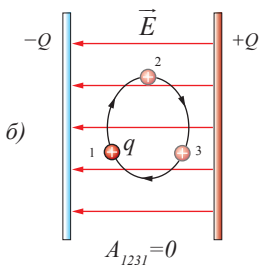
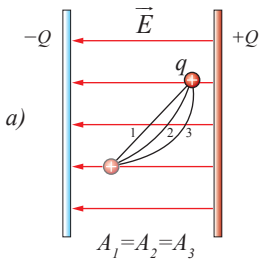
$$U = \phi_1 - \phi_2$$

Өөрөөр хэлбэл потенциал нь тодорхой цэгийн хувьд, потенциалын ялгавар нь хоёр цэгийн хувьд яригддаг гэж ойлгож болно. Цахилгаан оронд цэнэг шилжүүлэхэд хийгдэх ажил нь шилжүүлж байгаа цэнэгийн хэмжээ ба уг хоёр цэг дээрх орны потенциалын ялгавраар тодорхойлогдоно.

$$A = q(\phi_1 - \phi_2) = -q\Delta\phi = qU$$

Эндээс нэгэн төрлийн цахилгаан орон дотор цэнэгийг хоёр цэгийн хооронд шилжүүлэхэд хийгдэх ажил нь траекторын хэлбэрээс хамаарахгүй, зөвхөн эхний ба эцсийн цэгийн байрлалаас хамаарна. Мөн цэнэгийг битүү траектороор шилжүүлэн байранд нь эргүүлэн тавихад ажил хийгдэхгүй (Зураг 16).

Конденсаторын хоёр ялтсын хооронд цэнэг шилжүүлэхэд хийгдэх ажил нь нэг талаас хүчийг шилжилтээр үржүүлсэн үржвэр $A = qE \cdot \Delta r$, нөгөө талаас шилжүүлж байгаа цэнэгийг эхний болон эцсийн цэгийн потенциалын ялгавраар үржүүлсэн $A = -q\Delta\phi$ үржвэртэй тэнцүү байна. Эдгээрийг тэнцүүлж хүчлэг болон

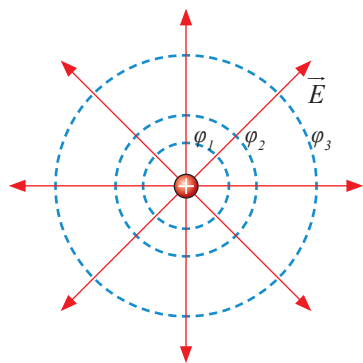


Зураг 16.

Цахилгаан оронд цэнэг шилжүүлэхэд хийгдэх ажил траекторын хэлбэрээс хамаарахгүй, эхний ба эцсийн цэгийн потенциалын ялгавраас хамаарна.

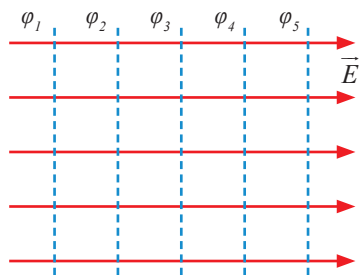


Цахилгаан орны потенциал нь тухайн цэг дэх нэгж эерэг цэнэгийн потенциал энергитэй тоон утгатай тэнцүү.



Зураг 17.

Цэгэн цэнэгийн ижил потенциалт гадарга бөмбөлөг хэлбэртэй байна.



Зураг 18.



Зураг 19.

потенциалын холбоог дараах байдлаар илэрхийлж болно.

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta r}$$

Цахилгаан орны хүчний шугам эерэг цэнэгээс сөрөг цэнэг рүү чиглэдэг бол потенциалын утга сөргөөс эерэг рүү өсдөг. Дээрх томъёоны сөрөг тэмдэг нь орны хүчлэг потенциалын өсөх чиглэлийн эсрэг чиглэдэг гэдгийг харуулдаг.

q цэгэн цэнэгийн оронд орны төвөөс r зайд байх Q

цэнэгийн потенциал энерги $E_n = Q \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$.

Тэгвэл q цэгэн цэнэгийн орны потенциал $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$.

Эндээс цэгэн цэнэгийн потенциал нь хязгааргүйд тэгтэй тэнцүү гэж авдаг. Цэнэгийг хязгааргүй хол шилжүүлэх ажил

$$A = q\varphi$$

Иймд цахилгаан орны тухайн цэг дэх потенциал нь нэгж эерэг цэнэгийг хязгааргүй хол шилжүүлэхэд хийгдэх ажилтай тэнцүү байна.

Хэд хэдэн цэнэгүүдээс тогтох системийн цахилгаан орны потенциал нь цэнэг тус бүрийн орны тухайн цэг дэх потенциалын алгебр нийлбэртэй тэнцүү.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n, \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_i}$$

Цахилгаан орны ижил потенциалтай цэгүүдийг дайруулан татсан гадаргыг ижил потенциалт гадарга гэдэг. Ижил потенциалт гадарга нь орны хүчний шугамд перпендикуляр байрладаг (Зураг 18). Ижил потенциалт гадаргын цэг бүрийн потенциал ижил учраас уг гадаргын дагуу цэнэг шилжихэд ажил хийгдэхгүй. Иймд гадаргын дурын цэгүүдэд тухайн цэнэгийн потенциал энерги ижил байна.

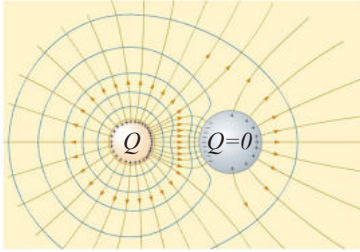
Туршилт Төрөл бүрийн хэлбэртэй электродуудын ижил потенциалт гадаргыг ашиглан цахилгаан орны хүчний шугамыг байгуулах.

Хэрэглэгдэх зүйлс: Төрөл бүрийн хэлбэртэй электродууд, гэжээл үүсгэгч, холбогч утас, туршилтын хавтан (эсвэл хавтгай ёроолтой шилэн савтай давстай ус), масштабтай цаас 2 ш, мультиметр

Ажлын дараалал:

1. Масштабтай цаас дээр шилэн сав тавьж савандаа давстай ус хийнэ. Энд давстай усны түвшин 1 см-2 см байх нь зохимжтой.

2. Устай шилэн сав дотор электродуудыг байрлуулна.



Зураг 20.

3. Тэжээл үүсгэгчийн +, - туйлуудыг электродуудтай холбоно. Энд 10 В-15 В хүчдэл ашиглана.
4. Мультиметрийн (-) туйлыг тэжээл үүсгэгчийн (-) туйл холбосон электродтой холбож (+) туйлыг потенциалыг нь тодорхойлох цэгүүдэд хаггаж хүчдэлийн утгыг хэмжинэ.
5. Ижил потенциалтай цэгүүдийг масштабтай цаас дээр тэмдэглэж, тэдгээрийг холбон зурна.
6. Уг ижил потенциалт муруйнуудад перпендикуляр муруй зурна. Энэ муруй нь электродууд хоорондох цахилгаан орны хүчний шугам бөгөөд энэ нь орны төрхийг илтгэнэ.

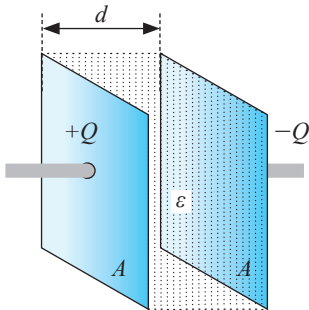


Цахилгаан багтаамж нь дамжуулагчийн потенциалыг 1 вольтоор ихэсгэхийн тулд түүнд өгч байгаа цэнэгийн хэмжээтэй тэнцүү байдаг.

$$C = \frac{q}{U}$$

Цахилгаан багтаамжийн нэгж нэг фарад.

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$$



Зураг 21.

Цахилгаан багтаамж

Бид өмнөх ангид хоорондоо диэлектрикээр тусгаарлагдсан эерэг ба сөргөөр цэнэглэгдсэн дамжуулагч буюу конденсаторыг судалж байсан билээ. Конденсатор нь цэнэг болон энерги хуримтлуулагч бөгөөд түүний энэ чанарыг цахилгаан багтаамж гэсэн хэмжигдэхүүнээр илэрхийлдэг болохыг бид мэднэ.

Цахилгаан багтаамж нь дамжуулагчийн хэлбэр хэмжээнээс ихээхэн хамаардаг. Бидний мэдэх хавтгай конденсатороос гадна бөмбөлөг, цилиндр хэлбэртэй конденсаторууд байдаг. Тэдгээрийн цахилгаан багтаамжийг Гауссын теорем ашиглан тодорхойлдог.

Жишээ: Жигд цэнэглэгдсэн хавтгай конденсаторын цахилгаан багтаамжийг олъё. Конденсаторын ялтсын талбай S , цэнэг Q , ялтаснуудын хоорондох зай d , конденсаторыг ϵ харьцангуй диэлектрик нэвтрүүлэх чадвартай бодисоор дүүргэсэн гээ.

Алхам-1: Тохиромжтой Гауссын гадаргыг сонгож конденсаторын доторх орны хүчлэгийг тодорхойлно. Хавтгай конденсаторын хувьд Гауссын гадарга ялтастай параллел хавтгай байна. Иймд

$$\frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon} = E \cdot S \quad \text{тул} \quad E = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon S}$$

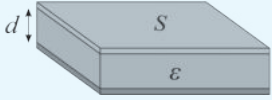
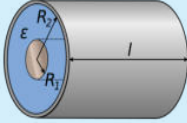
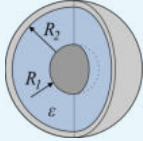
Алхам-2: Орны хүчлэг ба потенциалын холбоог ашиглан конденсаторын ялтсуудын хоорондох потенциалын ялгаврыг тодорхойлно.

$$U = \Delta\varphi = E\Delta d \quad \text{тул} \quad U = \frac{Qd}{\epsilon_0 \epsilon S}$$

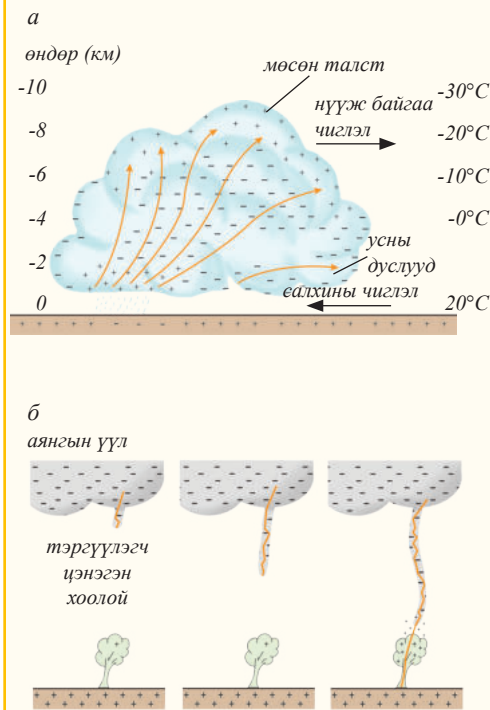
Алхам-3: Цахилгаан багтаамжийг ялтсын цэнэг ба потенциалын ялгаврын харьцаагаар тодорхойлно.

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$$

БҮЛЭГ 3. СОРОНЗОН ОРОН

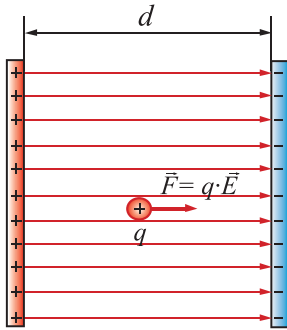
Конденсаторын төрөл	Хэлбэр	Конденсаторын цахилгаан орон	Конденсаторын багтаамж
Хавтгай конденсатор		$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon S}$	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$
Цилиндр конденсатор		$E(r) = \frac{Q}{2\pi r l \epsilon_0 \epsilon}$	$C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$
Бөмбөлөг конденсатор		$E(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0 \epsilon}$	$C = \frac{4\pi \epsilon_0 \epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}$

Нэмэлт



Зураг 22.

Аянга. Дэлхийн гадарга ба ионосферийг цэнэгтэй хавтас гэж үзвэл агаар мандал тэдгээрийг тусгаарласан диэлектрик тусгаарлагч болно. Тиймээс дэлхий маань асар том бөмбөлөг конденсатор юм. Тэгвэл агаар мандалд байгаа хүн, амьтан, автомашин гэх мэт аливаа биет цахилгаан потенциалтай байна. Иймээс аянга зайлуулагчийг өндөрлөг газар байрлуулдаг. Аянга буухад үүлнээс газар руу маш хүчтэй гүйдэл гүйх бөгөөд 50 орчим миллисекунд үргэлжилсэн 4-5 ниргэлт болдог. Аянга нь агаар мандал дахь цэнэгийн урсгалын дүнд үүсдэг. Зураг 22а-д үзүүлснээр үүлэн доторх агаарын өгсөх урсгалын нөлөөгөөр цэнэгийн ялгарал болж үүлний дээд хэсэгт эерэг цэнэгтэй мөсний талстууд, үүлний доод хэсэгт сөрөг цэнэгтэй усны дуслууд цугларна. Хэрэв эсрэг цэнэгүүд балансалсан байвал аянга үүлний хүрээнд явагдана. Харин эсрэг тохиолдолд аянгын үүлний доод талаас сөрөг цэнэгүүд түлхэгдэн газар руу унжиж улмаар уг цэнэгүүд газарт ойртоход Дэлхий дээрх электронууд түлхэгдэн хажуу тийш зайлна. Ингэснээр дэлхийгээс дээш чиглэх цэнэгийн урсгал үүлнээс доош чиглэсэн урсгалтай давхцаж аянга буудаг (Зураг 22б). Энэ үед орчны агаар 30000°C хүртэл халж маш хүчтэй тэлж үүний дүнд тэнгэрийн (аянгын) дуу үүсдэг байна.



Зураг 23.

Цахилгаан оронд хөдөлж буй цэнэгийн хөдөлгөөн

Астрофизик болон эгэл бөөмсийн физикт цахилгаан оронд хөдөлж буй цэнэгтэй бөөмсийн хөдөлгөөнийг судлах шаардлага гардаг. Параллел хоёр ялтсын хоорондох цахилгаан оронд q цэнэгтэй бөөм байсан гэж үзье. Тэгвэл q цэнэгт орны зүгээс F хүч үйлчлэх тул орны хүчлэг

$E = \frac{F}{q}$ болно. Нөгөө талаас жигд цахилгаан орны хувьд хүчлэгийг хүчдэлээр $E = -\frac{U}{d}$ гэж илэрхийлж болно.

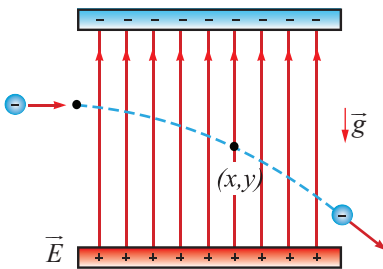
Эндээс цэнэгт үйлчлэх хүч $F = qE = -\frac{qU}{d}$ болно.

Энэ хүчний үйлчлэлээр эерэг цэнэгтэй бөөм сөрөг цэнэгтэй ялтаст татагдан эерэг цэнэгтэй ялтсаас түлхэгдэн хурдатгалтай хөдөлнө. Иймд конденсатор доторх бөөмийн

хурдатгал $a = \frac{q \cdot U}{m_e \cdot d}$.

Асуулт

1. Хэрэв протон нэгэн төрлийн цахилгаан орны шугамын дагуу хурдтай орж ирвэл тэр ямар хөдөлгөөн хийх вэ?
2. Цэнэглэгдсэн параллел хоёр ялтсын хооронд электроны цацраг орны шугамд перпендикуляраар орж ирвэл юу болох вэ? Түүний траектор ямар хэлбэртэй байх вэ?



Зураг 24.

Жишээ бодлого: m масстай $-q$ цэнэгтэй v хурдтай бөөм жигд цэнэглэгдсэн параллел ялтсуудын хооронд ялтастай параллел чигт нисч оров. Ялтсуудын хоорондох цахилгаан орны хүчлэг E ба ялтсын урт l бол бөөм конденсаторыг нэвтрэн гарахдаа анхны чигээс ямар зайд хазайхыг олъё (Зураг 24).

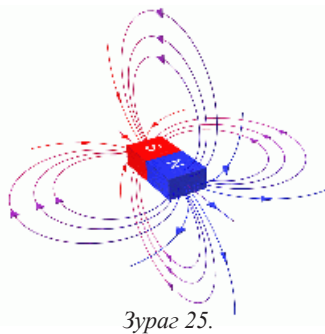
Алхам-1: Энд бөөм хоёр хэмжээст хөдөлгөөн хийх тул бөөмийн хөдөлгөөнийг x ба y тэнхлэгийн дагуу задална. Тэгвэл бөөм x тэнхлэгийн дагуу тогтмол v хурдтай жигд хөдөлгөөн, y тэнхлэгийн дагуу хүндийн хүчний ба

Кулоны хүчний үйлчлэлээр $g + \frac{qE}{m}$ гэсэн хурдатгалтай хөдөлнө.

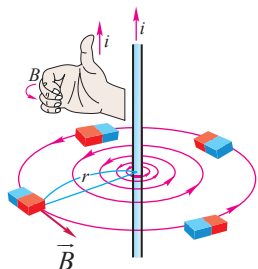
Алхам-2: Бөөмийн хөдөлгөөний кинематик тэгшитгэл бичнэ. $Ox : l = v \cdot t$ $Oy : h = \frac{at^2}{2}$

Алхам-3: Эндээс $h = \frac{1}{2} \left(\frac{l}{v} \right)^2 \cdot \left(g + \frac{qE}{m} \right)$.

2. СОРОНЗОН ОРОН



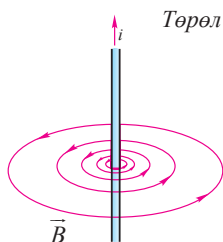
Зураг 25.



Зураг 26. Баруун гарын дүрэм

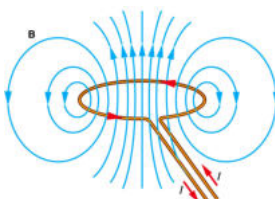
Гүйдэлтэй дамжуулагчийн соронзон орон

Тогтмол соронзон болон гүйдэлтэй дамжуулагчийн орчимд соронзон орон үүсдэг болохыг бид мэднэ. Гүйдлийн эргэн тойронд соронзон орон байгааг тогтоосон нь цахилгаан ба соронзон харилцан үйлчлэлийн хоорондын уялдаа холбоог танин мэдэх, түүнийг олон хэлбэрээр ашиглах боломжийг олгосон юм. Цахилгаан орны адилаар соронзон орныг “орны шугамаар” дүрсэлж болдог. Соронзон оронд байрлуулсан соронзон зүүний хойд туйлын чиглэлээр соронзон орны шугамын чигийг заадаг (Зураг 25). Тогтмол соронзны орны шугам нь соронзны гадна талд хойд туйлаас өмнөд туйл руу чиглэсэн байна. Баруун гарын дүрмээр гүйдлийн чиг болон соронзон орны чигийн холбоог илэрхийлдэг (Зураг 26). Цахилгаан орны адилаар соронзон орны шугам нягт газар соронзон орон хүчтэй байна. Цахилгаан орноос ялгаатай нь байгальд соронзон цэнэг байдаггүй тул соронзон орны шугам эхлэл төгсгөлгүй битүү байдаг.

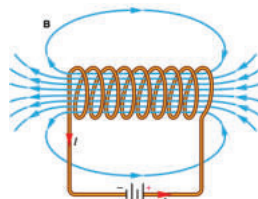


Зураг 27.
Шулуун дамжуулагч

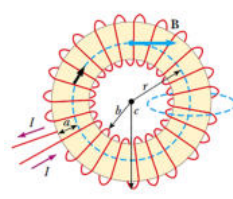
Төрөл бүрийн хэлбэртэй дамжуулагчийн соронзон орны шугамын төрх



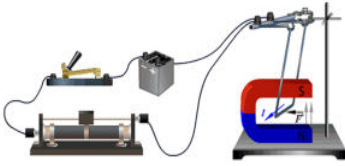
Зураг 28.
Цагариг гүйдэл



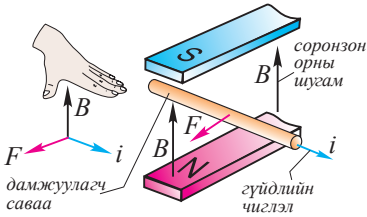
Зураг 29.
Шулуун ороомог



Зураг 30.
Торид

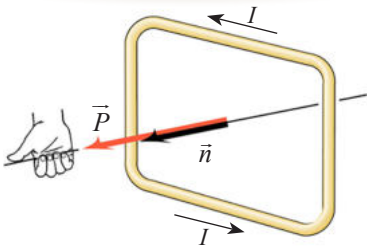


Зураг 31. Амперын туршлагын схем

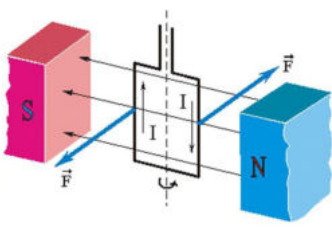


Зураг 32. Зүүн гарын дүрэм

Дэлгэсэн зүүн гарын дөрвөн хурууны дагуу гүйдэл, алга руу соронзон орон орж байхаар байрлуулахад тэнийлгэсэн эрхий хурууны дагуу дамжуулагчид үйлчлэх хүч чиглэнэ.



Зураг 33.



Зураг 34.

Амперын хүч

Соронзон үйлчлэлийн хамгийн хялбар тохиолдол нь нэгэн төрөл соронзон орон болон гүйдэлтэй шулуун дамжуулагчийн харилцан үйлчлэл юм. Энэ харилцан үйлчлэлийг анх А.М.Ампер туршлагаар тогтоосныг бид мэднэ. Нэгэн төрөл соронзон оронд оруулсан I гүйдлийн хүчтэй шулуун дамжуулагчид соронзон орноос үйлчлэх хүч дараах томъёогоор илэрхийлэгддэг.

$$F_A = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha$$

Энд, l - соронзон орон дахь дамжуулагчийн хэсгийн урт, α - соронзон орны индукц, гүйдлийн чиг хоёрын хоорондох өнцөг, B - соронзон орны индукц.

Амперын хүчний чиглэлийг зүүн гарын дүрмээр олдог. Амперын хууль нь нэгэн төрөл соронзон оронд байгаа шулуун дамжуулагчийн хувьд тохирно. Дээрх томъёоны гүйдлийн хүч ба дамжуулагчийн уртын $i \cdot l$ үржвэрийг гүйдлийн элемент гэж нэрлэдэг. Дамжуулагч шулуун биш, орон нэгэн төрөл биш байх тохиолдолд дамжуулагчийг Амперын хууль биелэхүйц жижиг Δl хэсгүүдэд хувааж тус бүрийн хувьд $i \cdot \Delta l$ гүйдлийн элементийг олж, харгалзах хүчнүүдийг тодорхойлж векторын дүрмээр нэмэх замаар дамжуулагчид үйлчлэх ерөнхий хүчийг олдог.

Цахилгаан орны хувьд цэгэн цэнэгийн тухай ойлголт оруулдаг бол, соронзон орны хувьд гүйдлийн элемент гэсэн ойлголт хэрэглэдэг байна.

Цахилгаан орныг хүчний талаас нь хүчлэг хэмээх вектор хэмжигдэхүүнээр илэрхийлдэг бол соронзон орныг орны индукцээр илэрхийлдэг. Соронзон орныг тодорхойлохын тулд цахилгаан оронд туршигч цэнэг оруулдагтай адилаар соронзон оронд гүйдэлтэй хүрээ (жааз)-г оруулдаг. Гүйдэлтэй хүрээний төвд үүссэн соронзон орон гадны соронзон оронтой Амперын хүчээр харилцан үйлчлэлцэн улмаар гүйдэлтэй хүрээнд эргүүлэх момент үүсдэг (Зураг 34). Энэ эргүүлэх моменты хэмжээг хүрээний гүйдлийн хүч ба талбайн үржвэрт харьцуулсан харьцаа нь гадны соронзон орны индукцийн хэмжээтэй тэнцүү байна.

$$B = \frac{M}{I \cdot S}$$

Хүрээний гүйдлийн хүч ба талбайн үржвэрийг хүрээний соронзон диполийн момент гэнэ. Соронзон диполийн моменты чиглэл нь гүйдлийн чиглэлтэй баруун шургийн дүрмээр холбогдох ба гүйдэлтэй хүрээний нормалийн дагуу чиглэнэ.

$$\vec{P} = I \cdot S \cdot \vec{n}$$

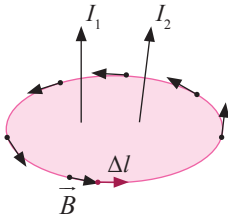
Иймд $1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ соронзон диполийн моменттой гүйдэлтэй хүрээнд $1 \text{ H} \cdot \text{m}$ -тэй тэнцүү эргүүлэх момент үйлчилж байх

БҮЛЭГ 3. СОРОНЗОН ОРОН



Соронзон оронд суперпозицийн зарчим биелдэг

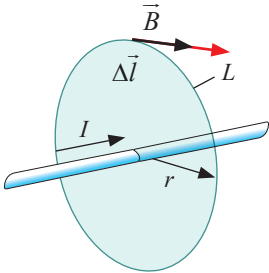
$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$



Зураг 35.



Битүү хүрээгээр авсан соронзон индукцийн циркуляци нь хүрээний талбайгаар нэвтрэх гүйдлийн хүчийг μ_0 -оор үржүүлсэнтэй тэнцүү.



Зураг 36.

Шулуун гүйдлийн соронзон индукцийг тодорхойлох

соронзон орны индукцийг түүний нэгж болгон нэг тесла [1Тл] гэж авдаг байна.

Хэд хэдэн цэнэгүүдээс тогтох системийн цахилгаан орны хүчлэг суперпозицийн зарчим ёсоор цэнэг тус бүрийн үүсгэх орны хүчлэгийн нийлбэртэй тэнцүү байдаг. Үүний адилаар хэд хэдэн хөдөлж буй цэнэг болон гүйдлээс тогтох системийн соронзон орны индукц нь тэдгээрийн тус бүрийн үүсгэх соронзон орны индукцийн нийлбэртэй тэнцүү байна.

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$

Гүйдэлтэй дамжуулагчийн үүсгэх соронзон орон нь дамжуулагчийн хэлбэрээс ихээхэн хамаардаг.

Гүйдэлтэй дамжуулагчийн үүсгэх соронзон индукцийн векторын дагуух (орны шугамын дагуу) битүү хүрээний уртыг орны соронзон индукцээр үржүүлсэн үржвэр нь уг хүрээний талбайгаар нэвтрэх гүйдлийн нийлбэрийг соронзон тогтмолоор үржүүлсэнтэй тэнцүү байна.

$$\sum_L \vec{B} \Delta \vec{l} = \mu_0 \sum_k I_k \Rightarrow Bl = \mu_0 I$$

Үүнийг циркуляцийн теорем гэнэ. Энэ хуулийг ашиглан зөв хэлбэртэй гүйдэлтэй дамжуулагчийн соронзон орны индукцийг тодорхой цэгүүдэд тодорхойлж болно.

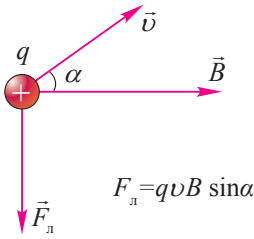
Жишээ: Шулуун дамжуулагчийн соронзон орны индукцийг түүнээс r зайд тодорхойлъё.

Алхам-1: Битүү хүрээг сонгох. Энд тухайн соронзон индукцийг тодорхойлох цэгийг дайрсан индукцийн векторын дагуу чиглэсэн тойрог хэлбэрээр сонгох нь хялбар байдаг. Тэгвэл уг хүрээний урт $L=2\pi r$ болно.

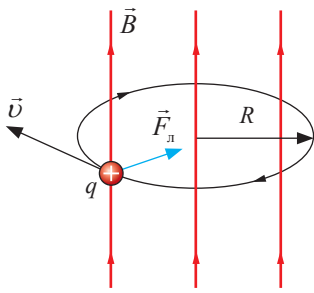
Алхам-2: \vec{B} ба $\Delta \vec{l}$ векторууд чиглэл ижил, уг битүү хүрээгээр нэвтрэх гүйдлийн хүч I тул шулуун дамжуулагчаас r зайд үүсэх соронзон индукц

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

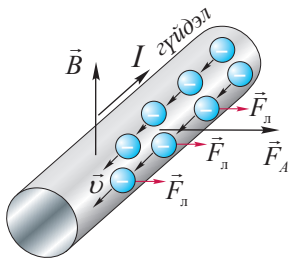
I гүйдлийн хүчтэй, R радиустай цагариг дамжуулагчийн төв дэх соронзон орон	I гүйдлийн хүчтэй, n нэгж уртад оногдох ороодостой шулуун соленоидын хөндий дэх соронзон орон
$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$	$B = \mu_0 nI$



Зураг 37. Хөдөлж байгаа цэнэгт хөндлөн чигт Лоренцын хүч үйлчилнэ



Зураг 38.



Зураг 39. Дамжуулагчийн электронуудад үйлчлэх Лоренцын хүчнүүд нийлж Амперын хүчийг үүсгэнэ

Лоренцын хүч

Соронзон оронд хөдөлж байгаа цэнэгт бөөмд соронзон орны зүгээс үйлчилж буй хүчийг Лоренцын хүч гэдэг. Лоренцын хүчний хэмжээ

$$F_n = qvB \sin \alpha$$

Үүнд q - цэнэгийн хэмжээ, v - цэнэгт бөөмийн хурд, α - соронзон орны индукц ба хурдны векторын хоорондох өнцөг.

Лоренцын хүчний чиглэлийг зүүн гарын дүрмээр тодорхойлдог. Цэнэгтэй бөөмийн хөдөлгөөний дагуу зүүн гарын дэлгэсэн хуруунууд чиглэх ба соронзон орон гарын алга руу орж байхаар байрлуулахад эрхий хуруу бөөмд үйлчлэх Лоренцын хүчний чигийг заана. Энд бөөмийн цэнэг сөрөг тохиолдолд Лоренцын хүчний чиглэлийг эсрэгээр нь авна.

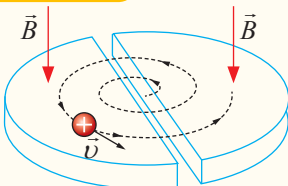
Лоренцын хүч нь бөөмийн хурд болон соронзон орны чиглэлд үргэлж перпендикуляр байх тул бөөмийн хурдны чиглэлийг өөрчлөхөөс биш (Зураг 37), хэмжээг өөрчилдөггүй. Иймээс жигд соронзон орны индукцийн шугамд перпендикуляр хурдтай цэнэгтэй бөөм тойргоор

хөдлөх (Зураг 38) ба $\alpha \neq \frac{\pi}{2}$ өнцөг үүсгэсэн хурдтай бөөм шурган хэлбэрээр хөдөлнө.

Хөдөлж буй цэнэгтэй бөөмд соронзон орны зүгээс үйлчилдэг Лоренцын хүч нь гүйдэлтэй дамжуулагчид соронзон орны зүгээс үйлчилдэг Амперын хүчийг бүрдүүлдэг (Зураг 39). Үүнийг дараах байдлаар тайлбарлаж болно.

- Дамжуулагчаар цахилгаан гүйдэл гүйхэд чөлөөт электронууд гүйдлийн эсрэг зүгт хөдөлнө. Дамжуулагчийн дотор хөдөлж байгаа электронд соронзон орны зүгээс Лоренцын хүч үйлчлэх ёстой.
- Лоренцын хүчний үйлчлэлээр электронууд тойргоор эргэхийг эрмэлзэх бөгөөд металлын оронг торын ионуудыг хөндлөн чигт мөргөнө.
- Энэ микро үйлчлэлүүд нийлээд макро хүч болж илэрдэг. Өөрөөр хэлбэл, металлын дотор урсах электронуудад үйлчлэх Лоренцын хүч нийлээд хэмжиж болох Амперын хүчийг үүсгэдэг.

Нэмэлт

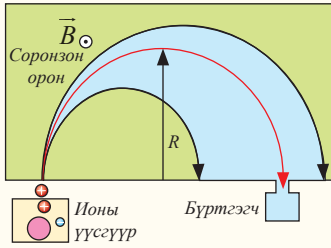


Зураг 40. Хурдасгуур

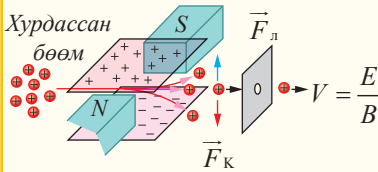
Тодорхой нөхцөлд соронзон оронд хөдөлж буй цэнэгт бөөмд тойргоор хөдлөх шинжийг ашиглан цэнэгтэй бөөмсийг хурдасгах, тэдгээрийн массыг тодорхойлоход ашигладаг.

Хурдасгуур ба масс спектрометр

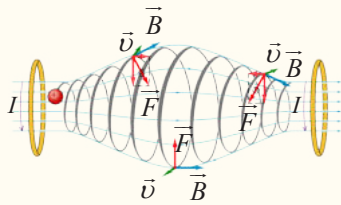
m масстай, q цэнэгтэй бөөм B соронзон индукцтэй соронзон орны нөлөөгөөр r радиустай тойргоор хөдөлнө



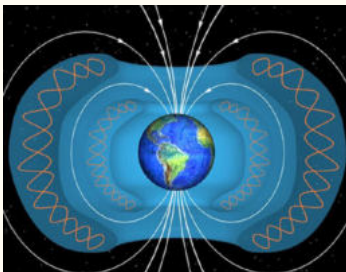
Зураг 41. Масс спектроскоп



Зураг 42. Хурдны селекторын бүрдүүвч



Зураг 43.



Зураг 44. Дэлхийн соронзон занга

гэж үзээд бөөмийн хөдлөх тойргийн радиусыг олъё. Энд бөөм тойргоор эргэх тул төвд тэмүүлэх хүч үйлчлэх ёстой. Энэ хүч Лоренцын хүчтэй тэнцүү байх

тул $qvB = \frac{mv^2}{r}$ болж бөөмийн радиус $r = \frac{mv^2}{qvB}$ болно.

Эндээс соронзон орны индукц болон түүний эргэх радиусыг өөрчлөх замаар бөөмийн хурдыг удирдаж болох юм. Ийм зарчмаар ажилладаг төхөөрөмжийг бөөмийн хурдасгуур буюу циклотрон гэдэг.

Бөөмийн өнцөг хурдыг олбол $\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$ болох ба үүнийг циклотроны давтамж гэнэ.

Масс спектроскоп нь хурдасгууртай ижил зарчмаар ажиллах бөгөөд цэнэгтэй бөөмсийн масс цэнэгийн харьцааг тодорхойлоход ашигладаг төхөөрөмж юм.

Хурдны селектор

Энэ нь цахилгаан орон ба соронзон орны үйлчлэлийг зэрэг ашиглаж цэнэгтэй бөөмсийг хурдаар нь ялгадаг төхөөрөмж юм (Зураг 42). Энд эерэг q цэнэгтэй, v хурдтай бөөм хэвтээ чигт зүүнээс баруун чиглэлтэйгээр хурдны селекторт орж ирсэн гээ. Тэгвэл түүнд үйлчлэх qE цахилгаан хүч доош, qvB соронзон хүч дээш чиглэнэ. Хэрэв энэ хоёр хүчний

хэмжээ тэнцүү бол $qE=qvB$ болж үүнээс $v = \frac{E}{B}$ болно.

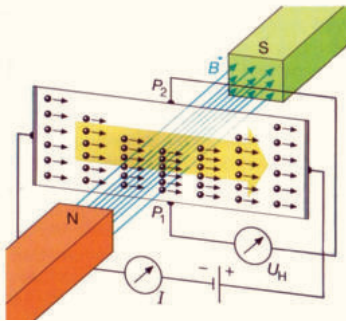
Эндээс зөвхөн ийм хурдтай бөөмс л чигээрээ хөдөлж зурагт үзүүлсэн голд байгаа жижигхэн нүхээр гарна. Үүнээс их юм уу бага хурдтай бөөмс дээш, эсвэл доош хазайдаг байна. Ингэж тодорхой хурдтай бөөмсийг ялгана.

Туйлын туяа. Жигд биш соронзон оронд цэнэгт бөөм ихэд төвөгтэй хөдөлгөөн хийдэг. Жишээлбэл, хоёр захдаа хүчтэй, дунд хэсэгтээ сулхан соронзон оронд (Зураг 43) орж ирсэн цэнэгтэй бөөмс давших шурган хөдөлгөөн хийж нэг захад хүрээд чиглэлээ өөрчлөн нөгөө тал руу мөн шурган хөдөлгөөн хийх зэргээр үргэлжлэн хөдөлнө. Ийм бүтцийг соронзон занга гэж нэрлэдэг. Энэ занганд орсон цэнэгт бөөмс гарч чадахгүй. Соронзон зангыг плазмыг “агуулах сав” болгон ашигладаг.

Нар, од болон сансрын бусад биеэс гарсан цэнэгт бөөмсийн урсгал (нарны салхи нэртэй) дэлхийд 50000 км орчим дөхөж ирээд дэлхийн жигд биш соронзон орны хүчний шугамыг ороон шурган хөдөлгөөн хийж хэдхэн секундийн дотор хоёр туйлын хооронд шилжин явна. Дэлхийн



Зураг 45. Туйлын туяа, ОХУ-Мурманск, Имандра нуур



Зураг 46.

Холлын төхөөрөмж. Лоренцын хүчний үйлчлэлээр P_1 ба P_2 гадаргын хооронд хүчдэл үүснэ.

соронзон орны шугамын нягт туйл уруу ойртоход ихэсдэг. Дэлхийгээс 300-700 км өндөрт 20-40 МэВ энергитэй протонууд, 20000-25000 км өндөрт 1 МэВ хүртэл энергитэй электронууд зонхилон оршино. Ингэснээр дэлхийг хүрээлсэн маш их цэнэгийн нягттай муж үүснэ (Зураг 44). Үүнийг радиацийн бүс гэх ба хиймэл дагуулын ачаар анх нээсэн.

Дэлхийн соронзон занганд орсон бөөмс соронзон туйлын орчимд ирэхдээ агаарын нягт хэсэгт нэвтэрч атом, молекулуудтай мөргөлдөж тэдгээрийг иончилно. Ингээд хэсэг хугацааны дараа рекомбинаци явагдаж өнгө өнгийн гэрэл цацарна. Ингэж дэлхийн хойд болон өмнөд соронзон туйлын орчимд арваад минутаас хэдэн өдрийн турш асар гоёмсгоор харагддаг туйлын туяа үүснэ (Зураг 45).

Холлын үзэгдэл

Металл эсвэл хагас дамжуулагч материал бүхий ялтсыг тэжээл үүсгэгчид холбон зурагт үзүүлснээр соронзон оронд оруулбал цэнэг зөөгчдөд Лоренцын хүч үйлчилж сөрөг цэнэгтэй электронууд дээжийн доод ёроолд цугларах ба дээжийн дээд оройн хэсэг сөрөг цэнэгээр дутагдаж эерэг цэнэгтэй болно. Ингэснээр P_1 ба P_2 цэгийн хооронд хүчдэл үүснэ. Үүнийг Холлын үзэгдэл гэх ба үүссэн хүчдэлийг Холлын хүчдэл гэнэ. Энэ үзэгдлийг 1879 онд америкийн физикч Е.Холл нээжээ. Холлын хүчдэл нь ялтсын материалын төрөл, түүгээр гүйх гүйдлийн хэмжээ, соронзон орны хэмжээ зэргээс хамаарна. Хагас дамжуулагч материалд холлын хүчдэл харьцангуй их буюу милливольтоор хэмжигдэнэ. Иймд хагас дамжуулагчийн цэнэг зөөгчийн төрөл, хөдлөц, концентрац зэрэг үзүүлэлтийг судлахад Холлын үзэгдэл тусална. Мөн бүх үзүүлэлт нь тодорхой дээжийг Холлын тэмтрүүл болгон аваад соронзон орныг хэмжихэд хэрэглэдэг.

Бодисын соронзон чанар

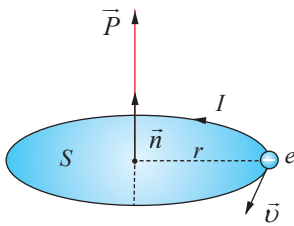
Диэлектрик орчинд цахилгаан орны хүчлэг багасдаг. Үүний адилаар орчны шинж чанараас хамааран соронзон орны индукц мөн өөрчлөгддөг. Тухайлбал төмөрлөг материалуудын дотор соронзон орон хүчтэй болдог. Орчноос хамааран соронзон орон хэд дахин өөрчлөгдөж байгааг илэрхийлсэн хэмжигдэхүүнийг орчны соронзон нэвтрүүлэх чадвар гэж нэрлэдэг. $B = \mu B_0$

Цэнэгтэй конденсаторын ялтсуудын хоорондох цахилгаан орон нэгэн төрөл байна.	Гүйдэлтэй урт шулуун ороомгийн доторх соронзон орон нэгэн төрөл байна.
Цахилгаан орны хүчлэг диэлектрик материалаас хамаарна	Соронзон орны индукц нь зүрхэвчийн материалаас хамаарна
$E = \frac{1}{\epsilon} E_0$	$B = \mu B_0$

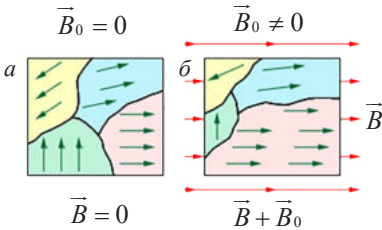
БҮЛЭГ 3. СОРОНЗОН ОРОН

Зарим орчны соронзон нэвтрүүлэх чадвар

Орчин	μ
Зэс	0.999 9936
Ус	0.999 991
Вакуум	1
Агаар	1.000 0004
Хөнгөн цагаан	1.000 002
Төмөр	300-10 000
Хэт дамжуулагч	0



Зураг 47.



Зураг 48а, б.

Үүний, B_0 нь вакуум дахь соронзон орны индукц, μ нь орчны соронзон нэвтрүүлэх чадвар, B нь орчин дахь соронзон орны индукц.

Вакуумд соронзон нэвтрүүлэх чадвар $\mu=1$ бөгөөд энэ утгатай харьцуулан соронзон материалуудыг дараах байдлаар ангилдаг.

- Диасоронзон бодис: $\mu < 1$
- Парасоронзон бодис: $\mu > 1$
- Ферросоронзон бодис: $\mu \gg 1$

Диасоронзон нь соронзон орныг сулруулдаг бол парасоронзон болон ферросоронзон материал (төмөрлөг) нь соронзон орныг хүчтэй болгодог. Ферросоронзон материалаар хийсэн зүрхэвч бүхий ороомгоор хүчтэй соронзон орныг гаргах боломжтой байдаг учраас техникийн хувьд өндөр хэрэглэтэй байдаг.

Бодисын соронзон нэвтрүүлэх чадварыг дараах байдлаар загварчлан тайлбарлаж болно. Бодисыг бүрдүүлэгч атомын цөмийг тойрон электронууд битүү замаар хөдлөх учир дугуй гүйдэл мэт үзэж болно (Зураг 47). Дугуй гүйдэл бүхэн соронзон моменттой учраас атомын бүх электроны соронзон моментын нийлбэр атомын соронзон момент болно. Чиглэл нь ижил соронзон моменттой зэргэлдээх атомууд нь соронзон домен хэмээх мужуудыг үүсгэнэ. Эдгээр доменуудын нийлбэр соронзон момент ямар байхаас бодисын соронзон чанар хамаардаг (Зураг 48а).

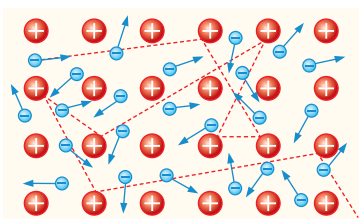
Домен нь маш олон тооны атомаас тогтсон 2-3 мм хүртэл урттай макро бүтэц юм. Ферро ба парасоронзон байнгын соронзон моменттой байдаг бол диасоронзонд байдаггүй. Бодисын пара болон диасоронзон шинж нь атомын соронзон шинжтэй холбоотой бол ферросоронзон атомын шинж чанараас илүүтэй дээжийн шинжтэй холбогддог.

Ферросоронзон материал соронзон орныг хүчтэй болгож байгаа шалтгаан нь гадны соронзон орон байхгүй нөхцөлд доменуудын үүсгэх соронзон орны чиглэл нь харилцан адилгүй учраас ерөнхийдөө соронзон үйлчлэл үзүүлэхгүй боловч ферросоронзон материалыг соронзон оронд оруулахад доменуудын соронзон момент гадны соронзон орны шугамын дагуу зонхилон байрласнаар уг бие соронзон шинж чанартай болж соронзон орны хэмжээ нэмэгдэнэ (Зураг 48б). Мөн ферросоронзны онцлог нь гадны соронзон орон үгүй үед соронзон шинжээ хадгалдаг. Харин хангалттай өндөр температурт ферросоронзон шинжээ алдаж парасоронзон болдог байна. Энэ температурыг Кюриин температур гэнэ. Энэ нь бодис бүрт өөр өөр байдаг.

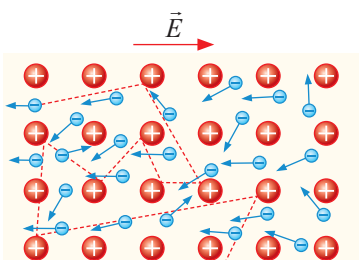
3. ОРЧИН ДАХЬ ЦАХИЛГААН ГҮЙДЭЛ

Цахилгаан гүйдэл бол цэнэгт бөөмсийн зүгширсэн хөдөлгөөн. Бөөм масстай байдгийн зэрэгцээ бас цэнэгтэй. Иймд бөөмсийг цэнэг зөөгч гэж нэрлэнэ. Хамгийн эгэл цэнэгтэй бөөм нь электрон, протон юм. Электроны цэнэгийн хэмжээ $-1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Электрон төдийгүй ионууд цэнэгтэй учир тэдгээрийг цэнэг зөөгчид гэнэ.

Ямар ч орчинд гүйдэл гүйхийн тулд цэнэг зөөгчдөөс гадна тэдгээрийг хөдөлгөх хүч үйлчлэх шаардлагатай. Цэнэгт бөөмсийг бид үүсгэхгүй, тэд устаж үгүй болдоггүй, байгаль дээр байж л байдаг. Гагцхүү хөдөлгөөн хийж чадах төлөвт л оруулах шаардлагатай. Харин цэнэгт бөөмийг яаж хөдөлгөх вэ? Тэр масстай учир гравитацын хүчээр, цэнэгтэй учир цахилгаан хүчээр үйлчилж болох юм. Гэвч бид цэнэгтэй бөөмсийн цахилгаан харилцан үйлчлэлийн хүч нь тэдгээрийн хоорондын гравитацын хүчнээс асар их болохыг мэдэх билээ. Иймд цэнэгтэй бөөмсийг хөдөлгөөнд оруулахын тулд цахилгаан хүчээр үйлчлэх нь илүү үр дүнтэй байна.



Зураг 49а.



Зураг 49б. Гүйдлийн үед электронууд зүгширсэн хөдөлгөөнд орно.

Металл дахь цахилгаан гүйдэл

Металлд атомаасаа салсан чөлөөт электронууд байдаг бөгөөд ердийн үед тэд металлын эерэг ионуудын хоорондуур эмх замбараагүй хөдөлж байдаг (Зураг 49а). Харин металл утсыг үүсгүүртэй холбовол түүний хоёр үзүүр потенциалын ялгавартай болж улмаар түүн дотор цахилгаан орон үүснэ. Энэ орны үйлчлэлээр сөрөг цэнэгтэй электронууд эерэг туйлын зүгт хөдөлнө (Зураг 49б). Харин талст торын зангилаан дээр орших ионууд байрлалынхаа орчимд зөвхөн хэлбэлзэх хөдөлгөөн хийхээс бус шилжиж чаддаггүй, иймээс бодис зөөгддөггүй.

Үүнийг баталсан туршилтыг 1901 онд Э.Рикке тавьжээ. Тэрээр хоёр зэс цилиндрийн завсарт хөнгөнцагаан хавчуулж жилийн туршид гүйдэл гүйлгээд салгаж үзэхэд зэс ба хөнгөн цагааны атомуудын харилцан нэвчилт хатуу бие дэх ердийн диффузээс хэтрээгүй байв.

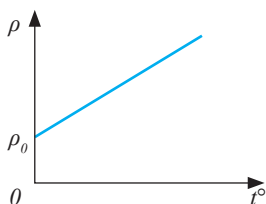
Зэс, мөнгө мэтийн дамжуулагчийн нэг атомд ойролцоогоор нэг чөлөөт электрон ноогддог бөгөөд



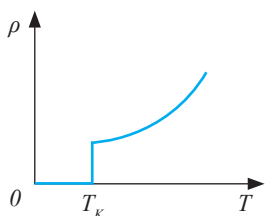
Металл дахь цахилгаан гүйдэл чөлөөт электронуудын зүгширсэн хөдөлгөөн ажээ.



Зураг 50.



Зураг 51а. Температур ихсэхэд дамжуулагчийн хувийн эсэргүүцэл нэмэгддэг



Зураг 51б. Бага температурт зарим материал эсэргүүцэлгүй болдог

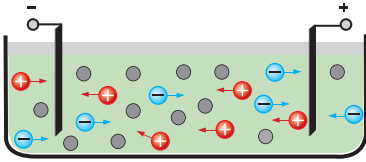
тэдний тоо маш олон буюу 1 м^3 эзлэхүүнд 10^{28} орчим байна. Чөлөөт электронууд ихээхэн хурдтай боловч ионуудтай мөргөлдөн зүг бүрт чиглэсэн тахиралдсан хөдөлгөөн хийх тул нийт электроны зүгширсэн хөдөлгөөний хурд тун бага байдаг. Тухайлбал 2 мм диаметртэй утсаар 1А гүйдэл гүйж байна гэж үзвэл 1 электроны хурд $2.3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ буюу 1 м зайг 725 минутад туулна. Гэтэл түлхүүр дармагц чийдэн асдаг. Энэ нь цахилгаан гүйдэл буюу электронуудын харилцан үйлчлэл гэрлийн хурдаар дамждаг болохыг харуулна. Энэхүү зөрчилтэй мэт байдлыг дараах маягаар загварчлан тайлбарлаж болно (Зураг 50). Урт хоолойг хэвтээ тавьж теннисийн бөмбөгөөр дүүргэнэ. Ингээд нэг талаас бөмбөг орж эхэлмэгц нөгөө талаар бөмбөг гарч ирнэ. Үүн шиг металлын дотор хаа сайгүй байгаа электронууд бүгд нэгэн зэрэг хөдөлгөөнд орно гэж үзэж болох юм.

Хэт дамжуулал

Металлыг халаахад түүний эсэргүүцэл ихэсдэг бөгөөд энэ нь шугаман хамааралтай болохыг бид мэднэ (Зураг 51а).

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot t)$$

Энд: α -г эсэргүүцлийн температурын коэффициент гэж нэрлэх бөгөөд тоон утга нь металлыг нэг градусаар халаахад харгалзах эсэргүүцлийн харьцангуй өөрчлөлттэй тэнцүү. Бүх металлд $\alpha > 0$ байдаг. Зарим материалын эсэргүүцэл маш бага температурын мужид огцом буурч тэг утгатай болдог (Зураг 51б). Ийм материалыг хэт дамжуулагч гэнэ. Анх хэт дамжуулах үзэгдлийг 1911 онд Голландын физикч Г.Каммерлинг-Оннес мөнгөн усан цагариг дээр шингэн гелий ашиглан 4.1 К температурт ажигласан бол 1986 онд шингэн азотын орчинд (77 К) илрүүлсэн. Ингэснээр хэрэглэх хүрээ нэмэгдсэн байна. Одоогоор хэт дамжуулагчийг CERN-д бөөмийн хурдасгуурт, Японд хурдан галт тэргэнд (JR maglev), цөмийн соронзон резонансын аргаар (MRI) хүний дотоод эрхтнүүдийн зураг авах багажид (Улаанбаатарын төв эмнэлгүүдэд байдаг) ашиглаж байна. Эдгээр төхөөрөмжид шаардагддаг асар хүчтэй соронзон орныг үүсгэх ороомог хийхэд хэт дамжуулагчийг хэрэглэдэг. 2012 онд тасалгааны температурт хэт дамжуулах шинж тэмдгийг ажигласан тухай мэдээлсэн.



- ⊖ Сөрөг ион
- ⊕ Эерэг ион
- Саармаг атом

Зураг 52.

Гүйдэл гүйх боломжтой шингэнийг электролит гэнэ.



Шингэн дэх цахилгаан гүйдэл бол эерэг, сөрөг ионуудын харилцан эсрэг зүгт чиглэсэн зүгширсэн хөдөлгөөн юм.



Майкл Фарадей
(1791-1867)

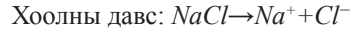
Английн физикч, химич.

Электролизын хуулийг 1833-1836 онд нээсэн. Мөн цахилгаан соронзон индукцийн үзэгдэл болон электрохимийн салбарт томоохон нээлтүүд хийжээ.

Шингэн дэх цахилгаан гүйдэл

Шингэнээр цахилгаан гүйдэл гүйхийн тулд цэнэг зөөгч хэрэгтэй. Давс, хүчил, шүлтийн усан уусмал л гүйдлийг дамжуулдаг. Бодис уусах үед усны молекулын үүсгэх цахилгаан орны үйлчлэлээр ууссан бодисын молекулууд эерэг, сөрөг ионууд болон задардаг. Энэ үзэгдлийг электролит диссоциаци гэдэг. Үүнд усны молекулын нэгэн онцгой чанар оршино.

Диссоциацийг томъёолон харуулбал



Савтай электролитэд дүрсэн хоёр электродод хүчдэл өгч цахилгаан орныг үүсгэвэл, эерэг ионууд сөрөг электрод-катодын зүг, сөрөг ионууд эерэг электрод-анодын зүг хөдлөн гүйдлийг дамжуулна. Иймд электролит ионон дамжуулалттай. Ийнхүү шингэн дэх гүйдэл ионуудаас бүрэлдэх ажээ. Гэтэл шингэнтэй холбогдсон металл хавтангууд ба дамжуулагч утсан дотор ионууд шилжин явж чадахгүй, тэдгээрт гүйдэл хөдөлж яваа электронуудаар л үүснэ. Ионон цэнэг зөөгч электронон цэнэг зөөгч болж солигдох үйл явц ялтас ба электролитын нийлэх гадарга дээр явагдана.

Электролитыг халаавал диссоциаци идэвхжиж эерэг, сөрөг ионууд олноороо үүсэх учир цахилгаан дамжуулал сайжирна, өөрөөр хэлбэл эсэргүүцэл буурна. Иймд электролитын эсэргүүцэл температураас урвуу хамааралтай буюу α нь сөрөг тэмдэгтэй.

Анод руу ирж байгаа анион хэмээн нэрлэдэг сөрөг ионууд илүүдэл электроноо анодод өгнө. Катод руу очиж байгаа катион гэж нэрлэдэг эерэг ионууд дутуу электроноо катодоос авна. Үүний дүнд электрод дээр электролитыг бүрдүүлж байгаа бодисууд ялгарна. Энэ үзэгдлийг электролиз гэнэ.

1836 онд М.Фарадей туршилтаар электролизын үед электрод дээр ялгарсан бодисын масс нь электролит дундуур өнгөрсөн цэнэгээс шууд хамаардаг болохыг тогтоожээ.

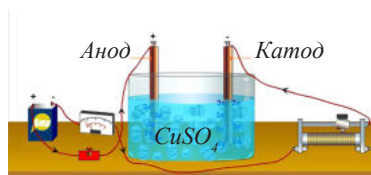
$$m = k \cdot \Delta q = k \cdot I \cdot \Delta t$$

Үүнийг Фарадейн 1-р хууль гэнэ. Энд k коэффициентийг бодисын цахилгаан химийн эквивалент гэдэг бөгөөд $\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$ нэгжтэй. Мөн элементийн цахилгаан химийн эквивалент нь түүний атом жин A -аас шууд, валентын тоо n -ээс урвуу хамааралтай байна. Үүнийг Фарадейн 2-р хууль гэнэ.

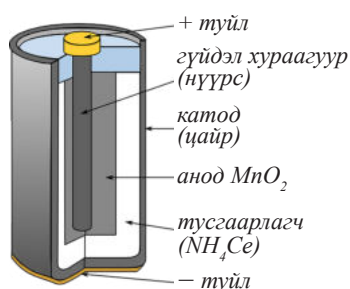
Цэнэг зөөгч нь масстай агаад цэнэгтэй учир зөөгдсөн бодисын хэмжээ нь цэнэгийн хэмжээнээс шууд хамаардаг.

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n}$$

Үүний, $F=96500 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ Фарадейн тоо.



Зураг 53.



Зураг 54. Хуурай зай

Электролизын үзэгдлийг техникт өргөн ашигладаг. Тухайлбал, ямар нэг биеийн гадаргыг металлаар бүрэх, цэвэр металл гарган авах, металлыг цэвэршүүлэхэд ашигладаг. Тухайлбал Эрдэнэтийн “Эрдмин” үйлдвэр электролизын аргаар агуулга багатай хүдрийн овоолгоос цэвэр зэс ялган авч экспортод гаргадаг ба зарим бүтээгдэхүүн үйлдвэрлэдэг.

Туршилт Мензурк, зэсийн байван (CuSO_4), тэжээл үүсгэгч, зэс электрод, амперметр, секундомер ашиглан Фарадейн тоог тодорхойлох туршилтыг төлөвлөж, гүйцэтгээрэй (Зураг 53).

Санамж: Зэсийн байван (CuSO_4)-аас анод дээр зэс дангаараа ялгарна.

Гальвани элементүүд

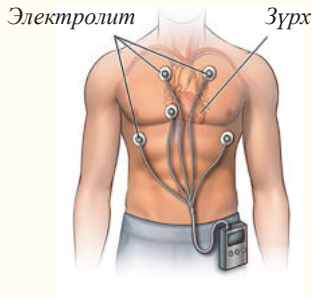
Электролит дотор металл электрод оруулбал уусмал ба металлын хооронд потенциалын ялгавар үүснэ. Үүнийг цахилгаан химийн потенциал гэнэ. Хэрэв электролитэд хоёр өөр металл электродыг дүрвэл тэдгээрийн хооронд потенциалын ялгавар үүснэ. Өөрөөр хэлбэл нэг металл электрод дээр анионууд цугларч уг электрод сөргөөр цэнэглэгдэнэ. Нөгөө металл электрод электроноо катионуудад өгч эерэг цэнэгтэй болно. Ингэж цэнэглэгдсэн электродууд ба электролитын хооронд тэнцвэр тогтоно. Янз бүрийн металлд тэнцвэр харилцан адилгүй тогтоно. Иймд металлын хос бүрийн үүсгэх хүчдэл ялгаатай. Ингэж хүчдэл үүсгэдэг байгууламжийг зай буюу гальвани элемент гэдэг. Бидний мэдэх хуурай зайн ерөнхий бүтцийг Зураг 54-д харуулав.

Металл хавтсуудыг электролитын гадуур дамжуулагчаар холбоход гүйдэл гүйж тэнцвэр алдагдан хавтсууд уусах, тусгаарлагч давхаргаар хучигдах зэргээр өөрчлөгдөнө. Электролит ч бас элэгдэж хорогдон өөр болно. Ингэснээр зай цэнэгээ алдаж үүргээ гүйцэтгэж чадахгүйд хүрнэ.

Зарим металлын хувьд гарсан өөрчлөлтийг эсрэг чиглэлтэй гүйдлээр буцаан сэргээж болдог. Ийм зайг аккумулятор гэнэ. Хүснэгтэд усан уусмалд дүрсэн янз бүрийн металлын, устөрөгчөөр зайлсан цагаан алттай харьцангуй үүсгэх хүчдэлийг харуулав. Хоёр металлын хоорондох хүчдэлийг харгалзах хүчдэлүүдийн ялгавраар олно.

Электродын материал	Устөрөгчтэй харьцангуй хүчдэл, В
Литий	-3.02
Калий	-2.92
Нагрий	-2.71
Магний	-2.35
Цайр	-0.76
Төмөр	-0.41
Кадмий	-0.40
Никель	-0.25
Хар тугалга	-0.13
Устөрөгч	0.00
Зэс	+0.34
Мөнгө	+0.80
Мөнгөн ус	+0.86
Цагаан алт	+1.20
Алт	+1.42

НЭМЭЛТ



Зураг 55а.



Зураг 55б.

Хүний биеэр тархсан олон тэрбум мэдрэлийн эс цахилгаан дамжуулагч юм. Тэдгээрийг цувуулж тавьсан гэж үзвэл Саранд хүрээд буцаж ирэхээр урттай. Ихэнх мэдрэлийн эс (60 тэрбум орчим) төрөхөд үүссэн байдаг. Өдөрт зуун мянгаараа үхэж дахин төлждөггүй. Тэдгээрийн ихэнх нь тархи ба нугасанд байрлана. Мэдрэлийн эсээр цэнэг шилжиж байх тул өөр эстэй харьцангуй хүчдэл үүснэ. Энэ хүчдэл цахилгаан дохионы үүсгүүр болно.

Зүрх мэдрэлийн эсээс ирэх цахилгаан дохиогоор удирдагдана. Хүчдэлийн импульсэн дохиог зүрх өөрөө үүсгэнэ. Энэ дохиог гар, хөлийн арьсанд дээр мэдрэгч тавих замаар хэмжиж болно (Зураг 55а). Дохионы дүрс бичлэгийг (Зураг 55б) мэргэжлийн эмч задлан шинжилж өвчний онош тавина.



Зураг 56.

Хий дэх цахилгаан гүйдэл

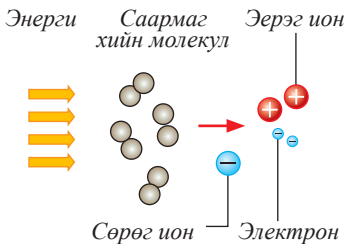
Хавтгай конденсаторыг электроскоптой холбоод цэнэглэе (Зураг 56). Жирийн нөхцөлд агаар хуурай байхад электроскопын зүү хазайсан хэвээр байсаар байх болно. Энэ нь агаар сайн тусгаарлагч болохыг харуулна. Одоо конденсаторын ялтсууд хооронд асаасан лаа оруулбал электроскопын зүү төдхөн тэгийг заана. Тэгэхээр халсан агаар гүйдэл дамжуулдаг ажээ. Хэрхэн агаар гүйдэл дамжуулсныг тайлбарлая.

Хийг халаахад түүний атом молекулуудын хөдөлгөөн ихэсч улам бүр хурдан болсоор бие биетэйгээ мөргөлдөж электроноо алдаж ионжино. Энэ үзэгдлийг хий иончлогдох гэнэ (Зураг 57). Хийг иончлохын тулд энерги өгөх хэрэгтэй. Энергийг халаахаас өөр аргаар, жишээлбэл, хэт ягаан гэрлээр шарах, хүчтэй цахилгаан орноор үйлчлэх зэргээр өгч болно.

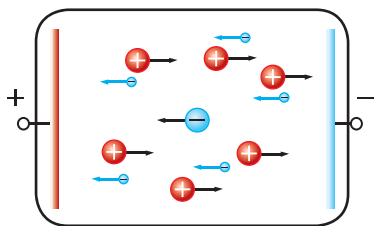
Электродуудын хооронд үүссэн цахилгаан орны үйлчлэлээр электрон болон сөрөг ионууд анодод, эерэг ионууд катодод татагдан хөдөлнө (Зураг 58). Үүний дүнд хийгээр гүйдэл гүйнэ.

Электродуудад хүрч очсон ионууд дутуу электроноо авч, эсвэл илүү электроноо алдаж хийн атомыг үүсгэн хоолойн дотор дараагийн мөргөлдөөн болтол тэнүүчлэн явна. Хийгээр гүйдэл гүйхэд бодис ялгардаггүй онцлогтой.

Хийгээр гүйдэл гүйх үзэгдлийг хийн ниргэлэг гэдэг. Хийг иончлох үйлчлэл хүчтэй бол гүйдэл их байна. Хийн хоолойд өгсөн хүчдэл их биш байхад иончлох

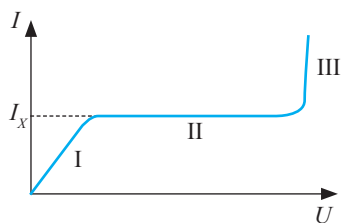


Зураг 57.



Зураг 58.

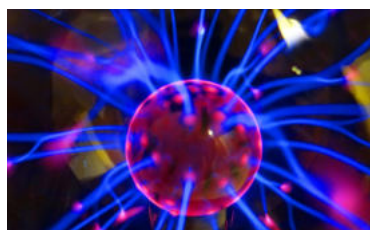
Хийд эерэг ион, сөрөг ион, электрон гүйдэлд оролцоно.



Зураг 59.



Зураг 60.



Зураг 61. Плазм



Зураг 62.

үйлчлэлийг зогсоовол гүйдэл гүйхээ болино. Үүнийг бие даагаагүй ниргэлэг гэнэ. Хүчдэл ихээхэн хэмжээтэй болоход цахилгаан орны үйлчлэлээр электронууд маш их хурдтай болж улмаар хийн атомуудыг мөргөн иончилно. Ингэснээр иончлох үйлчлэл зогссон ч хийгээр гүйдэл гүйсээр байна. Үүнийг бие даасан ниргэлэг гэдэг.

Хийн хоолойн хүчдэл-гүйдлийн хүчний хамаарлыг судалъя (Зураг 59). Энд гурван онцлог муж байна.

- I. Шугаман муж. Энд Омын хууль биелнэ. Цэнэг зөөгчид үүсэх болон үгүй болох үйл явц тэнцвэржсэн байна.
- II. Ханалтын муж. Бараг бүх чөлөөт цэнэг зөөгч гүйдэлд оролцож гүйдлийн хүч ханасан утгандаа хүрнэ.
- III. Мөргөлтөөр иончлогдох муж. Цэнэг зөөгчдийн урсгал огцом ихсэнэ. Цэнэг зөөгчдийн өөр хоорондоо болон атомтай хийх мөргөлтийн завсарт кинетик энерги нь их болж молекулыг иончилно. Ингэснээр цэнэг зөөгчдийн тоо үер мэт нэмэгдэж үүссэн ионууд өөрсдөө хурдсан цэнэг зөөгчдийг төрүүлнэ. Үүний дүнд бие даасан ниргэлэг явагдана.

Мэдээлэл

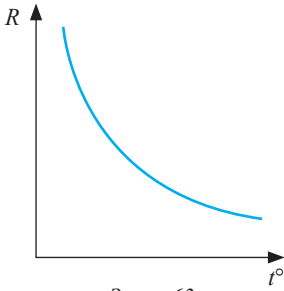
Урт шилэн хоолойн хоёр үзүүрт хавтгай металл электродууд зоож өндөр хүчдэлийн үүсгүүртэй холбоно. Хоолойг битүүлж агаарыг насосоор соруулан сийрэгжүүлэхэд даралт багасан гүйдэл гүйж хий гэрэлтэж харагдана. Хоолойг инертийн хийгээр дүүргэвэл хий амархан иончлогдох ба гүйдэл гүйн хий гэрэлтэнэ. Хоолой дахь хийн төрлөөс хамаарч янз янзын өнгөөр гэрэлтдэг. Хийн хоолойг хотын реклам чимэглэлд өргөн хэрэглэнэ (Зураг 60).

Плазм

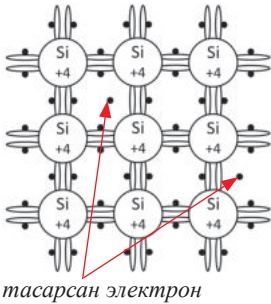
Хэсэгчлэн юм уу бүрэн иончлогдсон хийг плазм гэнэ. Плазм нь бодисын дөрөв дэх төлөв бөгөөд олон онцгой шинжтэй. Орчлон ертөнц дээрх бүх бодисын 99% орчим нь плазм төлөвт оршдог. Одод хийгээд тэдгээрийн хоорондох орчин тэр чигээрээ плазм. Манай дэлхийг ч плазм хүрээлэн оршино. Дэлхий орчмын огторгуйд плазм нарны шуурга хэлбэрээр байхын зэрэгцээ дэлхийн радиацийн бүслүүр болон цэнэгт мандлыг үүсгэнэ. Бидний үзсэн хийн хоолойд мөн плазм үүснэ. Тэр бүү хэл металлын чөлөөт электронууд плазмд байдаг олон шинжийг агуулдаг байна.

Хагас дамжуулагч дахь цахилгаан гүйдэл

Материалыг гүйдэл дамжуулах чадвараар нь дамжуулагч, тусгаарлагч, хагас дамжуулагч гэж ангилдаг. Хагас дамжуулагч бол цахилгаан дамжуулах чадвараараа дамжуулагч тусгаарлагч хоёрын дунд оршдог материал юм. Материалын хувийн эсэргүүцэл нь 10^{-8} - 10^{-4} Ом·м бол дамжуулагч, 10^{-4} - 10^3 Ом·м бол хагас дамжуулагч,

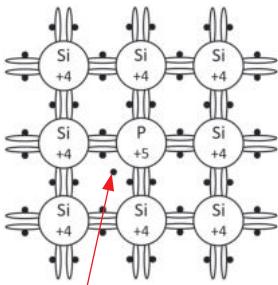


Зураг 63



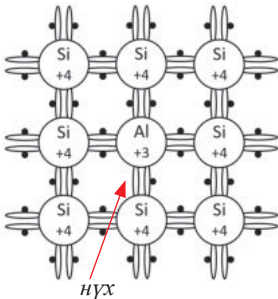
тасарсан электрон

Зураг 64а. Дулааны үйлчлэлээр суларсан электронууд



илүүдэл электрон

Зураг 64б. Фосфороос илүүдэж суларсан электрон



нүх

Зураг 64в. Хөнгөн цагаанаас дутсан электроны нүх

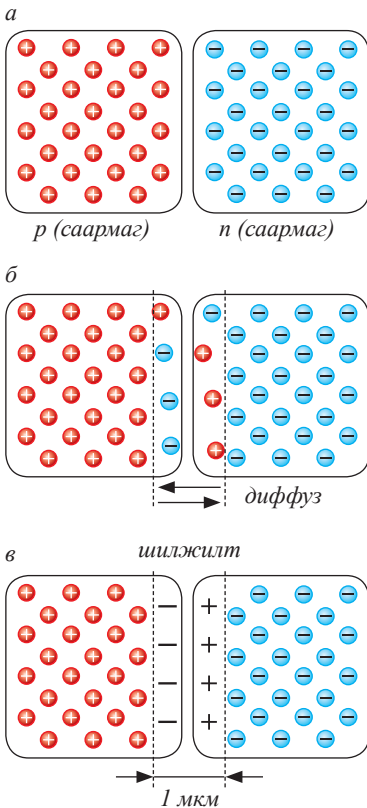
10^4 - 10^{21} Ом·м бол диэлектрик гэж ангилдаг.

Хагас дамжуулагчийн эсэргүүцэл температураас хэрхэн хамаарахыг судалъя.

Харандааны балны хугархай авч хоёр үзүүрт нь дамжуулагч утас холбож омметртэй холбоно. Түүнийг нэрмэл устай аяганд хийж халаана. Температур ихсэхэд металлтай адил атомуудын хэлбэлзлийн далайц нэмэгдэж электроны хөдөлгөөнд учрах саад их болно. Гэтэл туршлагын баримтаас үзэхэд температур ихсэхэд эсэргүүцэл буурдаг байна (Зураг 62). Ийнхүү температур нэмэгдэхэд металлын эсэргүүцэл өсдөг атал харандааны балных буурдаг ажээ. Учир нь харандааны бал нүүрстөрөгч буюу хагас дамжуулагч юм. Хагас дамжуулагч материал абсолют тэг температурт бүрэн тусгаарлагч болох бөгөөд түүнд чөлөөт электрон байхгүй, бүх валентын бүсийн электронууд атомын холбоост оролцож байдаг. Харин түүнийг халааж эхэлмэгц дулааны энергийн нөлөөгөөр валентын бүсийн электронууд сугаран чөлөөт электрон буюу дамжууллын электрон болж, цахилгаан гүйдэл дамжуулахад оролцоно. Халаах тутам электроны тоо нэмэгдсэнээр эсэргүүцэл буурдаг байна (Зураг 63).

Орчин үеийн электрон төхөөрөмжүүдийг бүтээдэг хамгийн гол материалууд бол хагас дамжуулагч цахиур болон германи юм. Эдгээр нь нүүрстөрөгчийн адил үелэх системийн 4-р бүлгийн элементүүд. Электроникт цахиурыг илүү өргөн хэрэглэдэг учир цахиурын эрин, цахиурын хөндий гэх нэршил хэрэглэгдэх болжээ. АНУ-ын Калифорни мужид байх цахиурын хөндий гэгдэх газар нь цахиур олборлодог газар бус, электроникийн гигант компаниуд оршдог учраас бий болсон нэр юм. Цэвэр цахиур бол тийм ч чухал биш. Харин цэвэр цахиурт doping буюу хольцлох аргаар гаднын атомууд оруулбал цахилгаан дамжуулалт нь эрс сайжирдаг.

Цахиурын оронт тор дотор фосфорын 5 валентын электронтой атом оруулбал түүний 4 электрон ковалент холбоост оролцох ба илүү нэг электрон нь чөлөөт электрон болно (Зураг 64б). Оруулсан атом бүрийн тоогоор чөлөөт электронууд бий болж, материалын цахилгаан дамжуулах чадвар сайжирна. Ийм электрон буюу сөрөг цэнэгтэй цэнэг зөөгч бүхий хагас дамжуулагчийг n (negative) төрлийнх гэж нэрлэдэг. Харин цахиурын оронт тор дотор хөнгөнцагаан мэтийн валентын 3 электронтой атом оруулбал нэг электрон ковалент холбоост дутсанаар нэг электроны орон зай буюу “нүх” үүснэ (Зураг 64в). Энэ орон зай руу хажуугийн электрон маш амархан татагдан орох учир нүх байрлалаа өөрчилдөг байна. Электронууд нүх рүү орох хэлбэрээр маш богино зайд шилжиж



Зураг 65.

байхад нүх маш хол шилжиж чадаж байгаа учир нүхэн дамжуулалт гэж нэрлэдэг. Электрон дутуу учраас нүх бол эерэг цэнэгтэй цэнэг зөөгчид тооцогдоно. Ийм төрлийн хагас дамжуулагчийг p (positive) төрлийнх гэнэ.

Электрон нүхний шилжилт

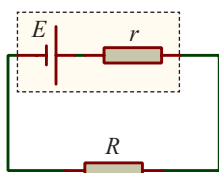
Жирийн үед n, p төрлийн хагас дамжуулагчууд цахилгаан саармаг (Зураг 65а). Тэдгээрийг хооронд нь залгахад онцгой шинж чанартай завсрын муж үүсдэг. Энэ мужийг $p-n$ шилжилт буюу электрон-нүхний шилжилт гэж нэрлэдэг. n мужид олон тоотой байгаа электронууд p мужид нэвчинэ. p мужид олон байгаа нүхтэй цөөн тооны электрон рекомбинацална. p мужид тоогоор олон байгаа нүхнүүд бас n мужид нэвчих ба зарим нь олноороо байгаа электронтой рекомбинацална. Үүний дүнд заагийн хоёр талын муж дахь цэнэг зөөгчдийн тоо цөөрнө (Зураг 65б). Энэ завсрын үеийг шилжилтийн буюу цэнэг зөөгчөөр ядуурсан муж гэж нэрлэнэ. Учир нь n муж электроноор, p муж нүхээр ядуурсан.

Тухайн мужийн хувьд үндсэн биш цэнэг зөөгчид орж ирснээр заагийн орчим дахь хагас дамжуулагчийн нимгэн үе цахилгаан саармаг чанараа алдана. Тухайлбал, n мужийн талаас электрон явж нүх орж ирсэн тул эергээр, p мужийн талаас нүх явж электрон ирсэн тул сөргөөр цэнэглэгдэнэ. Ийнхүү шилжилтийн мужид потенциалын ялгавар үүснэ (Зураг 65в). Энэ хүчдэл электрон нүхний цаашдын шилжилтэд саад болох тул саадын потенциал гэдэг. Орчин үед $p-n$ шилжилтээр төрөл бүрийн хагас дамжуулагч диодууд, нарны зай, транзисторуудыг үйлдвэрлэдэг.

Дасгал

1. Дамжуулагчаар гүйх гүйдлийн хүч $I=10$ А байсан бол $t=1$ цаг хугацаанд дамжуулагчийн хөндлөн огтлолоор шилжих электронуудын массыг ол.
2. 1.44 мм² хөндлөн огтлолтой хөнгөнцагаан дамжуулагчаар 1 А гүйдэл гүйсэн бол дамжуулагч дахь цахилгаан орны хүчлэгийг тодорхойл.
3. Богино холболтын улмаас дамжуулагч шатав. Яагаад шатаж байгаа хэсгийг хүчдэлээс салгаагүй байхад усаар буюу галын хороор унтрааж болохгүй вэ?
4. Электролизын үзэгдэл 30 минут үргэлжлэв. Гүйдлийн хүч 2 А байсан бол ялгарсан хөнгөнцагааны хэмжээг тодорхойл.
5. Зэсийн байвангийн уусмалаас (CuSO_4) 10 В хүчдэлд зэс ялгаж байв. Тэгвэл 1 кг зэс ялгахад ямар хэмжээний цахилгаан энерги шаардлагатай вэ? Энергийн алдагдлыг тооцохгүй.

4. ЦАХИЛГААН ХЭЛХЭЭ



Зураг 66.

1 Кл цэнэгт 1 Ж энерги олгож байвал 1 вольт цахилгаан хөдөлгөгч хүчтэй гэж үзнэ.

Гадаад хэлхээнд цахилгаан энерги өөр энергид хувирч байдаг бол тэжээл үүсгэгч дээр өөр энергийг цахилгаан энергид хувиргадаг.

Бүрэн хэлхээний Омын хууль

Цахилгаан цэнэг их потенциалтай цэгээс бага потенциалтай цэг рүү шилжиж гүйдэл үүсгэнэ. Иймээс гүйдлийг тогтмол байлгахын тулд потенциалын ялгаврыг байнга барьж байх гүйдэл үүсгэгч хэрэгтэй. Битүү хэлхээнд бага потенциалтай цэгээс их потенциалтай цэгт цэнэг шилжүүлж гүйдлийг байнга үргэлжлүүлж байх үүрэгтэй цахилгааны биш гаралтай энергийн өөр эх үүсвэр байх ёстой. Цахилгаан орны хүчний эсрэг цэнэг шилжүүлэх нь зөвхөн гадны энерги зарцуулж гүйцэтгэгдэж болно. Тухайлбал аккумулятор дотор химийн урвалын энерги цэнэгийг бага потенциалаас их потенциалтай цэгт шилжүүлэхэд зарцуулагдана.

Битүү хэлхээнд нэгж эерэг цэнэг шилжүүлэхэд гүйцэтгэх ажлаар илэрхийлэгдэх физик хэмжигдэхүүнийг цахилгаан хөдөлгөгч хүч гэж нэрлэнэ.

$$\varepsilon = \frac{A}{Q}$$

Битүү хэлхээгээр цахилгаан орны хүчний дагуу цэнэг шилжих гадаад хэсэг болон тэжээлийн үүсгүүр дотор цахилгаан хүчний эсрэг (-) туйлаас эерэг (+) туйл руу цэнэг шилжүүлэх дотоод хэсэг хоёрт гүйдлийн хүч тэнцүү байх ёстой. Эс тэгвэл битүү хэлхээний аль нэгэн газар цэнэг хуримтлагдаж хүчдэлийн хуваарилалт өөрчлөгдөх болно. Иймээс ЦХХ нь гадаад ба дотоод (гүйдэл үүсгэгч) хоёр хэсэг дээр унах хүчдэлийн нийлбэртэй тэнцүү байна.

$$\varepsilon = IR + Ir$$

Энд: r - гүйдэл үүсгэгчийн дотоод эсэргүүцэл. Дээрхээс битүү хэлхээгээр гүйх гүйдлийг олбол

Гадаад хэлхээнд эерэг, сөрөг цэнэг саармагжих процесс явагдаж хүчдэл (цахилгаан энерги) унадаг бол тэжээл үүсгэгч дотор эерэг, сөрөг цэнэгийг салгаж ЦХХ (цахилгаан энерги) үүсгэж байдаг.

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

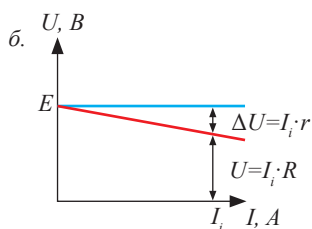
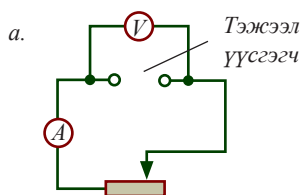
Үүнийг бүрэн хэлхээний Омын хууль гэнэ. Хэлхээний гадаад эсэргүүцэл дээр унах хүчдэл

$$U = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{r}{R}}$$

Эндээс дараах хоёр тохиолдол байж болно. Үүнд:

- $r \ll R$ буюу тэжээл үүсгэгчийн дотоод эсэргүүцэл хэлхээний гадаад эсэргүүцлээс олон дахин бага эсвэл тэгтэй тэнцүү үед хэлхээний хэрэглэгчийн эсэргүүцлээс үл хамааран тэжээл үүсгэгчийн хүчдэл тогтмол байна. Ийм тэжээл үүсгэгчийг **идеал хүчдэлийн үүсгүүр** гэнэ.
- $r \gg R$ буюу тэжээл үүсгэгчийн дотоод эсэргүүцэл хэлхээний гадаад эсэргүүцлээс олон дахин их үед хэлхээний хэрэглэгчийн эсэргүүцлээс үл хамааран тэжээл үүсгэгчийн гүйдэл тогтмол байна. Ийм тэжээл үүсгэгчийг **идеал гүйдлийн үүсгүүр** гэнэ.

Бодит тэжээл үүсгэгч бүр тодорхой хэмжээний дотоод эсэргүүцэлтэй байдаг. Энэ дотоод эсэргүүцэл дээр унасан хүчдэл энергийн алдагдал үүсгэж улмаар тэжээл үүсгэгчийн гаралтын чадал буурдаг.



Зураг 67.

Туршилт Тэжээл үүсгэгчийн дотоод эсэргүүцлийг тодорхойлъё.

Зураг 67а-д үзүүлснээр хэлхээг угсарч реостатын тусламжтайгаар хэлхээний гадаад эсэргүүцлийн хэмжээг өөрчлөхөд хэлхээний гүйдэл хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг ажиглаарай.

- Тодорхой гүйдлийн хүчний утгуудад харгалзан тэжээл үүсгэгчийн шонгууд дээр унах хүчдэлийг хэмжээрэй.
- Тэжээл үүсгэгчийн хүчдэл, гүйдлийн хамаарлаас тэжээл үүсгэгчийн дотоод эсэргүүцлийг олоорой.

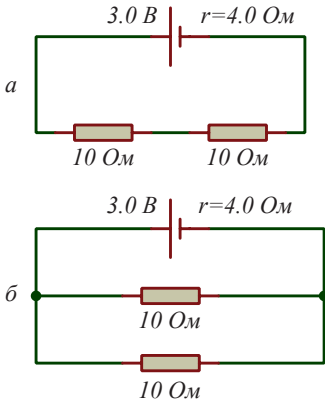
Жишээ

1. 6.0 В ЦХХ-тэй батарей ба 13.5 Ом эсэргүүцэлтэй резистор бүхий хэлхээгээр 0.40 А гүйдэл гүйж байсан бол батарейн дотоод эсэргүүцлийг тооцоолъё.

Алхам-1: Бодлогын өгөгдөл $\varepsilon=6.0$ В, $I=0.40$ А, $R=13.5$ Ом

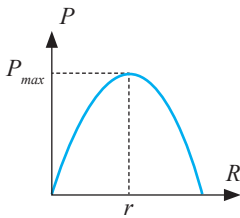
Алхам-2: Бүрэн хэлхээний Омын хуулиас батарейн дотоод эсэргүүцлийг олъё $I = \frac{\varepsilon}{R + r} \Rightarrow r = \frac{\varepsilon}{I} - R$

Хариу: $r = \frac{6.0}{0.40} - 13.5 = 15 - 13.5 = 1.5$ Ом



Зураг 68.

Тэжээл үүсгэгчийн цахилгаан чадал нь нэгж хугацаанд үйлдвэрлэж байгаа цахилгаан энерги юм. Харин хэрэглэгчийн цахилгаан чадал нь нэгж хугацаанд хэрэглэж байгаа цахилгаан энерги юм.



Зураг 69.

2. Зураг 68-д үзүүлсэн а, б хэлхээний ерөнхий гүйдлийг тооцоолж, хэлхээ тус бүрийн батарейн дотоод эсэргүүцэл дээр алдагдах хүчдэлийг ол.

Алхам-1: Бодлогын өгөгдөл $E=3.0\text{ В}$, $r=4.0\text{ Ом}$, $R_1=R_2=10\text{ Ом}$

Алхам-2: Хэлхээний ерөнхий эсэргүүцэл олъё

а: $R=R_1+R_2=20\text{ Ом}$ б: $R=\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1+R_2}=5\text{ Ом}$

Алхам-3: Бүрэн хэлхээний Омын хуулиар хэлхээний гүйдлийг олно.

а: $I=\frac{\varepsilon}{R+r}=\frac{3.0\text{ В}}{20\text{ Ом}}=0.15\text{ А}$

б: $I=\frac{\varepsilon}{R+r}=\frac{3.0\text{ В}}{5\text{ Ом}}=0.6\text{ А}$

Алхам-4: Батарейн дотоод эсэргүүцэл дээр алдагдах хүчдэл

а: $V_r=I \cdot r=0.15\text{ А} \cdot 4.0\text{ Ом}=0.6\text{ В}$

б: $V_r=I \cdot r=0.6\text{ А} \cdot 4.0\text{ Ом}=2.4\text{ В}$

Тэжээл үүсгэгчийн дотоод эсэргүүцлээс гаралтын чадал хамаарах нь

Бид резистор дээр ялгарах чадал резистороор гүйх гүйдэл ба түүн дээр унах хүчдэлийн үржвэртэй тэнцүү байдгийг мэдэх билээ.

Тэжээл үүсгэгчийн дотоод ба гадаад хэсгээр гүйх гүйдлийн хэмжээ ижил байх тул резистор дээр ялгарах чадлыг резисторын эсэргүүцэл ба түүгээр гүйх гүйдлээр илэрхийлбэл $P=R^2 \cdot I$

Тэжээл үүсгэгчийн дотоод эсэргүүцэл дээр алдагдах чадал

$$P_r=r^2 \cdot I$$

Тэжээл үүсгэгчийн нийт чадал: $P_0=\varepsilon \cdot I$

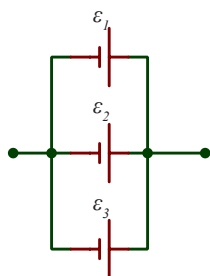
Хэлхээний тэжээл үүсгэгчийн ашигт үйлийн коэффициент

$$\eta=\frac{P}{P_0}=\frac{R}{R+r}$$

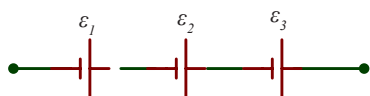
Иймд тогтмол гүйдлийн бодит тэжээл үүсгэгчийн гаралтын чадал түүний дотоод эсэргүүцэл ба гадаад эсэргүүцлийн харьцаанаас хамаардаг. Гадаад эсэргүүцэл тэжээл үүсгэгчийн дотоод эсэргүүцэлтэй тэнцэх үед гаралтын чадал хамгийн их байна (Зураг 69).

Практикт хэд хэдэн тэжээл үүсгэгчийг цуваа эсвэл зэрэгцээгээр холбох шаардлага гардаг.

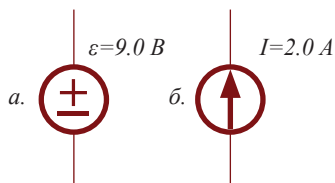
Хэд хэдэн тэжээл үүсгэгчийг цуваа болон зэрэгцээ холбосон тохиолдолд тэдгээрийг нэг үүсгүүрээр төлөөлүүлж болдог. Ингэхдээ цуваа зэрэгцээ холболтын ерөнхий эсэргүүцэл, ерөнхий хүчдэл олох аргыг ашигладаг. Тухайлбал ижил цахилгаан хөдөлгөгч



Зураг 70а. Зайг зэрэгцээ холбоход дотоод эсэргүүцэл багасна.



Зураг 70б. Зайг цуваа холбоход ЦХХ ба дотоод эсэргүүцэл нэмэгдэнэ.



Зураг 71. Идеал үүсгүүрүүдийн тэмдэглэгээ

Гадаад хэлхээний эсэргүүцлээс тэжээл үүсгэгчийн шон дахь хүчдэл хамаарахгүй бол идеал хүчдэлийн үүсгүүр гэнэ.

Гадаад хэлхээний эсэргүүцлээс хэлхээний гүйдлийн хүч хамаарахгүй бол идеал гүйдлийн үүсгүүр гэнэ.

хүчтэй, дотоод эсэргүүцэлтэй n ширхэг үүсгүүрүүдийг зэрэгцээгээр холбовол ерөнхий хүчдэл өөрчлөгдөхгүй, тэдгээрийн ерөнхий дотоод эсэргүүцэл n дахин буурна.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots = \varepsilon_n, \quad r = \frac{r_i}{n} \quad \text{тул} \quad I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r_i}{n}}$$

Харин ийм үүсгүүрүүдийг цуваагаар холбовол тэдгээрийн дотоод эсэргүүцэл n дахин ихэснэ.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n = \varepsilon_i \cdot n, \quad r = r_i \cdot n \quad \text{тул} \quad I = \frac{n \cdot \varepsilon_i}{R + r_i \cdot n}$$

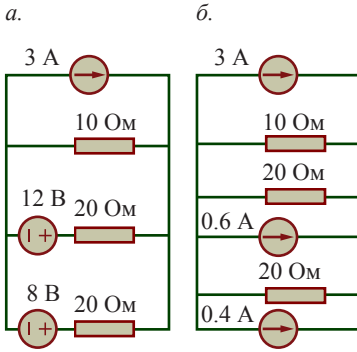
Иймд хэлхээний гадаад эсэргүүцэл бага үед тэжээл үүсгэгчийг зэрэгцээ холбох нь ашигтай байна. Гэхдээ тэнцүү биш цахилгаан хөдөлгөгч хүчтэй үүсгүүрүүдийн хувьд бага нь ихдээ нэмэлт эсэргүүцэл болдог учир зэрэгцээ холбох нь ашиггүй байдаг. Жишээлбэл муудсан зай хураагуурыг шинэ зай хураагууртай хамт ашиглавал шинэ нь хурдан мууддаг.

Идеал үүсгүүрүүд

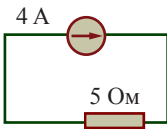
Цахилгаан хэлхээний тооцооллыг хялбарчлах үүднээс идеал хүчдэлийн болон идеал гүйдлийн үүсгүүр гэсэн ойлголтуудыг авч үздэг. Идеал хүчдэлийн үүсгүүр бол дотоод эсэргүүцэл $r=0$ байх тэжээлийн үүсгүүр юм. Түүнд ямар ч ачаалал холбосон хүчдэл нь тогтмол байх бөгөөд зөвхөн гүйдэл нь ачааны эсэргүүцлээс хамаарч өөрчлөгдөнө. Идеал хүчдэлийн үүсгүүрийг богино холбож болохгүй. Учир нь гүйдэл хязгааргүй утгатай болно. Ийм үүсгүүрийг хэлхээнд тэмдэглэхдээ хүчдэлийн туйлыг маш тодорхой тэмдэглэх шаардлагатай. Үүсгүүр дотуур түүний сөрөг туйлаас эерэг туйл руу гүйдэл гүйнэ. Идеал бус хүчдэлийн үүсгүүр болгоё гэвэл дотоод эсэргүүцэл цуваа холбож өгнө.

Идеал гүйдлийн үүсгүүр бол дотоод эсэргүүцэл $r=\infty$ байх тэжээлийн үүсгүүр юм. Түүнд ямар ч ачаалал холбосон гүйдэл нь тогтмол байх бөгөөд зөвхөн гаргаж буй хүчдэл нь ачааны эсэргүүцлээс хамаарч өөрчлөгдөнө. Идеал гүйдлийн үүсгүүрийг ачаалалгүй задгай орхиж болохгүй. Учир нь ачааны эсэргүүцлийн утга хязгааргүй болох ба хүчдэл нь ч хязгааргүй утгатай болно. Ийм үүсгүүрийг хэлхээнд тэмдэглэхдээ гүйдлийн чигийг заасан сумтай зурна. Үүсгүүрийн сумны үзүүр талд эерэг хүчдэлтэй байна. Идеал бус гүйдлийн үүсгүүр болгоё гэвэл дотоод эсэргүүцэл зэрэгцээ холбож өгнө.

Идеал үүсгүүрүүд хоорондоо Омын хуулиар холбогдох учир нэгийг нь нөгөөгөөр орлуулж болно. Орлуулахдаа цуваа холбогдсон эсэргүүцэл бүхий идеал хүчдэлийн



Зураг 72.



Зураг 73

үүсгүүрийг яг тийм утгатай эсэргүүцэл зэрэгцээ холбогдсон идеал гүйдлийн үүсгүүрээр орлуулж болох ба эсрэгээр зэрэгцээ холбогдсон эсэргүүцэлтэй идеал гүйдлийн үүсгүүрийг яг тийм эсэргүүцэл цуваа холбогдсон хүчдэлийн үүсгүүрээр орлуулж болно. Хүчдэл ба гүйдлийн утгууд Омын хуулиар тооцогдох ёстой. Үүнийг үүсгүүр хувиргалтын арга гэнэ.

Жишээ: Зураг 72а-д үзүүлсэн хэлхээний 10 Ом эсэргүүцэл дээр унах хүчдэлийг үүсгүүр хувиргалтын аргаар олъё.

Омын хуулиар хэлхээний 12 В болон 8 В хүчдэлийн үүсгүүрүүдийг гүйдлийн үүсгүүрт хувиргавал 0.6 А болон 0.4 А гүйдлийн үүсгүүрүүд болж хувирна (Зураг 72б). Эсэргүүцлүүд нь зэрэгцээ холболттой болох ба үүсгүүрүүд ч хоорондоо зэрэгцээ холболттой болох учир эцэстээ ганц 4 А үүсгүүртэй зэрэгцээ холбогдсон 5 Ом эсэргүүцэл бүхий хялбар хэлхээ болж хувирна (Зураг 73). Эндээс 5 Ом эсэргүүцэл дээр унах хүчдэл

$$U=4 \cdot 5=20 \text{ В}$$

Энэ нь анхны хэлхээний 10 Ом эсэргүүцэл дээрх хүчдэл юм.

Нэмэлт



Зураг 74.
Аналоги
амперметр



Зураг 75.
Тоон
мультиметр

Цахилгаан хэмжих хэрэгсэл

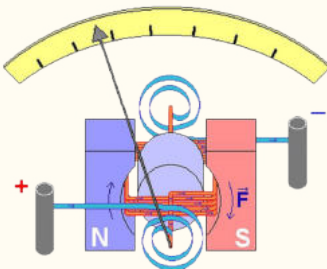
Цахилгаан гүйдлийг амперметрээр, хүчдэлийг вольтметрээр хэмждэгийг бид мэднэ. Ямар ч багажийг хэлхээнд залгахад тэр нь хэлхээний горимд өөрчлөлт оруулдаггүй байх ёстой.

Амперметрийг хэлхээнд ямагт цуваа холбоно. Учир нь түүгээр хэмжих гэж буй гүйдлийг бүрэлдүүлж байгаа бүх цэнэг урсан өнгөрөх ёстой. Хэлхээнд өөрчлөлт оруулахгүй байхын тулд амперметр аль болох бага эсэргүүцэлтэй байх шаардлагатай.

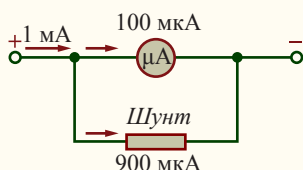
Вольтметрийг хоорондох потенциалын ялгаврыг нь хэмжих хоёр цэгт зэрэгцээ холбоно. Түүний эсэргүүцэл аль болох их байвал зохистой. Ийм нөхцөлд вольтметр дээрх энергийн алдагдал бага байж хэлхээнд өөрчлөлт орохгүй.

Тоон багажийн заалт шууд харагддаг бөгөөд хэмжих хязгаарыг нэлээд өргөн мужид өөрчилж болдоогоороо аналог багажаас давуутай.

Аналог хэмжих багажууд ихэвчлэн хоёр соронзны харилцан үйлчлэлд үндэслэдэг. Тогтмол соронзны дотор дээр нь зүү бэхэлсэн ороомог байрлана (Зураг 75). Ороомгоор гүйдэл гүйхэд соронзонзлогдож тогтмол соронзонтой харилцан үйлчилнэ. Үүний дүнд эргүүлэх момент үүсч ороомог эргэж зүү хазайна.



Зураг 76.



Зураг 77. Шунтээр илүүдэл гүйдэл гүйдэг.

Гүйдэл гүйхээ болиход зүүг анхны байрлалд нь оруулах үүргийг пүрш гүйцэтгэнэ. Энэхүү хөдлөх систем хоёр үндсэн үзүүлэлттэй. Нэг нь зүү хуваарийн дагууд бүрэн хазайхад шаардагдах гүйдэл. Нөгөө нь дотоод эсэргүүцэл юм. Тус системийг амперметр, вольтметрийн аль алиныг хийхэд ашиглаж болно. Ийм хөдлөх системд үндэслэсэн амперметрийн хэмжих гүйдлийн утга бүрэн хазайлтын гүйдлээс хэтрэх ёсгүй. Бүрэн хазайлтын гүйдэл бага үед амперметрийн хэмжих гүйдлийг их болгохын тулд шунт хэрэглэдэг. Шунт бол амперметртэй зэрэгцээ холбосон түүнээс бага эсэргүүцэлтэй резистор юм (Зураг 77). Жишээ нь, 100 мкА бүрэн хазайх гүйдэлтэй багажаар 1 мА гүйдэл хэмжих гэвэл 900 мкА гүйдэл нь шунтаар гүйж байхаар түүний эсэргүүцлийг сонгон авах хэрэгтэй. Шунтийн эсэргүүцлийн хэмжээг дараах томъёогоор олдог.

$$R_{ш} = \frac{I_A}{I - I_A} r_A$$

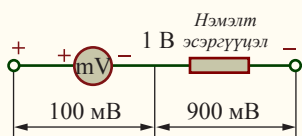
r_A - микроамперметрийн дотоод эсэргүүцэл,
 I_A - микроамперметрийн заалтын дээд хязгаар,
 I - хэмжих гүйдлийн хүчний дээд хязгаар.

Ийм маягаар олон хязгаарт амперметр хийж болно. Хөдлөх систем тодорхой хэмжээний дотоод эсэргүүцэлтэй. Омын хууль ёсоор түүнийг бүрэн хазайх гүйдлээр үржүүлбэл зүү бүрэн хазайхад шаардлагатай хүчдэлийн хэмжээ гарна. Энэ хүчдэл мөн бага хэмжээтэй бөгөөд вольтметрийн хэмжих хязгаарыг илтгэнэ.

Хэмжих хязгаарыг ихэсгэе гэвэл түүнтэй резисторыг цуваа холбоно (Зураг 78). Үүнийг нэмэлт эсэргүүцэл гэдэг. Жишээ нь, 100 мВ бүрэн хазайх хүчдэлтэй вольтметрийг 1 В хэмждэг болгоё гэвэл 900 мВ нь нэмэлт эсэргүүцэл дээр унаж байхаар эсэргүүцлийг сонгон авна. Нэмэлт эсэргүүцлийн хэмжээг дараах томъёогоор олдог.

$$R_n = r_B \frac{U - U_B}{U_B}$$

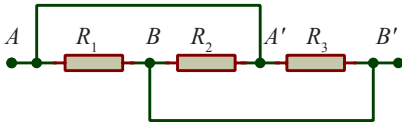
U - хэмжих хүчдэлийн дээд хязгаар
 U_B - вольтметрийн заалтын дээд хязгаар
 Ингэж олон хязгаартай вольтметр хийж болно.



Зураг 78. Нэмэлт эсэргүүцэл дээр илүүдэл хүчдэл унадаг.

Эквивалент хувиргалтын аргууд

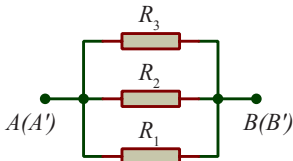
Бид цуваа болон зэрэгцээ холбогдсон резисторуудын ерөнхий эсэргүүцлийг Омын хууль ашиглан тодорхойлж чадна. Гэвч амьдралд олон тооны резисторууд нилээд төвөгтэй холбогдсон байх нь элбэг. Энэ тохиолдолд цахилгаан хэлхээнд эквивалент хувиргалтын арга хэрэглэн цахилгаан хэлхээнд хувиргалт хийж уг хэлхээтэй ижил шинж чанартай хэлхээ бүтээж хялбарчилдаг. Ийм хэлхээг эквивалент хэлхээ гэж нэрлэнэ. Эквивалент хэлхээ бүтээхэд хэд хэдэн арга ашигладаг.



Зураг 79а.

Ижил потенциалт цэгийн арга

Энд хэлхээний ижил потенциалтай цэгүүдийг хооронд нь холбож эсвэл салгаж болдог. Учир нь ижил потенциалтай цэгүүдийн хооронд потенциалын ялгавар тэг буюу хүчдэл унахгүй. Иймд хэлхээний ижил потенциалтай цэгүүдийн хооронд гүйдэл гүйхгүй.

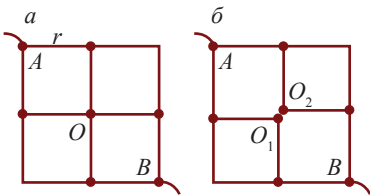


Зураг 79б.

1. *Ижил потенциалт цэгүүдийг холбох.* 79а зурагт үзүүлсэн хэлхээний ерөнхий эсэргүүцлийг олъё. Зургаас $\varphi_A = \varphi_{A'}$, $\varphi_B = \varphi_{B'}$ болох нь харагдаж байна. Иймд А ба А' болон В ба В' цэгүүдийг холбож болно. Тэгвэл хэлхээ 79б зурагт үзүүлсэн зэрэгцээ холбогдсон резисторууд болно. Ерөнхий эсэргүүцэл

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$$

2. *Ижил потенциалт цэгүүдийг салгах.* 80б зурагт үзүүлсэн хэлхээний ерөнхий эсэргүүцлийг олъё. Хэлхээний оролт гаралтын А, В цэгүүдийг дайрсан шугам дээрх О цэгийг ижил потенциалтай O_1, O_2 цэгүүдэд салгаж болно (Зураг 80б). Тэгвэл хэлхээний ерөнхий эсэргүүцэл $R = \frac{3r}{2}$.

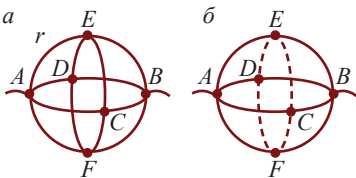


Зураг 80.

Хэлхээний идэвхгүй хэсгийг тодорхойлох арга

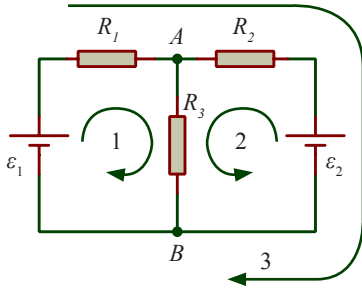
Хэлхээний ижил потенциалтай цэгүүдийн хоорондох элементүүддээр хүчдэл унахгүй. Иймд ижил потенциалтай цэгүүдийн хоорондох хэлхээний хэсгүүдийг тооцохгүй байж болдог. Энд хэлхээний оролт, гаралтын хэсгүүдийг холбосон шулуунд перпендикуляр хавтгай дээрх цэгүүд ижил потенциалтай байна.

81а зурагт үзүүлсэн хэлхээний ерөнхий эсэргүүцлийг олъё. Зургаас С, D, E, F цэгүүдэд $\varphi_C = \varphi_D = \varphi_E = \varphi_F$ болох нь харагдаж байна. Иймд хэлхээний ED, DF, FC, CE хэсгүүдээр гүйдэл гүйхгүй тул тэдгээрийг тооцохгүй байж болно (Зураг 81б).



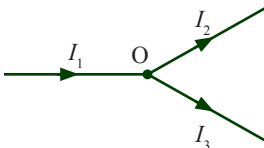
Зураг 81.

Тэгвэл хэлхээний ерөнхий эсэргүүцэл $R = \frac{r}{2}$.



Зураг 82. Дээрх хэлхээний A, B –зангилаа, A-B хэсгүүд салаа, 1, 2, 3- хүрээ

Тэжээл үүсгэгчийн гаргасан ЦХХ, хэрэглэгч дээр бүрэн хэрэглэгдэнэ. ЦХХ-ий нийлбэр = хүчдэлийн нийлбэр.



$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

Зураг 83.

Кирхгофын дүрэм

Хэд хэдэн гүйдэл үүсгэгч агуулсан хэлхээг нийлмэл хэлхээ гэнэ. Нийлмэл хэлхээнд тооцоо хийхэд хэлхээний салаа, зангилаа, хүрээ гэсэн ойлголтыг хэрэглэнэ. Хэлхээний гурав ба түүнээс дээш дамжуулагчийг холбосон цэгийг зангилаа гэнэ. Нэг зангилаа цэгээс нөгөө цэг хүртэл холбосон хэлхээний хэсгийг салаа гэх ба энд гүйдэл ижил байна. Харин хэлхээний битүү хэсгийг хүрээ гэнэ.

Хэд хэдэн зангилаа, хүрээ агуулсан цахилгаан хэлхээнд тооцоо хийхэд Кирхгофын дүрмүүдийг ашигладаг. Эдгээр дүрмүүд нь хадгалагдах хуулиудтай холбогддог.

Кирхгофын 1-р дүрэм буюу гүйдлийн дүрэм

Цахилгаан хэлхээний зангилаанд орж байгаа болон гарч байгаа гүйдлийн хүчний алгебр нийлбэр тэгтэй тэнцүү байна.

$$\sum I_i = 0$$

Зангилаанд орж байгаа гүйдлийн хүчийг эерэг, гарч байгаа гүйдлийн хүчийг сөрөг гэж үздэг. Энэ дүрэм нь цэнэг хадгалагдах хуулийн нэгэн тохиолдол юм.

Кирхгофын 2-р дүрэм буюу хүчдэлийн дүрэм

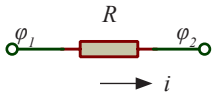
Цахилгаан хэлхээний битүү хүрээнд агуулагдах ЦХХ-ний алгебр нийлбэр нь уг хүрээний элементүүд дээр унах хүчдэлийн нийлбэртэй тэнцүү байна.

$$\sum_{i=1}^k \mathcal{E}_i = \sum_{i=1}^n I_i R_i$$

Энд хүрээний гүйдлийн хүчний чигийг дураараа сонгож авах ба сонгосон чиглэлийн дагуух гүйдлийн хүчийг эерэг, эсрэг гүйдлийн хүчийг сөрөг гэж үзнэ. Энэ дүрэм нь энерги хадгалагдах хуулийн нэгэн илрэл юм.

Цахилгаан хэлхээг тооцоолох аргууд

Резистор дээрх потенциалын ялгавар



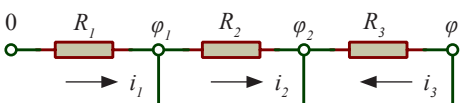
Зураг 84.

Резистораар гүйх гүйдлийн хүч i , эсэргүүцэл R гэе. Резистор дээрх потенциалын ялгавар Омын хууль ёсоор дараах хэлбэртэй бичигдэнэ.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ri$$

Ус өндрөөс нам газар руу урсдагтай адил гүйдэл их потенциалтай цэгээс бага потенциалтай цэг рүү гүйнэ.

Жишээ: Дээрх дүрмийг хэрэглэн дараах хэлхээний хэсэгт Омын хуулийг бичье.



Зураг 85.

1-р резистор дээр гүйдэл баруун тийш гүйж байгаа учир φ_1 зангилааны потенциал 0 цэгийнхээс $R_1 i_1$ хэмжээгээр бага байна $0 - R_1 i_1 = \varphi_1$.

Үүнтэй адилаар 2-р резисторын хувьд дараах тэгшитгэл бичиж болно $\varphi_1 - R_2 i_2 = \varphi_2$.

3-р резистор дээр гүйдэл зүүн тийш гүйж байгаа учир $\varphi_2 < \varphi$ буюу $\varphi_2 + R_3 i_3 = \varphi$.

Нэгтгэвэл $0 - R_1 i_1 - R_2 i_2 + R_3 i_3 = \varphi$.

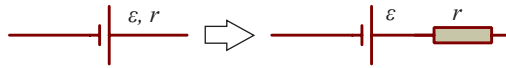
Эндээс үзвэл потенциалын ялгаврыг гүйдлийн чигийн дагуу тооцоолж бичиж байгаа бол сөрөг тэмдэгтэй, гүйдлийн чигийн өөд бол нэмэх тэмдэгтэй авч, завсрын цэг бүрийн потенциалыг оролцуулахгүйгээр бичиж болно.

Хэрэв φ цэгээс эхэлж тэгшитгэлийг бичвэл

$$\varphi - R_3 i_3 + R_2 i_2 + R_1 i_1 = 0.$$

Тэжээлийн ЦХХ ба дотоод эсэргүүцэл

Цахилгаан хэлхээнд байрлах тэжээл үүсгэгчийн дотоод эсэргүүцлийг ЦХХ –тэй цуваа холбогдсон байдлаар дүрсэлж болдог.



Зураг 86.

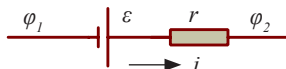
Идеал ЦХХ-ний хоёр шон дахь потенциалын ялгавар гүйдлийн чигээс хамаарахгүйгээр ЦХХ-тэй тэнцүү байна. Өөрөөр хэлбэл, идеал ЦХХ –ний үүсгүүрийн эерэг шонгийн потенциал нь сөрөг шонгийнхоос ямагт ЦХХ –ний хэмжээгээр илүү байна.

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \varepsilon$$



Зураг 87.

Дотоод эсэргүүцэл дээр унах хүчдэлийг гадаад эсэргүүцлийн нэгэн адилаар тооцоолно.



$$\varphi_1 + \varepsilon - ri = \varphi_2$$

Зураг 88.



$$\varphi_1 + \varepsilon + ri = \varphi_2$$

Зураг 89.

Жишээ: Дараах зурагт ε_1 ЦХХ, r_1 дотоод эсэргүүцэлтэй 1-р батареи ба ε_2 ЦХХ, r_2 дотоод эсэргүүцэлтэй 2-р батареинаас тогтох хэлхээний хэсгийг үзүүлжээ. Хэлхээний хэсэг бүрийн гүйдлийн хүч нь i_1 ба i_2 байна.



Зураг 90.

Энэ хэлхээний хэсгийн хувьд Омын хуулийг зүүн талаас нь эхлүүлэн бичье.

$$\varphi_1 + \varepsilon_1 - r_1 i_1 + \varepsilon_2 + r_2 i_2 = \varphi_2$$

Иймд бичиглэлийг бүтэн хэлхээнд ч, хэлхээний хэсэгт бичиж болно. Тэмдэглэгээг цөөлөх утгаар аль болох цөөн индекс бичихийг хичээх хэрэгтэй. Физикт ямагт потенциалын ялгавар хэрэглэгддэг учир аль нэг цэгийн (зангилааны) потенциалыг тэг гэж авдаг. Жишээ нь дээрх хэлхээнд $\varphi_1 = 0$; $\varphi_2 = \varphi$ гэж тэмдэглэж болох юм.

Цахилгаан хэлхээ нь өөртөө зохицсон бүхэл бүтэн тогтолцоо (систем) юм. Өөртөө зохицсон гэдэг нь уг хэлхээгээр ямар гүйдэл гүйх нь ямар үүсгэгчид (ЦХХ), ямар хэрэглэгч (эсэргүүцэл), хэрхэн холбосноос хамаардаг, түүнд зохицсон гүйдэл гүйдэг, тохирсон чадал ялгардаг гэсэн үг. Тогтолцооны шинжилгээний арга ёсоор юуны өмнө системийг бүрэлдүүлж байгаа элементүүдийг ялгаж авах хэрэгтэй, дараа нь элементийн дотоод хөндлөн холбоос буюу элемент тус бүрт харгалзах тэгшитгэл бичнэ, тэгээд элементүүдийн хооронд босоо холбоос тогтоож асуудлыг шийдэх гэсэн алхмыг хэрэглэдэг.

Тогтолцооны шинжилгээний аргаар цахилгаан хэлхээг тооцоолох алхам

Элемент ялгах. Хэлхээг юунаас тогтсон бэ гэдгийг ялгаж сонгоно. Жишээ болгож, дараах зурагт цахилгаан хэлхээний бүдүүвч үзүүлжээ. Үсгээр тэмдэглэсэн хэсэгт тэжээл юм уу резисторууд холбогдсон байж болно. Хэлхээг дараах элементээс тогтоно гэж үзэж болно. Үүнд:

Гүйдэл салаалах цэгийг *зангилаа* гэнэ. 0, 1, 2, 3 цэгүүд.

Хоёр зангилааны хоорондох хэсгийг *салаа* гэнэ. (0 a 1); (1 d 3); (3 e 2 c 0); (3 f 0) гэх мэт. Зэргэлдээ зангилааны хоорондох хэсгийг салаа гэж үзвэл бодолт хялбар болдог.

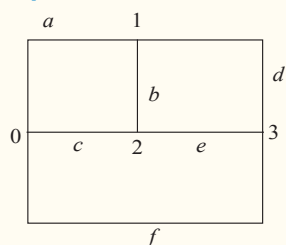
Гүйдэл гүйх битүү хэсгийг *хүрээ* гэнэ. (0 a 1 b 2 c 0); (1 d 3 e 2 b 1); (0 c 2 e 3 f 0) гэх мэт.

Параметр ялгах. Энд шаардлагатай тэмдэглэгээг оруулна. Гүйдлийн хүчний тэмдэглэгээ, гүйдлийн чиг, ЦХХ, эсэргүүцлийн тэмдэглэгээ (тоон утга), зангилааны дугаар, потенциалын тэмдэглэгээ, салааны дугаар, хүрээний дугаар гэх мэт. Ямар тэмдэглэгээ хийх нь элементийн сонголтоос хамаарна.

Хөндлөн холбоос тогтоох. Энэ нь цахилгаан хэлхээний хувьд элемент бүрийн хувьд Омын хууль бичих үйл юм.

Босоо холбоос тогтоох. Энэ нь элементүүдийн хоорондох системийн холбоосыг ашиглаж асуудлыг шийдэх алхам юм. Тэгшитгэлүүдийг системчилж бодно гэсэн үг.

Анализ хийх. Шийдээ эргэж харах, нягтлах, дүгнэх, шинэ бодлогын санаа дэвшүүлэх алхам.



Зураг 91.

Цахилгаан хэлхээг юунаас тогтсон гэж үзэж байгаа, ямар зүйлд анхаарлыг төвлөрүүлж байгаагаас хамаараад цахилгаан хэлхээг тооцоолох хэд хэдэн арга байдаг.

А. Кирхгофын арга. Германы физикч Г.Р.Кирхгоф ЦХХ гэсэн ойлголтыг анх оруулснаар Омын хуулийг өргөтгөж бүрэн хэлхээг тогтолцооны үүднээс шинжлэх боломжийг нээсэн хүн юм.

Элемент: Хэлхээ салаануудаас тогтоно, салаанууд нийлж хүрээг үүсгэнэ гэж үзнэ.

Параметр: Салаа бүрт өөрийн гэсэн гүйдэл гүйнэ. Энд салаануудыг дугаарлаж, гүйдлийн хүч, чигийг сонгож тэмдэглэнэ.

Хөндлөн холбоос: Үл хамаарах хүрээнүүдийн хувьд Омын хуулийг бичнэ.

Босоо холбоос: Үл хамаарах зангилаануудад гүйдэл тасралтгүйн тэгшитгэл бичнэ. Хүрээнүүдийн тэгшитгэл ба гүйдэл тасралтгүйн тэгшитгэлийг системчлэн бодож үл мэдэгдэгчийг олно.

Жишээ: Зурагт үзүүлсэн хэлхээний хувьд Кирхгофын аргыг ашиглая.

Элемент ба параметр: Хэлхээг 3 салаанаас тогтоно, тэдгээр нь нийлж хоёр хүрээ үүсгэнэ гэж үзье.

Салаа бүрийн гүйдлийн хүч: i_1, i, i_2 . Гүйдлийн чигийг зурагт үзүүлснээр сонгов.

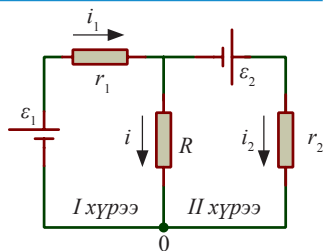
Хөндлөн холбоос: Хүрээ тус бүрт Омын хууль бичье.

I хүрээ: $0 + \varepsilon_1 - r_1 i_1 - r i = 0$

II хүрээ: $0 + R i + \varepsilon_2 - r_2 i_2 = 0$

Холбоосын тэгшитгэл: $i_1 - i - i_2 = 0$ (гүйдэл тасралтгүйн тэгшитгэл)

Босоо холбоос: Дээрх тэгшитгэлд ЦХХ ба эсэргүүцлүүд өгөгдсөн гэвэл гүйдлийн хүчнүүдийг олох шаардлагатай. 3 тэгшитгэл, 3 үл мэдэгдэгч байна. Асуудлыг шийдэх бүрэн боломжтой.



Зураг 92.

В. Хүрээний гүйдлийн арга. Энэ аргад хэлхээг хүрээнээс тогтоно, хүрээ бүхэнд өөрийн гэсэн гүйдэл гүйнэ гэж үздэг.

Элемент: Хэлхээ хүрээнээс тогтоно.

Параметр: Хүрээ бүрт өөрийн гэсэн гүйдэл гүйнэ. Энд хүрээнүүдийг дугаарлаж, гүйдлийн хүч, чигийг сонгож тэмдэглэнэ.

Хөндлөн холбоос: Үл хамаарах хүрээнүүдийн хувьд Омын хуулийг бичнэ.

Босоо холбоос: Хүрээнүүдийн тэгшитгэлийг системчилж, үл мэдэгдэгчийг олно.

Жишээ: Дээрх хэлхээний хувьд хүрээний гүйдлийн аргыг хэрэглэе.

Элемент ба параметр: Хэлхээ хоёр хүрээнээс тогтоно.

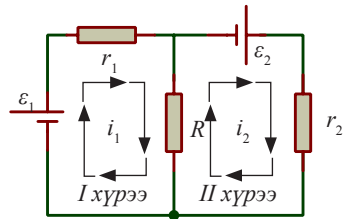
I ба II хүрээний гүйдлийн хүч: i_1, i_2 . Гүйдлийн чигийг зурагт үзүүлснээр нар зөв сонгов.

Хөндлөн холбоос: Хүрээ тус бүрт Омын хууль бичье. R резистор дээгүүр хоёр гүйдэл эсрэг чигт гүйж байгааг анхаарах хэрэгтэй.

I хүрээ: $0 + \varepsilon_1 - r_1 i_1 - R(i_1 - i_2) = 0$

II хүрээ: $0 - R(i_2 - i_1) + \varepsilon_2 - r_2 i_2 = 0$

Босоо холбоос: ЦХХ ба эсэргүүцлүүд өгөгдсөн гэвэл гүйдлийн хүчнүүдийг олох шаардлагатай. 2 тэгшитгэл, 2 үл мэдэгдэгч байна. Асуудлыг шийдэх бүрэн боломжтой. R эсэргүүцэлтэй резистор дээрх гүйдлийн хүч эдгээр гүйдлийн хүчний алгебр нийлбэр ($i = i_1 - i_2$)-ээр тодорхойлогдоно. Энэ нь гүйдэл салаалах тэгшитгэлтэй дүйцнэ.



Зураг 93.

С. Зангилааны потенциалын арга. Энэ аргад зангилааг тайлбал бүх учиг тайлагдана гэсэн утгаар зангилаанд анхаарлыг төвлөрүүлдэг.

Элемент: Хэлхээ салаануудаас тогтоно, салаанууд зангилаагаар холбогдоно гэж үзнэ.

Параметр: Салаа бүрт өөрийн гэсэн гүйдэл гүйнэ. Энд салаануудыг дугаарлаж, гүйдлийн хүч, чигийг сонгож тэмдэглэнэ. Мөн зангилаануудыг дугаарлаж, потенциалыг тэмдэглэнэ.

Аль нэг зангилааны потенциалыг тэг гэж сонгоно.

Хөндлөн холбоос: Салаануудын хувьд Омын хуулийг бичнэ.

Босоо холбоос: Үл хамаарах зангилаануудад гүйдэл тасралтгүйн тэгшитгэл бичнэ. Салааны тэгшитгэл ба гүйдэл тасралтгүйн тэгшитгэлүүдийг системчлэн бодож үл мэдэгдэгчийг олно.

Жишээ: Дээрх хэлхээний хувьд зангилааны потенциалын аргыг хэрэглэе.

Элемент ба параметр: Хэлхээ гурван салаанаас тогтоно. Салаануудын гүйдлийн хүч: i_1, i_2, i .

Гүйдлийн чигийг зурагт үзүүлснээр өмнөхийн адил сонгов. Доод зангилааны потенциал 0, дээд зангилааны потенциалыг φ гэж тэмдэглэе.

Хөндлөн холбоос: Салаа тус бүрт Омын хуулийг 0 цэгээс эхэлж бичье.

I салаа: $0 + \varepsilon_1 - r_1 i_1 = \varphi$

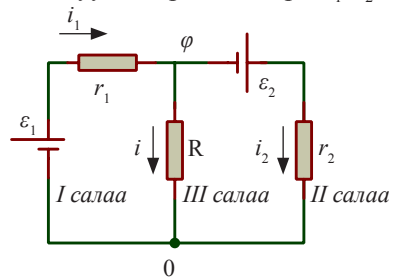
II салаа: $0 + r_2 i_2 - \varepsilon_2 = \varphi$

III салаа: $0 + R i = \varphi$

Гүйдэл тасралтгүйн тэгшитгэл

0 цэгт: $-i_1 + i + i_2 = 0$

Босоо холбоос: Дээрх тэгшитгэлд ЦХХ ба эсэргүүцлүүд өгөгдсөн гэвэл гүйдлийн хүчнүүдийг олох шаардлагатай. 4 тэгшитгэл, 4 үл мэдэгдэгч байна. Асуудлыг шийдэх бүрэн боломжтой. Салааны тэгшитгэлүүдээс салаа бүрийн гүйдлийн хүчийг олж гүйдэл тасралтгүйн тэгшитгэлд орлуулбал ганц φ үл мэдэгдэгч үлдэнэ. Түүний тоон утгыг олбол цаашид учиг амархан тайлагдана.



Зураг 94.

БҮЛЭГ 3. СОРОНЗОН ОРОН

Даалгавар. Эдгээр аргын ижил ба ялгаатай талыг хэлэлцэнэ үү.

Санамж: Тэгшитгэлийг үсгээр бичих нь шинжилгээ хийх өргөн боломж олгодог. Гэвч тоон хариу олоход цаг алдах талтай байдаг. Тоон хариу олох шаардлагатай үед өгөгдлийн тоон утгыг (бүх нэгжийг ижил болгоод) тэгшитгэлд орлуулаад нэгжийг орхиж явдаг. Тэгээд эцсийн хариунд нэгжийг бичнэ. Энэ арга бичиглэлийг товч, хураангуй болдог талтай. Харин нэгж, хэмжигдэхүүний тэмдэглэгээг хольж болохгүй: $U=6 \text{ Ом} \cdot i$, $U=6 \cdot i$ гэж бичнэ. Дээрх хэлхээнд тооцоо хийе. $\varepsilon_1=10 \text{ В}$, $r_1=1 \text{ Ом}$, $\varepsilon_2=8 \text{ В}$, $r_2=2 \text{ Ом}$, $R=6 \text{ Ом}$. Салаа бүрийн гүйдлийн хүчийг зангилааны потенциалын аргаар олъё.

I салаа: $i_1 = \frac{10 - \varphi}{1}$

II салаа: $i_2 = \frac{\varphi + 8}{2}$

III салаа: $i = \frac{\varphi - 0}{6}$

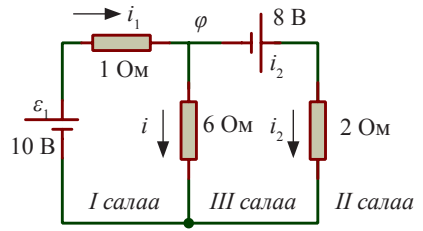
0 цэг: $-i_1 + i + i_2 = 0$

Сүүлийн тэгшитгэлд гүйдлийн хүчнүүдийг орлуулж, зангилааны потенциалыг олъё.

$$-10 + \varphi + \frac{\varphi}{6} + \frac{\varphi}{2} + 4 = 0$$

$$\varphi = 3.6 \text{ В}$$

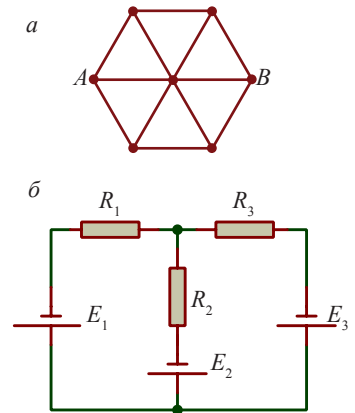
Салаануудын тэгшитгэлээс $i_1=6.4 \text{ А}$; $i_2=5.8 \text{ А}$; $i=0.6 \text{ А}$



Зураг 95.

Дасгал

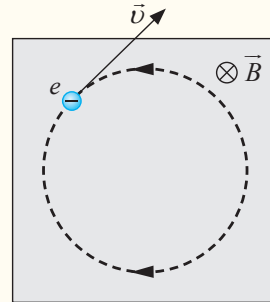
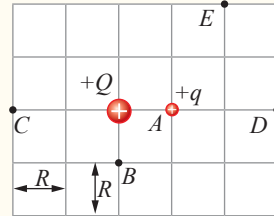
- Дээрх өгөгдлийг ашиглан Кирхгофын арга, хүрээний гүйдлийн аргаар хэлхээний тооцоог гүйцэтгэнэ үү. Аргуудын ялгааны талаар хэлэлцээрэй.
- 7.3 Ом эсэргүүцэлтэй дамжуулагч утсыг 1.4 В ЦХХ-тэй хуруу зайд зэрэгцээгээр холбов. Хуруу зайд холбосон их эсэргүүцэлтэй вольтметр 0.81 В зааж байсан бол дараах зүйлсийг тооцоолно уу.
 - Хуруу зайны дотоод эсэргүүцэл дээр унах хүчдэл
 - Хуруу зайны дотоод эсэргүүцэл
 - Хуруу зайны ашигт үйлийн коэффициент
- Металл утсыг хооронд нь гагнаж зөв зургаан өнцөгт болгожээ. Хэрэв олон өнцөгтийн нэг талын эсэргүүцэл r бол эсрэг орших оройнуудын хоорондох эсэргүүцлийг ол. Гагнаасыг зурагт цэгээр тэмдэглэжээ.
- Хэлхээнд $r_1=0.5 \text{ Ом}$, $r_2=1.0 \text{ Ом}$, $r_3=1.5 \text{ Ом}$ дотоод эсэргүүцэлтэй $E_1=2 \text{ В}$, $E_2=4 \text{ В}$, $E_3=6 \text{ В}$ цахилгаан хөдөлгөгч хүчтэй гүйдлийн үүсгүүрүүд, $R_1=4 \text{ Ом}$, $R_2=6 \text{ Ом}$, $R_3=8 \text{ Ом}$ эсэргүүцэлтэй резисторуудыг зурагт үзүүлснээр холбов. Хэлхээний салаа бүрийн гүйдлийн хүчийг тодорхойлно уу.



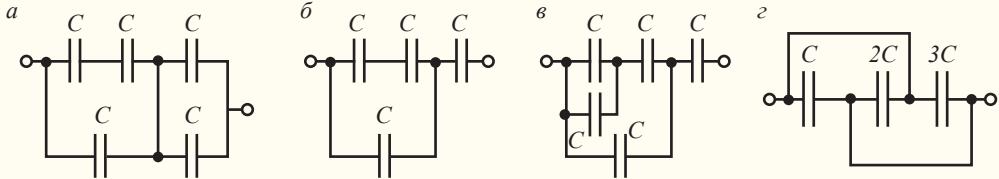
Зураг 96

Өөрийгөө сорих бодлого дасгал

- Хоорондоо 80 см зайд 20 мкКл ба 40 мкКл цэнэгтэй цэгэн цэнэгүүд байв.
 - Цэнэгүүдийн дундах цэгт
 - 20 мкКл цэнэгээс 40 см зайд цахилгаан орны хүчлэг ямар байх вэ?
- Хоорондоо 3.0 см зайтай 600 В потенциалын ялгавартай хэвтээ байрлах параллел хоёр ялтсын дунд $6.4 \cdot 10^{-15}$ Н жинтэй тосон дусал тайван байв.
 - Дуслын цэнэг эерэг эсвэл сөрөг алин болохыг товч илэрхийл. Өөрийн хариултаа тайлбарлана уу.
 - Тосон дуслын цэнэгийг тодорхойл.
- Протон $2.40 \cdot 10^{-6}$ Вм⁻¹ хүчлэгтэй цахилгаан оронд тэгш өнцгөөр хөдөлнө.
 - Цахилгаан орны зүгээс протонд үйлчлэх хүчийг тооцоол.
 - Орны дагуух протоны хурдатгалыг тооцоол.
 - Оронд перпендикуляр протоны хурдатгалыг бич.
- Зурагт $+Q$ цэнэгийн цахилгаан оронд байгаа $+q$ цэг цэнэгийг харуулжээ. $+q$ цэнэг А цэгт байхад түүнд F хүч үйлчлэх бол цэг цэнэгийг В, С, D, E цэгт байх үед үйлчлэх хүчний хэмжээг тооцоол. Тохиолдол бүрийн хариултыг тайлбарлана уу.
- 4.0 см урттай 3.0 А гүйдэлтэй дамжуулагч утас 50 мТ индукцтэй нэгэн төрлийн соронзон оронд байв. Дамжуулагчийн гүйдлийн элемент ба орны индукцийн хоорондох өнцөг 30°, 60°, 90° тохиолдлуудад дамжуулагчид орны үйлчлэх хүчний хэмжээг тодорхойл.
- Зурагт 4.0 мТ индукцтэй нэгэн төрлийн соронзон оронд электрон перпендикуляр $8.0 \cdot 10^6$ мс⁻¹ тогтмол хурдтай хөдөлж байгааг харуулжээ.
 - Соронзон орон дахь электронд үйлчлэх хүчийг тооцоол.
 - Электроны төвд тэмүүлэх хурдатгал ямар байх вэ?
 - Хариултыг ашиглан электроны хөдлөх тойргийн радиусыг ол.
- 15 кэВ кинетик энергитэй протон соронзон оронд 5.0 см радиустай тойргоор хөдлөв. Протоны масс $1.7 \cdot 10^{-27}$ кг.
 - Протоны хурдыг $1.7 \cdot 10^6$ мс⁻¹ болохыг үзүүл.
 - Протонд соронзон орноор үүсгэгдсэн төвд тэмүүлэх хүчийг тооцоол.
 - Протоныг уг соронзон оронд тойрог орбитоор хөдөлнө гэж үзээд орны соронзон индукцийг тодорхойл.
 - Протон нэг бүтэн орбитыг хэр удаан туулах вэ?
- Хуурай агаарт салхиар антен цахилгаанждаг, Антены цахилгаан багтаамж $C=10^{-4}$ мкФ, цэнэг $q=10^{-8}$ Кл бол антены потенциалыг тодорхойл.
- Бөмбөрцгийн цахилгаан багтаамж 1 Ф бол түүний радиусыг тодорхойл. Гарсан үр дүнг дэлхийн радиустай жиш.
- $R_1=5$ см радиустай $\varphi_1=100$ кВ потенциалтай бөмбөрцгийг цэнэггүй $R_2=6$ см радиустай бөмбөрцөгт урт нарийн дамжуулагчаар холбов. Бөмбөрцгүүдийн цэнэг ба потенциалуудыг тодорхойл.



11. 800 пФ багтаамжтай конденсаторт ямар багтаамжтай конденсаторыг цуваа залгавал конденсаторуудын ерөнхий багтаамж 160 пФ болох вэ?
 12. Конденсаторуудыг зурагт үзүүлснээр холбож батарей үүсгэжээ. Батарей тус бүрийн багтаамжийг тодорхойл.



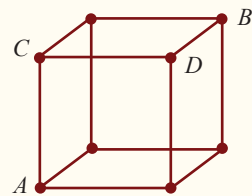
13. Хоёр хуруу зайг цуваагаар холбов. Хуруу зай бүр 1.4 В цахилгаан хөдөлгөгч хүчтэй 0.38 Ом дотоод эсэргүүцэлтэй. Зайнуудыг 1.8 Ом эсэргүүцэлтэй гадаад хэлхээнд холбосон бол дараах зүйлсийг тооцоол.

- гадаад хэлхээнд унах хүчдэл,
 - зай бүрийн шонгууд дээрх потенциалын ялгавар.
14. Хуруу зайны цахилгаан хөдөлгөгч хүч 1.5 В ба дотоод эсэргүүцэл 0.50 Ом. Түүнийг R хувьсах резисторт холбов.

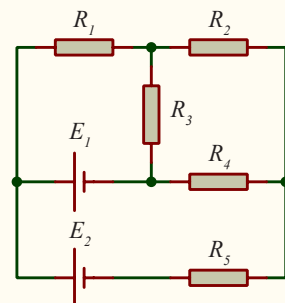
R/Ом	I/A	U/В	P/Вт
0			
0.10			
0.20			
0.30			
0.40			
0.50			
0.60			
0.70			
0.80			
0.90			
1.00			

- Өгсөн хүснэгтийг гүйцээ. Энд I-зайгаар гүйх гүйдлийн хүч; U-шонгуудын потенциалын ялгавар; P-гадаад резистор дээр ялгарах чадал.
- Хүснэгтээ ашиглан график байгуулж түүний тусламжтайгаар гадаад резисторын ялгаруулах чадал түүний эсэргүүцэлээс хэрхэн хамаарч байгааг тайлбарлана уу.

15. Металл утсыг хооронд нь гагнаж куб болгожээ. Хэрэв кубын нэг ирмэгийн эсэргүүцэл R бол кубын бүх боломжит оройнуудын хоорондох ерөнхий эсэргүүцлийг тодорхойл. Гагнаасыг цэгээр тэмдэглэжээ.



16. Хэлхээнд $E_1=65$ В, $E_2=39$ В цахилгаан хөдөлгөгч хүчтэй гүйдлийн үүсгүүрүүд, $R_1=20$ Ом, $R_2=R_3=R_4=R_5=10$ Ом эсэргүүцэлтэй резисторуудыг зурагт үзүүлснээр холбов. Хэлхээний салаа бүрийн гүйдлийн хүчийг тодорхойл. Гүйдлийн үүсгүүрүүдийн дотоод эсэргүүцлийг тооцохгүй.



Бүлэг 4

МЕХАНИК ХЭЛБЭЛЗЭЛ, ДОЛГИОН

- ▶ Хөвсгөл далайд моторт завь хурдлан давхиж усны гадаргад мяралзсан давалгаа үүсгэж байна. Моторт завины дуу эргэн тойронд нүргэлэн сонсдоно. Зөвхөн энд ч биш бидний эргэн тойронд навчисын сэржигнээн, машины дуу гэхчилэн олон долгион хүрээлэн байдаг. Эдгээр дуу долгион, хэлбэлзэл хэрхэн үүсэж хэрхэн тардаг юм бол? Энэ бүлэгт бид механик хэлбэлзэл, долгион тэдгээрийн шинж чанарын талаар гүнзгийрүүлэн судлах болно.

- ▶
 1. ГАРМОНИК ХЭЛБЭЛЗЭЛ
 2. УНТРАХ БА АЛБАДМАЛ ХЭЛБЭЛЗЭЛ, РЕЗОНАНС
 3. МЕХАНИК ДОЛГИОН
 4. ДУУНЫ ДОЛГИОН

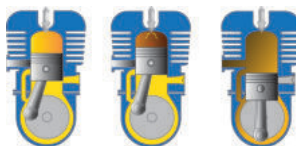


1. ГАРМОНИК ХЭЛБЭЛЗЭЛ

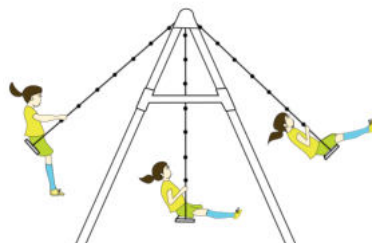
Механик хэлбэлзлийн үе, давтамж



Зураг 1.



Зураг 2.

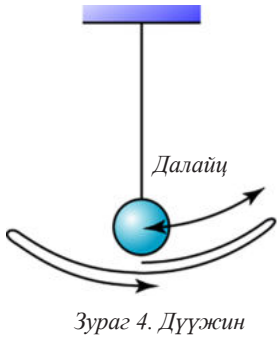


Зураг 3.

Байгаль дахь давтагдах хөдөлгөөн
 ↓
 Хэлбэлзэх хөдөлгөөн
 ↓
 Ажиглалт хийх
 ↓
 Загварчлах
 ↓
 Үзэгдлийг физик хэмжигдэхүүнээр илэрхийлэх
 ↓
 Зүй тогтлыг илрүүлэх

Дэлхийн хиймэл дагуул, хөдөлгүүрийн бүлүүр, савлуурын хөдөлгөөнийг хэрхэн явагдаж байгааг хэлэлцээрэй. Дагуул тодорхой үетэйгээр дэлхийг тойрон эргэж байна. Бүлүүр цилиндр дотор дээд доод хязгаарын хооронд давших хөдөлгөөнийг давтан хийнэ. Савлуур зүүн баруун тийш хоёр хязгаарын хооронд савлан хөдлөх бөгөөд савлаагүй үедээ тэнцвэрийн байранд зогсоно.

Тэнцвэрийн байрны орчимд явагдах давтагдах хөдөлгөөнийг механик хэлбэлзэл гэнэ. Хэлбэлзлийн үед биеийн хөдөлгөөний шинж чанарыг илэрхийлэгч хэмжигдэхүүнүүд тодорхой хугацаанд давтагдах буюу үелэн өөрчлөгддөг.



Зураг 4. Дүүжин

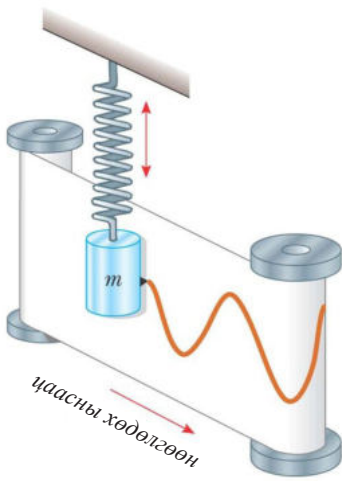
Туршилт 1: Хэлбэлзлийн үе давтамжийг олох

Хэрэглэгдэх зүйл: утас, ачаа, секундомер, штатив
Хийх дараалал:

1. Нэг метр орчим урт утсанд ачаа зүүж штативт бэхэлнэ.
2. Утсыг босоо чиглэлээс 15° – аас хэтрэхгүй хазайлгаж суллан тавиад хэлбэлзүүлнэ.
3. 10 удаа бүтэн хэлбэлзэх хугацааг хэмжинэ.
4. Нэг бүтэн хэлбэлзэх хугацаа ба 1 с хугацаанд хэлбэлзэх тоог ол.
5. Хазайлгах өнцгийг өөрчлөөд туршилтыг давт.

Хүснэгт 1.

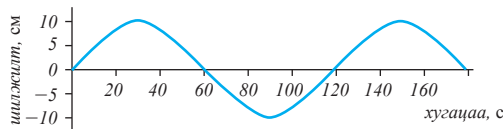
Хэлбэлзлийг илэрхийлэх хэмжигдэхүүн	Тэмдэглэгээ	Нэгж	Хэмжигдэхүүний физик утга
Үе	$T = \frac{t}{N}$	1 с	Нэг хэлбэлзэл хийх хугацаа
Давтамж	$\nu = \frac{N}{t}; \nu = \frac{1}{T}$	$1 \text{ Гц} = \frac{1 \text{ хэлбэлзэл}}{\text{с}} = 1 \text{ с}^{-1}$	Үеийн урвуу хэмжигдэхүүн. Нэг секундэд хийх хэлбэлзлийн тоо гэж утгачилдаг.



Зураг 5.
Хэлбэлзлийг зураглах

Хэлбэлзлийг бичих (дүрслэх) нэг аргыг 5-р зурагт харуулав. Хэлбэлзэж буй ачааны хажуу хэсэгт бэхтэй тэмдэглэгчийг цаасны гадаргад шүргүүлэн тогтоогоод ачааг хэлбэлзүүлэнгээ цаасыг жигд татаж хөдөлгөвөл цаасан дээр хэлбэлзэл бичигдэнэ. Босоо тэнхлэгт ачааны тэнцвэрээс хазайх шилжилтийг хэвтээ тэнхлэгт хугацааг авбал хэлбэлзлийн шилжилт – хугацааны диаграмм зурагдана (Зураг 5).

Дасгал Зураг 6-д үзүүлсэн хэлбэлзлийн шилжилт – хугацааны диаграммаас хэлбэлзлийн далайц, үе, давтамжийг тодорхойл.



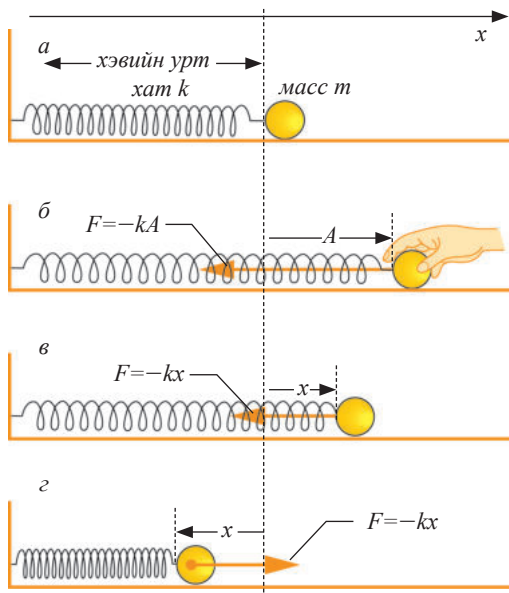
Зураг 6. Пүрштэй ачааны хэлбэлзэл

Энгийн гармоник хэлбэлзлийн хууль

Хэлбэлзэгч биенийг тэнцвэрийн байрнаас хазайлгахад яагаад хэлбэлздэг шалтгааныг пүршин ба утсан дүүжинд тодруулан үзье.

1. Үрэлтгүй хэвтээ гадарга дээрх пүрш- ачааны хэлбэлзэл

Гөлгөр хэвтээ гадарга дээр хөдөлгөөнгүй тогтоосон хавтанд k хаттай пүршний нэг үзүүрийг бэхлээд нөгөө үзүүрт m масстай ачаа холбон түүнийг A хэмжээгээр татаад орхивол хоёр тийш хэлбэлзэнэ.



Зураг 7. Пүри, ачааны системийн хэлбэлзэл

Ачаанд хүндийн хүч, хэвтээ гадаргын нормаль реакцийн хүч болон пүршний харимхай хүчний нийлбэр үйлчлэлээр хурдатгал үүснэ. Ньютоны 2-р хуулиар

$$\vec{F} = m\vec{a}; \quad \vec{F}_d + \vec{N} + \vec{F}_{yx} = m\vec{a}$$

Хүндийн хүч ба нормаль реакцийн хүчнүүд харилцан тэнцэх тул

$$\vec{F}_d + \vec{N} = 0; \quad \vec{F} = \vec{F}_d + \vec{N} + \vec{F}_{yx} = \vec{F}_{yx}$$

Ачаанд зөвхөн пүршний уян харимхай хүч үйлчилнэ гэж болно. Уян харимхай хүч пүршний деформацийн эсрэг буюу ачааны шилжилтийн эсрэг чиглэнэ. Ачааны янз бүрийн байрлалд уян харимхайн хүчийг зурахад тэнцвэрийн байрлал руу чиглэсэн нь харагдаж байна (Зураг 7). Тэнцвэр рүү чиглэсэн буцаах хүч хэлбэлзлийн шалтгаан болох бөгөөд пүрш – ачаа системд уян харимхай хүч нь буцаах хүч юм. Гукийн хуулиар уян харимхай хүч деформацийн хэмжээтэй пропорционал учраас пүршийг анх сунгасан байрлалд хамгийн их, тэнцвэр

рүү ойртох тутам багасч тэнцвэр дээр тэг болоод цааш пүрш шахагдахад дахин ихсэнэ. Зурагт үзүүлсэн чиглэлд x тэнхлэг сонгон авч проекцыг бичвэл $F = -kx$.

$F = ma$ тэгшитгэлд орлуулбал $ma = -kx$. Эндээс хурдатгалыг олбол

$a = -\frac{k}{m}x$ болно. Ачааны хурдатгал түүний шилжилттэй пропорционал, эсрэг чиглэлтэй байна $a \sim -x$.

2. Математик дүүжингийн хэлбэлзэл

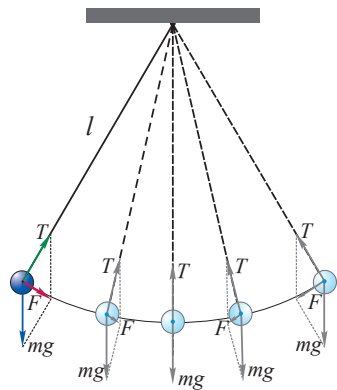
Ачааг зүүсэн утас нь сунахгүй, хөнгөн (массыг тооцохгүй), агаарын эсэргүүцэл байхгүй гэж үзэн математик дүүжин гэдэг загварыг хэрэглэдэг.

l урттай утас, m масстай ачаанаас тогтох математик дүүжинг тэнцвэрийн байрлалаас хазайлгаад суллан тавихад хэлбэлзэнэ. Ачаанд хүндийн хүч, утасны татах хүчний нийлбэр үйлчлэлээр хурдатгал үүснэ. Ньютоны 2-р хуулиар

$$\vec{F} = m\vec{a}; \quad \vec{F}_d + \vec{T} = m\vec{a}$$

Нийлбэр \vec{F} хүчийг параллелграммын аргаар олоход тойрогт шүргэгч чиглэлтэй бөгөөд дүүжинг тэнцвэрийн байр руу буцаах хандлагатай болох нь харагдана (Зураг 8).

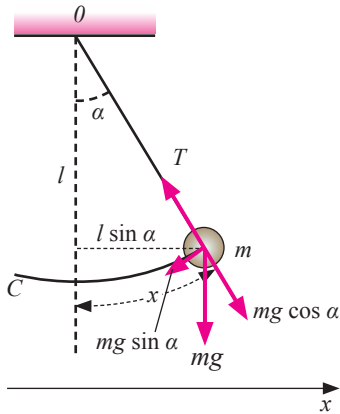
Зурагт үзүүлснээр x тэнхлэг сонгон авья. Дүүжин босоо чиглэлд a өнцөг үүсгэсэн үед ачаанд үйлчлэх хүчнүүд зураад $\vec{F}_d = m\vec{g}$ хүндийн хүчийг утсанд



Зураг 8.



Чөлөөт хэлбэлзлийн хууль: Хэлбэлзэгч биеийн хурдатгал шилжилттэй шууд пропорционал хамааралтай, эсрэг чиглэлтэй.



Зураг 9.

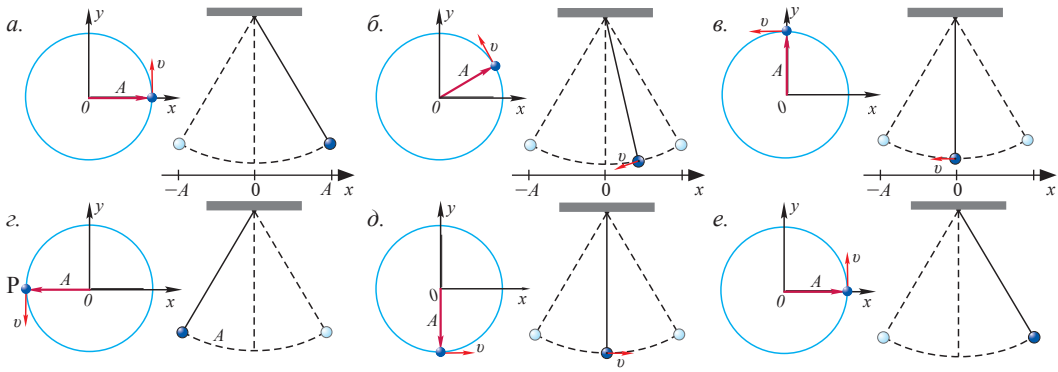
перпендикуляр ба утасны дагуу хоёр байгуулагч болгон задалъя. Хүндийн хүчний перпендикуляр байгуулагч нь дүүжинг тэнцвэр рүү буцаах хүч болно. Буцаах хүч:

$F = -mg \sin \alpha$, $F = ma$ тэгшитгэлд орлуулбал $-mg \sin \alpha = ma$; $a = -g \sin \alpha$. α өнцөг бага тохиолдолд $\sin \alpha \approx \alpha$; α – хазайлтын өнцгийн радиан хэмжээ. Ачаа тойргоор эргэх нумын урт нь ойролцоогоор x тэнхлэг дээрх шилжилттэй тэнцүү. Өнцгийн радиан хэмжээний тодорхойлолтоор $\alpha = \frac{x}{l}$. Үүнийг хурдатгалын илэрхийлэлд орлуулбал

$a = -\frac{g}{l}x$. Ачааны хурдатгал шилжилтийн хэмжээтэй пропорционал байна: $a \sim -x$.

Тойргоор эргэх хөдөлгөөн ба хэлбэлзэл

Тойргоор жигд эргэх хөдөлгөөнтэй адилтган харьцуулж хэлбэлзэх хөдөлгөөний зүй тогтлыг гаргая. A далайцтай дүүжин нэг хэлбэлзэх хугацаа, P бие A радиустай тойргоор нэг эргэх хугацаатай тэнцүү байхаар тохируулна. Зураг 10-д тойргоор эргэх хөдөлгөөн дүүжингийн хөдөлгөөнийг харьцуулан харуулав.



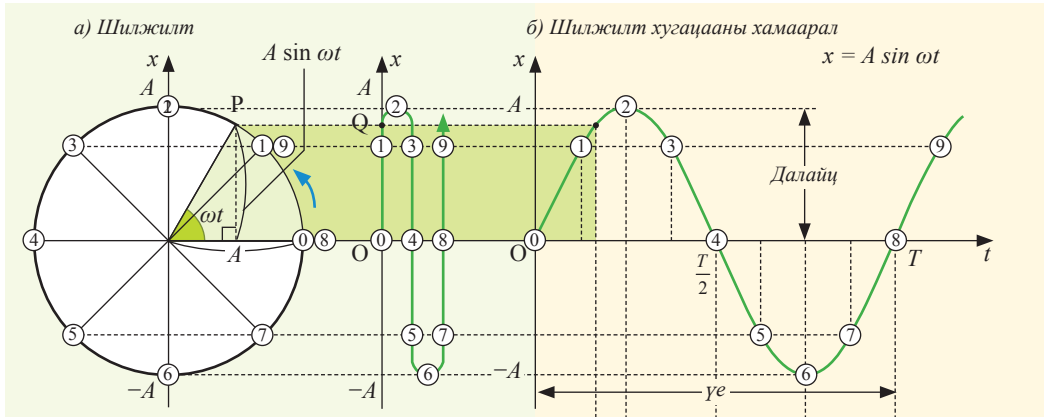
Зураг 10.

Тойргоор эргэх P биеийн хөдөлгөөнийг эгц доороос нь ажиглах буюу доороос гэрэлтүүлэн дэлгэц дээр түүний сүүдрийг харвал x -тэнхлэг дээр $-A$, $+A$ хоёр цэгийн хооронд шилжин хөдөлнө. Энэ сүүдрийн хэмжээ тойргоор хөдлөх биеийн радиус векторын x -тэнхлэг дээрх проекцыг харуулна. Дүүжинг мөн x -тэнхлэг дээр проекцлон харахад үүнтэй нэгэн зэрэг $-A$, $+A$ хоёр цэгийн хооронд хэлбэлзэнэ.

A радиустай тойргоор ω тогтмол өнцөг хурдтай цагийн зүүний эсрэг эргэж буй P цэгийн сүүдрийн (x - тэнхлэг дээрх проекц) хөдөлгөөнийг хугацаанаас хамаарсан функц болгон илэрхийлье. Зураг 11-д P цэгийн анхны агшин дахь байрлал 0 , x - тэнхлэг дээрх проекц 0 .

Адилтгалын арга
↓
Хэцүү зүйлийг энгийн болгож хялбарчлах

Сүүдрийн хөдөлгөөнөөр хэлбэлзлийг илэрхийлэх



Зураг 11. Тойргоор эргэх биеийн сүүдрийн хөдөлгөөн

Тойргоор эргэх биеийн тойрог дээрх байрлал болон x тэнхлэг дээрх проекцын харгалзах байрлалыг (0) – (9) хүртэл дугаарлан харуулав. Хажуугийн диаграмм дээр эдгээр байрлалыг хугацаанаас хамааруулан харуулсан байна. Р цэгийн сүүдрийн (проекц) хэмжээг дурын t агшинд тодорхойлъё.

Хэлбэлзэх хөдөлгөөнийг илэрхийлэх физик хэмжигдэхүүнүүдийг хугацаанаас хамаарсан функцээр илэрхийлж болдог

t хугацаанд эргэсэн өнцөг $\varphi = \omega t$, үүнд харгалзах проекцыг $x = OQ$ гэж тэмдэглэвэл зураг дахь

$$t \text{ гэш өнцөгт гурвалжингаас } \sin \varphi = \frac{OQ}{A} = \frac{x}{A}; \sin \omega t = \frac{x}{A} \Rightarrow x = A \sin \omega t$$

Дүүжин үүнтэй адил хуулиар хөдлөх тул хэлбэлзэгч биеийн шилжилт хугацааны хамаарал синус функцээр илэрхийлэгдэж байна.

Чөлөөт хэлбэлзлийн тэгшитгэл: $x = A \sin \omega t$
 A – шилжилтийн хамгийн их утга буюу далайц

Тойргоор эргэх хөдөлгөөнд ω өнцөг хурдыг харуулдаг. Хэлбэлзэлд ω ямар зүйлийг илэрхийлэхийг мэдэхийн тулд $t_1, t_2 = T + t_1$ агшин дахь шилжилтүүдийг бичье.

$$x_1 = A \sin \omega t_1, x_2 = A \sin \omega(t_1 + T) = A \sin(\omega t_1 + \omega T) \text{ шилжилтүүд тэнцүү } x_1 = x_2$$

Синус функцийн утга 2π - ээр үелдэг. $\omega T = 2\pi$

Хүснэгт 2.

Эндээс $\omega = \frac{2\pi}{T}$; $\omega = 2\pi\nu$.
 Хэлбэлзэх хөдөлгөөнд ω -ийг тойрох давтамж буюу өнцөг давтамж гэж нэрлэнэ.

Хэмжигдэхүүн	Тэмдэглэгээ	Нэгж	Утга
Тойрох давтамж	$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$	$1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	2π секундэд хийх хэлбэлзлийн тоо гэж утгачилдаг.
Далайц	$A = x_{\text{max}} $	1 м	Хазайлтын хамгийн их утга

Энгийн гармоник хэлбэлзлийн үе давтамж

Чөлөөт хэлбэлзлийн шилжилт хугацаанаас синус (косинус) функцээр $x(t) = A \sin \omega t$ өөрчлөгддөг. Далайц нь хугацааны явцад тогтмол, шилжилт нь синус (косинус) функцээр илэрхийлэгддэг хэлбэлзлийг энгийн гармоник хэлбэлзэл гэж нэрлэдэг.

Биеийн хөдөлгөөний хууль $a = -\omega^2 x$ хэлбэртэй бол гармоник хэлбэлзэл хийх бөгөөд үе давтамжийг $\omega = 2\pi\nu$; $\nu = \frac{1}{T}$ илэрхийллүүдээр олно.

$$\text{Пүршин дүүжин: } a = -\frac{k}{m}x; \omega^2 = \frac{k}{m}; \nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{m/k}}; T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Математик дүүжин: $a = -\frac{g}{l}x$; $\omega^2 = \frac{g}{l}$; $v = \frac{1}{2\pi\sqrt{l/g}}$; $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

Пүршин дүүжинд $m = const \Rightarrow T \sim \frac{1}{\sqrt{k}}$; $k = const \Rightarrow T \sim \sqrt{m}$

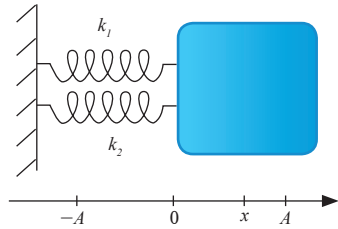
Математик дүүжинд $g = const \Rightarrow T \sim \sqrt{l}$

Цуваа, зэрэгцээ холбогдсон пүршний нийлбэр хат

Резистор, конденсаторуудыг цуваа зэрэгцээ холбосон үед тэдгээрийн ерөнхий эсэргүүцэл, багтаамжийг олох талаар өмнө үзэж байсан. Харин пүршийг цуваа ба зэрэгцээ холбох үед тэдгээрийг нэг пүршээр төлөөлүүлбэл хат нь ямар байх вэ?

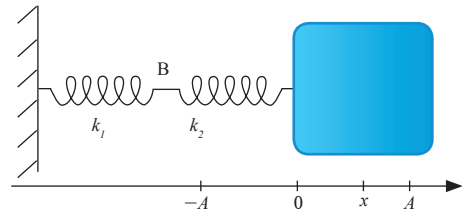
а. Зэрэгцээ холболт. Ачааг A хэмжээгээр шилжүүлж татаад суллан орхивол хэлбэлзэнэ. Ачааны шилжилт x байхад хоёр пүрш адилхан x суналттай байх тул ачааны хөдөлгөөний тэгшитгэлийг бичвэл $ma = -k_1x - k_2x = -(k_1 + k_2)x = -kx$

Хоёр пүршийг $k = k_1 + k_2$ хаттай нэг пүршээр сольж болно. Иймд ерөнхий хат $k = k_1 + k_2$. Ижил k_1 хаттай N ширхэг пүршийг зэрэгцээ холбосон бол $k = k_1N$.



Зураг 12.

б. Цуваа холболт. Ачааг A хэмжээгээр шилжүүлж татаад суллан орхивол хэлбэлзэнэ. Ачааны шилжилт x байхад хоёр пүрш харгалзан x_1, x_2 суналттай байх ба ачаанд зөвхөн баруун пүршний харимхай хүч үйлчлэх тул ачааны хөдөлгөөний хууль бичвэл: $ma = -k_2x_2$. Хоёр пүршийг залгасан В цэгт хоёр тийш тэнцүү хэмжээний харимхай хүч үйлчилнэ. $k_1x_1 = k_2x_2$. Нийлбэр шилжилт нь $x = x_1 + x_2$



Зураг 13.

Эдгээрийг нэгтгэвэл:
$$\begin{cases} ma = -k_2x_2 \\ k_1x_1 = k_2x_2 \\ x = x_1 + x_2 \end{cases}$$

$$x_1 = \frac{k_2x_2}{k_1}; x = \frac{k_2x_2}{k_1} + x_2 = \frac{k_2 + k_1}{k_1}x_2; ma = -k_2x_2 = -\frac{k_1k_2}{k_2 + k_1}x = -kx$$

Хоёр пүршийг $k = \frac{k_1k_2}{k_2 + k_1}$ хаттай нэг пүршээр сольж болно. Иймд ерөнхий хатыг $\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$ илэрхийллээр олно.

Ижил k_1 хаттай N ширхэг пүршийг цуваа холбосон бол $k = \frac{k_1}{N}$.

Гармоник хэлбэлзлийн хурд, хурдатгал

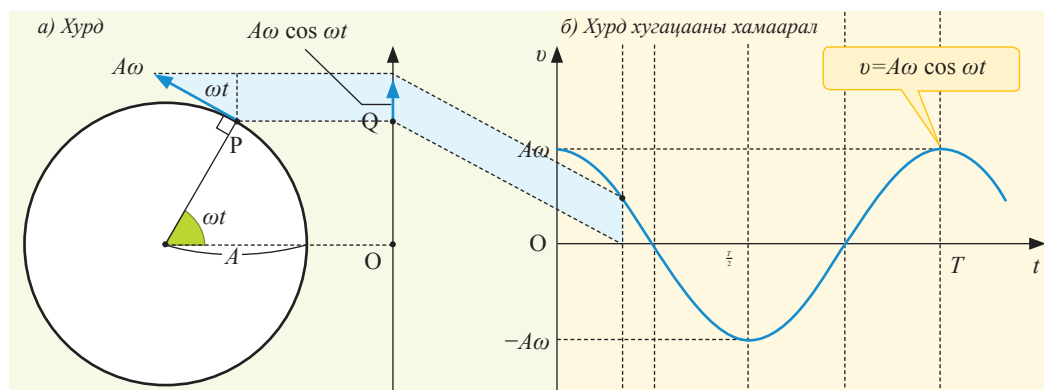
Гармоник хэлбэлзлийн шилжилт хугацааны хамаарлыг тойргоор эргэх хөдөлгөөнтэй адилтган үзэж x тэнхлэг дээрх проекцыг ашиглан $x = A \sin \omega t$ илэрхийлэл гаргасан.

Адилтгалыг цааш үргэлжлүүлэн хэлбэлзэгч биеийн хурд, хурдатгал хугацаанаас хамаарах хамаарлыг олж болно.

Гармоник хэлбэлзлийн хурд. A радиустай тойргоор ω өнцөг хурдтай эргэхэд шугаман хурд $v_0 = A\omega$. Тойргоор жигд эргэж буй биеийн хурд тогтмол хэмжээтэй бөгөөд тойрогт шүргэгч чиглэлтэй. P цэгт байгаа биеийн хурдны x тэнхлэг дээрх проекцыг зураг 14-т гурвалжингаас олъё. $v(t) = A\omega \cos \omega t$; $v_0 = A\omega$ нь гармоник хэлбэлзлийн хувьд хурдны максимум утгыг

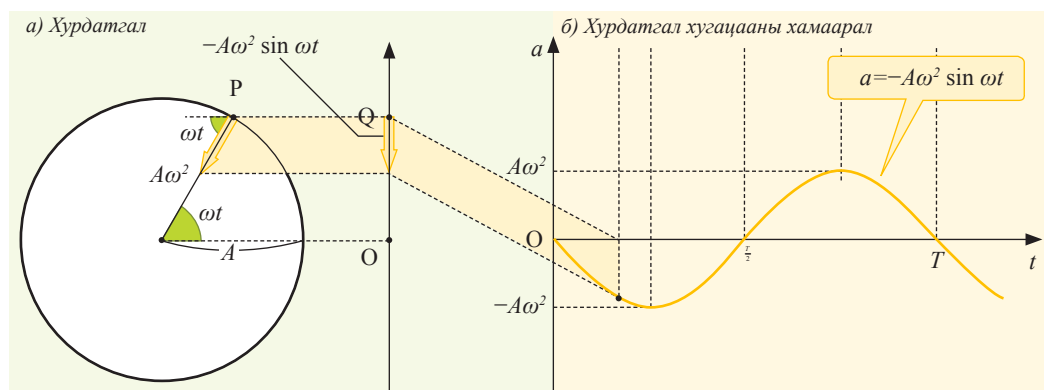
БҮЛЭГ 4. МЕХАНИК ХЭЛБЭЛЗЭЛ, ДОЛГИОН

харуулна. Тэнцвэрийн байрыг дайрах агшинд хурд хамгийн их, тэнцвэрээс хамгийн их ходоход хурд тэг болно. Шилжилтээс хугацаагаар уламжлал авч хурд хугацааны хамаарлыг олбол: $x(t)=A\sin\omega t$; $v(t)=x'(t)=A\omega\cos\omega t$



Зураг 14. Гармоник хэлбэлзлийн хурдыг олох

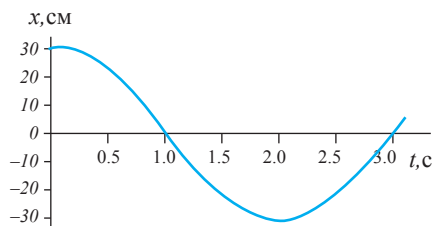
Гармоник хэлбэлзлийн хурдатгал. А радиустай тойргоор ω өнцөг хурдтай эргэхэд төвд тэмүүлэх хурдатгал: $a_0 = \frac{v_0^2}{A} = A\omega^2$. P цэгт байгаа биеийн хурдатгалын х-тэнхлэг дээрх проекцыг зураг 15-ын гурвалжингаас олъё. $a = -A\omega^2 \sin\omega t$; $a_0 = A\omega^2$ нь гармоник хэлбэлзлийн үед хурдатгалын хамгийн их хэмжээг харуулна. Тэнцвэрээс хамгийн их холдох байрлалд хурдатгал хамгийн их, тэнцвэрийг дайрахад тэг болно. Хурдаас хугацаагаар уламжлал авч хурдатгал хугацааны хамаарлыг олбол. $x(t)=A\sin\omega t$; $a(t)=v'(t)=x''(t)=-A\omega^2\sin\omega t$



Зураг 15. Гармоник хэлбэлзлийн хурдатгалыг олох

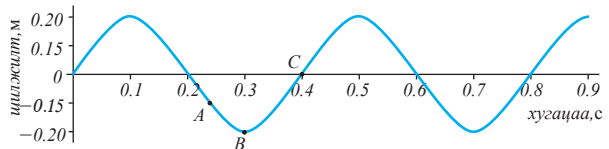
Дасгал

- Хэлбэлзэгч биеийн шилжилт хугацааны хамаарал өгөгдөв. Графикаас дараах хэмжигдэхүүнүүдийг ол.
 - $t = 0$ с агшин дахь хурдыг $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ нэгжээр илэрхийл.
 - Хамгийн их хурдыг $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ нэгжээр илэрхийл.
 - $t = 1.0$ с агшинд хурдатгалыг $\text{см}\cdot\text{с}^{-2}$ нэгжээр илэрхийл.



Зураг 16.

2. Зурагт гармоник хэлбэлзлийн шилжилт – хугацааны хамаарал өгөгдөв.



Зураг 17.

- Далайц, үе, давтамж
- Тойрох давтамж
- А цэг дэх шилжилт
- В цэг дэх хурд, хурдатгал
- С цэг дэх хурд, хурдатгалыг ол.

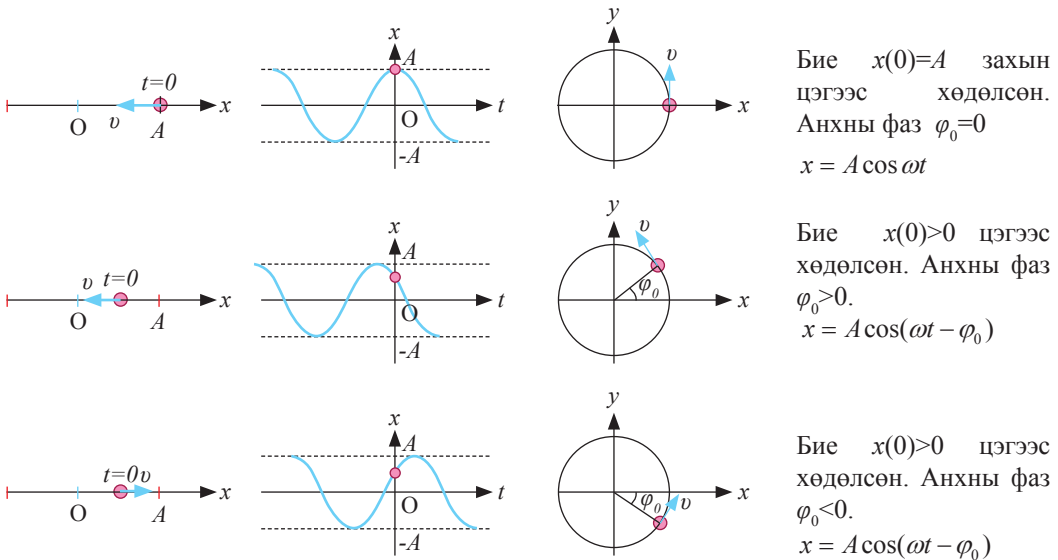
3. Хэлбэлзлийн тэгшитгэл $x = 3.0 \cdot 10^{-4} \sin(240\pi t)$ гэж өгөгдсөн ба шилжилт метр нэгжтэй.

- Далайц, давтамж, үе
- Хурд хугацаанаас хамаарах хамаарал
- Хурдатгал хугацаанаас хамаарах илэрхийллийг ол.

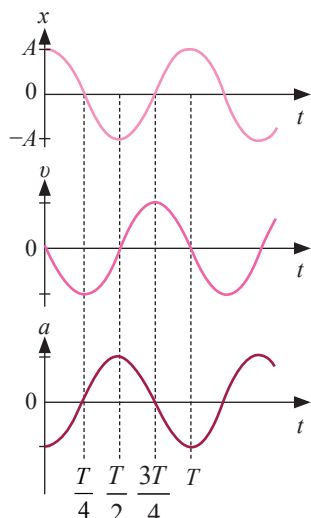
4. Хоёр талаас нь пүршээр тэргийг бэхлэхэд пүршнүүд хэвийн урттай байв. $t=0$ с агшинд тэргийг нэг тийш нь 0.15 м түлхээд суллан тавихад 2.0 с үетэйгээр хэлбэлзэв.

- x шилжилт t хугацаанаас хамаарах тэгшитгэлийг бич.
- Шилжилт – хугацааны хамаарлыг 2 бүтэн хэлбэлзэх хугацаанд байгуул.

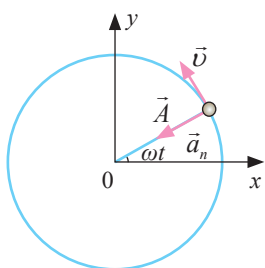
Хэлбэлзлийн фаз. Хэлбэлзэх хөдөлгөөн анхны агшинд ямар байрлалаас эхэлснийг дураараа сонгон авах боломжтой. Үүнээс шалтгаалан түүний шилжилт, хурд, хурдатгалын хугацааны хамаарлын математик илэрхийлэл ялгаатай байдаг. Гармоник хэлбэлзлийн шилжилт нь ерөнхий тохиолдолд $x=x(t)=A\cos(\omega t+\varphi_0)$ гэж илэрхийлэгдэнэ. Үүний косинусын доторх хэсгийг хэлбэлзлийн фаз хэмээн $\varphi(\varphi=\omega t+\varphi_0)$ гэж тэмдэглэх ба хэлбэлзэгч биеийн төлөв байдлыг илэрхийлнэ. $t=0$ үед $\varphi=\varphi_0$ гарах тул φ_0 -ийг анхны фаз гэдэг. Ижил далайц, давтамжтай боловч өөр фазтай хэлбэлзлүүдийг зураг 18-д харуулав.



Зураг 18. Ялгаатай анхны фазтай хэлбэлзлүүд



Зураг 19.



Зураг 20. Шилжилт, хурд, хурдатгалын фазын зөрөө

Хурд, хурдатгалын фазын зөрөө

$x = x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$ энд уламжлалын тухай ойлголтыг хэрэглэвэл

$$v(t) = x'(t) = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0);$$

$$a(t) = v'(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x(t)$$

Хэлбэлзэгч бие анхны агшинд $x = A$ байрлалд байсан бол x - тэнхлэгийн сөрөг чиглэлд хөдөлнө.

$$x(t) = A \cos \omega t, \text{ анхны фаз } \varphi_0 = 0$$

$$v(t) = x'(t) = -A\omega \sin \omega t = A\omega \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Хурд нь шилжилтээсээ $\frac{\pi}{2}$ - ээр түрүүлж хувьсана.

$$a(t) = v'(t) = -A\omega^2 \cos \omega t = A\omega^2 \cos(\omega t + \pi)$$

Хурдатгалын фаз хурднаас $\frac{\pi}{2}$ - ээр, шилжилтээс π - ээр түрүүлж хувьсана. Мөн хурдатгалыг шилжилттэй эсрэг

фазтай гэдэг. Зураг 19 - д $x(t)$, $v(t)$, $a(t)$ хамаарлын

графикийг харуулав.

Гармоник хэлбэлзлийг тойргоор жигд эргэх хөдөлгөөнтэй адилтган илэрхийлж болох тул тойргоор эргэж буй биеийн радиус вектор, хурд, хурдатгалыг нэг дор зурж ажиглавал

хурд нь радиус вектороос $\frac{\pi}{2}$ фазын зөрөөтэй, хурдатгал

нь хурднаас $\frac{\pi}{2}$ харин радиус вектороос π фазын зөрөөтэй

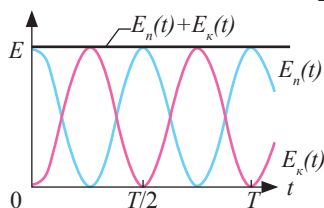
болох нь харагдана (Зураг 20). Бие тойргоор эргэхэд эдгээр векторын харилцан байршил өөрчлөгдөхгүй.

Гармоник хэлбэлзлийн энерги

Гармоник хэлбэлзэл хийж байгаа системд үрэлтийн хүч, эсэргүүцлийн хүч үйлчлэхгүй учраас нийт механик энерги хадгалагдана.

Системийн нийт механик энергийг E гэж тэмдэглэе. Пүршний суналт x , ачааны хурд v үед

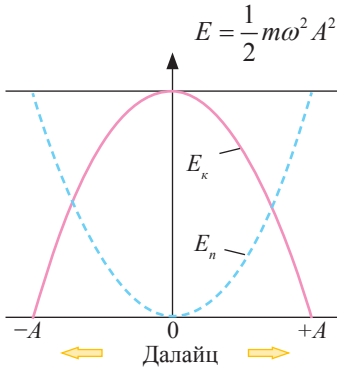
$$\text{нийт энерги } E = E_k + E_n = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2.$$



Зураг 21. Биеийн кинетик ба потенциал энерги харилцан хувирна.



Гармоник хэлбэлзлийн нийт энерги давтамжийн квадрат ба далайцын квадраттай пропорционал.



Зураг 22.

Энергийг шилжилтээс хамааруулан илэрхийлье. Пүрш- ачаа системийн хувьд:

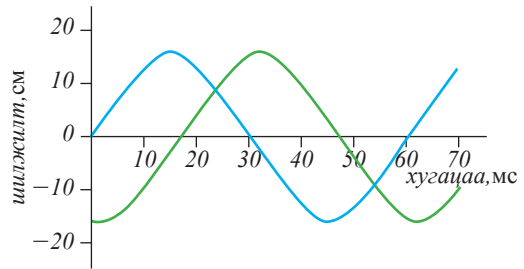
- Потенциал энерги $E_n = \frac{kx^2}{2}$ (зураг 22-д тасархай шугамаар дүрсэлсэн парабол).
- Кинетик энерги $E_k = E - E_n = E - \frac{kx^2}{2}$.

Зураг 22-г энерги шилжилтээс хамаарах хамаарлыг харуулав.

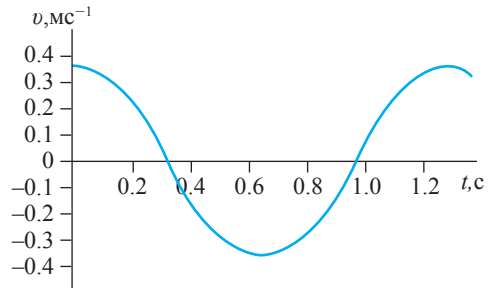
Графикаас кинетик энерги ба потенциал энергийн харилцан шилжилтийн талаар ярилцаарай.

Дасгал

1. Зураг 23 – д хоёр ижил хэлбэлзэл үүсгэгчийн үүсгэсэн хэлбэлзлийн шилжилт – хугацааны хамаарлыг харуулав. Энэ хоёр хэлбэлзлийн фазын зөрөөг градус ба радианаар илэрхийл.
2. Утсан дүүжин 0.10 м далайцаар 1.5 Гц давтамжтай хэлбэлзэж байв. $t=0$ с агшинд тэнцвэрийн байрыг эерэг чиглэлд дайрсан бол x шилжилтийг далайц A , тойрох давтамж ω ба t хугацаагаар илэрхийлэх тэгшитгэл бич. $t=0.50$ с агшинд шилжилтийг тодорхойл.
3. Зураг 24 – д 2.0 кг масстай биеийн хэлбэлзлийн хурд хугацаанаас хамаарах хамаарлыг харуулав.
 - а. Хурдны хамгийн их утга
 - б. Кинетик ба потенциал энергийн хамгийн их утга
 - в. Хурдатгалын хамгийн их утга
 - г. Буцаах хүчний хамгийн их хэмжээг ол.

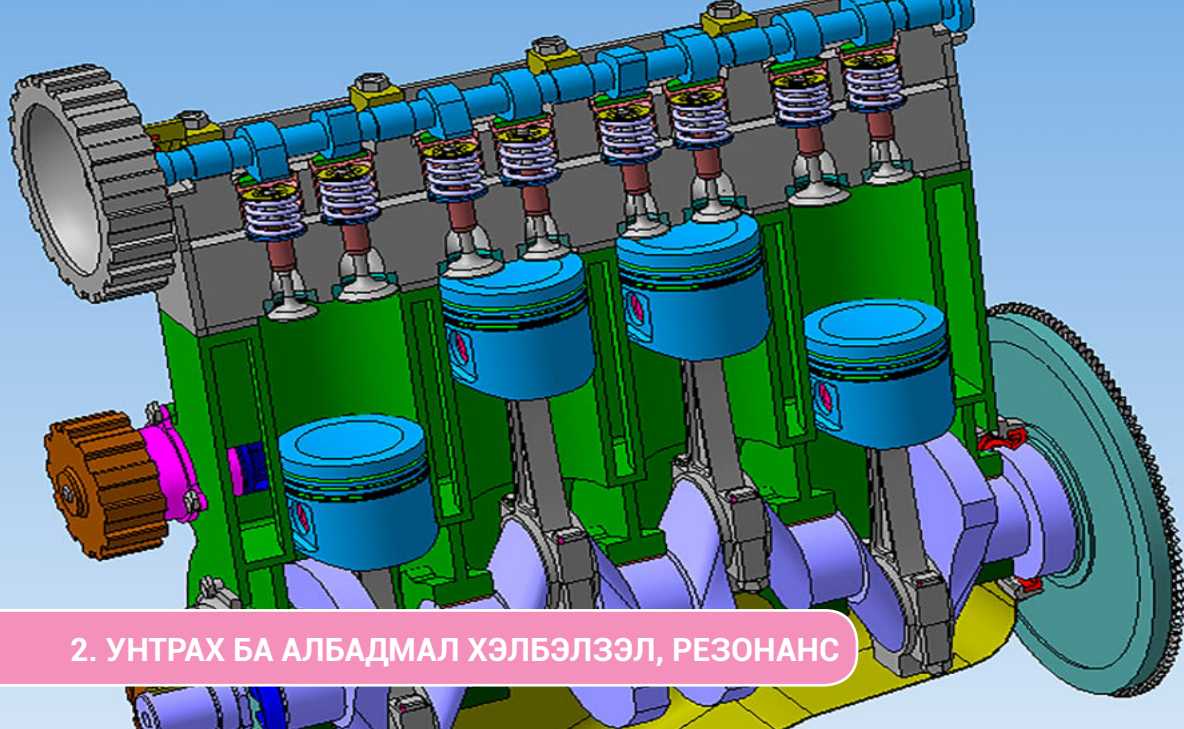


Зураг 23.



Зураг 24.

4. $m_1=3m$ ба $m_2=2m$ масстай ачаануудыг k хаттай пүршнээс зүүхэд b хэмжээгээр сунажээ.
 - а. m_2 масстай доод ачааг таслахад ямар далайцтай хэлбэлзэх вэ?
 - б. Үлдсэн ачааны хэлбэлзлийн тойрох давтамжийг ол.
5. Бие $x(t)=A\cos\omega t$ гармоник хэлбэлзэл хийв. Тэнцвэрээс $\frac{3}{5}A$ зайтай байрлал дахь хурдыг тэнцвэрийн байран дахь хурдад харьцуулсан харьцааг ол.



2. УНТРАХ БА АЛБАДМАЛ ХЭЛБЭЛЗЭЛ, РЕЗОНАНС

Унтрах хэлбэлзэл

Чөлөөт хэлбэлзлийг судлахдаа хэлбэлзлийн системд хөдөлгөөнийг саатуулах хүчний нөлөөг бага гэж хялбарчлан гармоник хэлбэлзлийн загвар хэрэглэсэн.

Бодит амьдралд үрэлт болон агаарын эсэргүүцлээс шалтгаалан гармоник хэлбэлзэл хийж чадахгүй. Хэлбэлзлийн системийн анхны энергийн нөөц нь саатуулах хүчний эсрэг ажилд зарцуулагдан хорогдсоор хэлбэлзлийн далайц буурч улмаар хэлбэлзэл зогсдог.

Эсэргүүцлийн хүчний үйлчлэлээр унтрах хэлбэлзэл

Эсэргүүцлийн хүч хурдаас шууд пропорционал хамаарах тохиолдлыг авч үзье. Жишээ нь агаар ба шингэн дотор бие хөдлөхөд (бага хурдтай) үүсэх эсэргүүцлийн хүч хурдтай шууд хамааралтай байдаг.

$$F_s = -\alpha v$$

α - биеийн шугаман хэмжээ ба орчны зуурамтгай шинж чанараас хамаарсан коэффициент.

Ийм хүч үйлчлэхэд хэлбэлзлийн далайц хэрхэн өөрчлөгддөг вэ?

Эсэргүүцлийн хүчний хийсэн ажилтай тэнцүүгээр энерги хорогдоно.

$\Delta x = v \Delta t$ бага шилжилт хийхэд $\Delta E = F_s \Delta x = -\alpha v \Delta x = -\alpha v^2 \Delta t$.

$$\Delta t \rightarrow 0 \text{ тохиолдолд } \frac{dE}{dt} = -\alpha v^2 = -\frac{2\alpha}{m} \frac{mv^2}{2} = -\frac{2\alpha}{m} E_k$$

Кинетик энерги хэлбэлзлийн үед үелэн хувьсах учраас олон үеийн хувьд дундаж кинетик энергийг нийт энергийн хагастай тэнцүү гэе.

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{2\alpha}{m} \langle E_k \rangle; \langle E_k \rangle = \frac{E}{2}; \frac{dE}{dt} = -\frac{2\alpha}{m} \frac{E}{2} = -2\beta E \quad \text{Энд: } \beta = \frac{\alpha}{2m}; \frac{dE}{dt} = -2\beta E; \quad (1)$$

β - унтралтын коэффициент

Уламжлал нь эргээд уг функц гардаг шинж чанар экспоненциал функцэд байдаг. $(e^x)' = e^x$



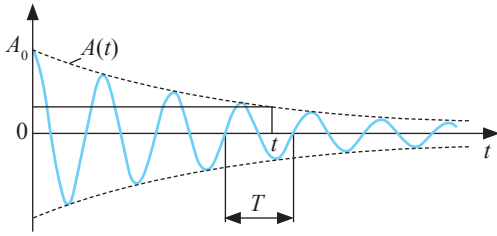
Эсэргүүцлийн улмаас далайц нь буурах хэлбэлзлийг унтрах хэлбэлзэл гэнэ.

Хэлбэлзлийн систем

Энерги алдана

Орчин

Иймд энергийн функцийг $E = E_0 e^{-2\beta t} = E_0 \exp(-2\beta t)$ гэж таамаглаж болно. Үүнийг (1) тэгшитгэлд орлуулан шалгаж болно.



Зураг 25.

E_0 -системийн анхны нийт энерги. $E \sim A^2$ байдаг учраас $A(t) = A_0 \exp(-\beta t)$. Зураг 25-д унтрах хэлбэлзлийн далайцын бууралт ба шилжилт - хугацааны хамаарлыг харуулав.

$A(t) = A_0 \exp(-\beta t)$ (2) илэрхийллээс $t = \tau = \frac{1}{\beta}$ хугацаанд $A = \frac{A_0}{e}$ болж далайц e дахин багасдаг. Энэ τ хугацааг хэлбэлзлийн унтрах хугацаа гэж тооцно. (2) томъёогоор бол хязгааргүй удаан үргэлжилнэ. Унтралтын

коэффициент β их байх тутам далайц хурдан багасна.

$\tau \gg T$ тохиолдолд унтралт бага буюу унтрах хугацаанд олон хэлбэлзэл хийж амжина.

Пүршин дүүжингийн унтрах хэлбэлзлийн үед шилжилтийн математик илэрхийллийг гаргая. Пүрштэй холбоотой ачаанд уян харимхай хүчнээс гадна хурдтай пропорционал эсэргүүцлийн хүч үйлчилнэ. Хөдөлгөөний хууль

$$m\ddot{x} = -kx - \alpha\dot{x}; \quad m\ddot{x} = -kx - \alpha\dot{x} \Rightarrow \ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3)$$

$$\text{Үүнд } \omega_0^2 = \frac{k}{m}; \quad 2\beta = \frac{\alpha}{m}$$

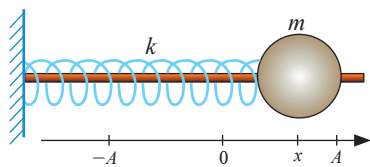
\dot{x} - шилжилтийн уламжлал буюу хурд; \ddot{x} - шилжилтийн 2-р эрэмбийн уламжлал буюу хурдатгал. Үүний шийд

$$x(t) = A_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega_1 t + \varphi_0)$$

$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ - албадмал хэлбэлзлийн давтамж; φ_0 - анхны фаз. Шийдийг (3) тэгшитгэлд орлуулах замаар шалгаж болно.

Үрэлтийн хүчний үйлчлэлээр унтрах хэлбэлзэл хийх

m масстай бөмбөрцгийн дундуур нүхлэн саваа байрлуулж бөмбөрцгийг k хагтай пүрштэй холбон хэлбэлзүүлжээ (Зураг 26). Бөмбөрцөгт агаарын эсэргүүцлийн хүч үйлчлэхгүй харин гулсалтын үрэлтийн хүч үйлчлэх тохиолдлыг судалъя. Гулсахын үрэлтийн хүч хэмжээгээрээ тогтмол μmg (μ - гулсахын үрэлтийн коэффициент), харин v хурдны эсрэг чиглэлтэй учир хурдаас хамаарч чиглэл өөрчлөгдөнө. Тайвны үрэлтийн ба гулсалтын үрэлтийн коэффициентийн ялгааг бага гэж үзье.



Зураг 26. Үрэлтийн хүчний үйлчлэлээр хэлбэлзэх

Бөмбөрцгийн хөдөлгөөний тэгшитгэл:

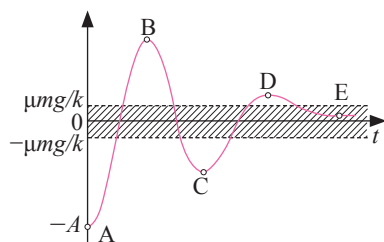
$$\begin{cases} m\ddot{x} = -kx - \mu mg; & \dot{x} > 0 \text{ үед} \\ m\ddot{x} = -kx + \mu mg; & \dot{x} < 0 \text{ үед} \end{cases} \quad (1)$$

$$\quad (2)$$

Эхний агшинд пүршийг тэнцвэрээс зүүн тийш A хэмжээгээр хазайлган барьж байгаад суллан тавьжээ. Энэ үед пүршний харимхайн kA хүч, тайвны үрэлтийн хүчний хамгийн их утга μmg - ээс бага бол бөмбөрцөг хөдлөхгүй. Харин их бол баруун тийш хөдөлж (1) дагуу хэлбэлзэл эхэлнэ. (1) илэрхийллийн баруун талд байгаа тогтмол хүч хэлбэлзлийн

давтамжид нөлөөлөхгүй, зөвхөн тэнцвэрийн байр нь $-\frac{\mu mg}{k}$ цэгт шилжих (AB хэсэг) ба

тойрог давтамж $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ байна. Бөмбөрцөг хамгийн баруун цэгт очиход хурдны чиглэл

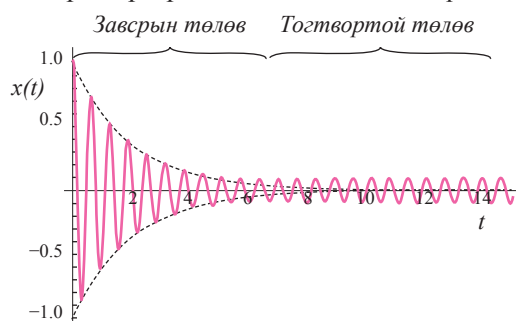


Зураг 27.

эсэргүүцлийн хүчний үйлчлэлээр унтрах хэлбэлзлээс ялгаа нь далайц экспоненциал хамаарлаар биш шугаман хамаарлаар буурна, хэлбэлзэл төгсгөлөг хугацаанд явагдана.

Албадмал хэлбэлзэл, резонанс

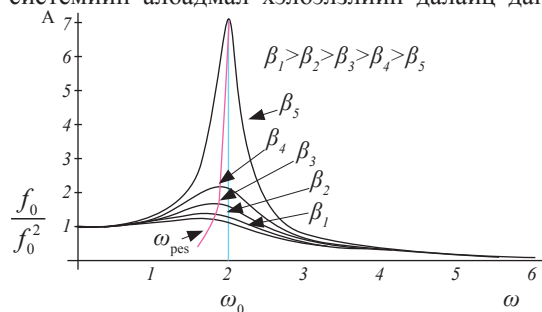
Чөлөөт гармоник хэлбэлзэл нь системийн дотоод, буцаах хүчний үйлчлэлээр явагдах бөгөөд гадны үйлчлэл системийг анх тэнцвэрээс гаргах үүрэгтэй. Тухайлбал дүүжинд тэнцвэрийн байранд хурд олгох эсвэл тэнцвэрээс тодорхой хэмжээгээр хазайлгаж тогтоох л үүрэгтэй бөгөөд цаашид үйлчилдэггүй. Энэ үйлчлэл хэлбэлзлийн анхны нөхцлүүд болох далайц эсвэл анхны хурдыг тодорхойлдог. Гэвч зарим хэлбэлзэл гадны байнгын үйлчлэл доор явагдах тохиолдол бий. Гадны үет хүчний үйлчлэлээр явагдах хэлбэлзлийг **албадмал хэлбэлзэл** гэнэ. Албадмал хэлбэлзлийн онцлог нь анх чөлөөт хэлбэлзэл хийж байсан биед гадны үет хүч үйлчилж эхэлснээс тодорхой хугацааны дараа анхны төлөвөө «мартаж»



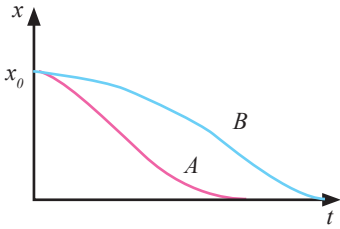
Зураг 28.

шине тогтсон хэлбэлзэлд ордогт оршино. Албадмал хэлбэлзлийн хамгийн хялбар тохиолдол нь гармоник хуулиар үелэн давтагддаг албадагч хүчний үйлчлэлээр явагдах хэлбэлзэл юм. Ийм хэлбэлзлийн систем өөрийн чөлөөт хэлбэлзлийн хувийн давтамжаар бус, харин албадагч хүчний давтамжтайгаар хэлбэлзэл хийж албадмал хэлбэлзлийн далайц тогтворждог (Зураг 28).

Чөлөөт хэлбэлзэл хийх чадвартай ямар ч систем гадны үйлчлэлийн давтамжийн системийн хувийн чөлөөт давтамжтай тэнцэхэд ($\omega \approx \omega_0$) албадмал хэлбэлзлийн далайц эрс их болно. Далайцын хэмжээ нь системийн унтралтын коэффициентоос хамаарна. Унтралт бага байх тутам далайц их, унтралт их (үрэлт, эсэргүүцэл их) байхад далайцын хүрэх хэмжээ багасах ба резонансын давтамж хувийн давтамжаас зөрдөг байна. Үрэлтгүй бол далайц хязгааргүй ихсэх боломжтой.



Зураг 29.



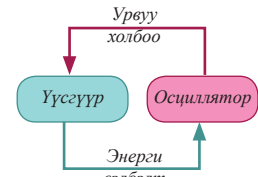
Зураг 30.

Зарим тохиолдолд хэлбэлзлийг түргэн унтраах шаардлага гардаг. Машин замын бартаа дээгүүр гарахад донсолгоо зөөллөгч пүрш хэлбэлзэнэ. Түүний хэлбэлзлийг түргэн зогсоохын тулд унтралтын коэффициент ихтэй системийг зэрэгцүүлэн хэрэглэдэг. Пүршин жинлүүрт мөн ийм систем хэрэглэснээр ачаа тавихад жинлүүрийн таваг хэлбэлзэхгүйгээр тэнцвэрт орж чаддаг. Унтралтын коэффициентийн тодорхой утганд систем бүтэн хэлбэлзэл хийхгүйгээр хамгийн богино хугацаанд тэнцвэрийн байранд очиж зогсдог. Зураг 30-ийн

A тохиолдолд энэхүү критик унтралтыг харуулав. Зургийн B тохиолдолд үүнээс арай бага унтралттай бөгөөд A тохиолдлоос илүү их хугацаанд огцом унтралт хийж зогсоно.

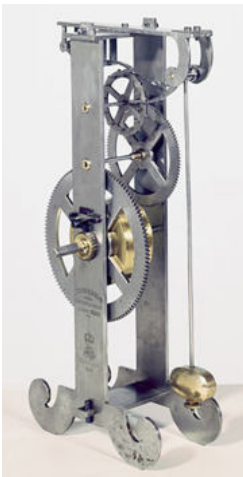
Авто хэлбэлзэл

Албадмал хэлбэлзлийн дүнд түүний давтамжтай ижил давтамжтай хэлбэлзэл үүснэ. Харин системийн хувийн давтамжийг өөрчлөхгүйгээр энергийн алдагдлыг нөхөж үл унтрах хэлбэлзэл хэрхэн үүсгэх вэ? Үүний тулд урвуу холбоо өөрөөр хэлбэл энергийн гадны үүсгүүрээс хэзээ энерги сэлбэх тухай мэдээ хэрэгтэй. Хэрэгтэй агшинд энергийн алдагдлаа нөхөж



Зураг 31.

зохицуулалттай хэлбэлзлийг авто хэлбэлзэл гэнэ. 31-р зурагт авто хэлбэлзлийн зарчмыг харуулав. Математик дүүжингийн үеийг тооцоолох томъёо гаргасан Христиан Гюйгенс 1657 онд дүүжинт цагийг зохион бүтээжээ (зураг 32). Дүүжинт цагийн анкер дүүжинг хамгийн дээд байрлалдаа ирэхэд дүүжингийн хувийн давтамжтай ижил давтамжаар түлхэж өгнө. Дүүжин хөдлөхдөө анкерийг эргүүлж урвуу холбоо үүсдэг. Савлуур дээр тоглож буй хүүхэд хараагаараа баримжаалан урвуу холбоо үүсгэж, шаардлагатай үед савлуурыг түлхэн энерги нөхөж өгдөг. Хийл тоглож буй хөгжимчин нумаар чавхдасны хувийн хэлбэлзлийг өдөөх ба урвуу холбоо сонсголын тусламжтай хэрэгжинэ.



Зураг 32.
Дүүжинт цагийн механизм.

Туршилтын ажил: Пүршин дүүжингийн хэлбэлзлийг судлах

1 – р хэсэг. Хэлбэлзлийн үеийг тодорхойлон, далайцаас хамаарахыг судлах.

Пүршинд 200 г масстай ачаа зүүнэ. Ачааг тэнцвэрийн байрнаас 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 см хазайлгаж хэлбэлзүүлэн бүтэн 20 удаа хэлбэлзэх хугацааг хэмжинэ. Хэмжилтийн дүнгээр хүснэгтийг бөглөж алдааны хязгаар дотор дүгнэлт гаргана.

Хүснэгт 3.

№	A, см	t, с	T, с	ΔT , с	N
1					20
2					
3					
4					
5					



Зураг 33.

БҮЛЭГ 4. МЕХАНИК ХЭЛБЭЛЗЭЛ, ДОЛГИОН

Хугацааг секундомерээр хэмжсэн үед багажийн алдааг ихэнх хүмүүсийн хариу үйлдэл зүүлэх дундаж хугацаа болох $\Delta t=0.2$ с – тэй тэнцүү гэж үзнэ.

$$\text{Үе: } T = \frac{t}{N};$$

$$\text{Харьцангуй алдаа: } \varepsilon(T) = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta t}{t};$$

$$\text{Абсолют алдаа } \Delta T = \frac{\Delta t}{N}$$

2 – р хэсэг. Пүршин дүүжингийн хэлбэлзлийн үеийн томъёог шалгах
Эхлээд пүршний хатыг тодорхойлно.

$m_1=100$ г $m_2=200$ г масстай ачаанууд хэрэглэнэ. $kx_0 = m_1g$ $kx_1 = m_2g$

$$k(x_1 - x_0) = (m_2 - m_1)g; \quad k = \frac{(m_2 - m_1)g}{(x_1 - x_0)} = \frac{(m_2 - m_1)g}{(l_2 - l_1)}$$
 харьцангуй алдааг олбол

$$\varepsilon(k) = \varepsilon(g) + \varepsilon(m_2 - m_1) + \varepsilon(l_2 - l_1) = \varepsilon(g) + \frac{\Delta m_1 + \Delta m_2}{\langle m_2 \rangle - \langle m_1 \rangle} + \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{\langle l_2 \rangle - \langle l_1 \rangle}$$

Лабораторийн туухайн хувьд: $\Delta m_1 = \Delta m_2 = \Delta m = 0.5$ г. Миллиметрийн хуваарьтай шугамын хувьд: $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l = 1$ мм; g – ийн абсолют алдааг тооцохгүй байж болно. Иймд

$$\varepsilon(k) = \frac{2\Delta m}{\langle m_2 \rangle - \langle m_1 \rangle} + \frac{2\Delta l}{\langle l_2 \rangle - \langle l_1 \rangle}; \quad \Delta k = \varepsilon(k)\langle k \rangle; \quad k = \langle k \rangle \pm \Delta k$$

Пүршний хатыг тодорхойлоод дараах даалгаврыг гүйцэтгэнэ.

1. Пүршинд $m_1=100$ г ачаа зүүнэ. Түүнийг тэнцвэрээс x_1 зайд сунгаад тавьж хэлбэлзүүлэн 20 хэлбэлзэх хугацааг хэмжинэ.
2. Пүршинд $m_2=200$ г ачаа зүүнэ. Түүнийг тэнцвэрээс $x_2 > x_1$ зайд сунгаад тавьж хэлбэлзүүлэн 20 хэлбэлзэх хугацааг хэмжинэ.
3. Пүршинд $m_3=300$ г ачаа зүүнэ. Түүнийг тэнцвэрээс $x_3 > x_2$ зайд сунгаад тавьж хэлбэлзүүлэн 20 хэлбэлзэх хугацааг хэмжинэ. Хэмжилтийн дүнг хүснэгтэд бичнэ.

Хүснэгт 4.

№	m , г	x , см	t , с	$T_{\text{тур}} = \frac{t}{N}$, с	$\Delta T_{\text{тур}}$, с	$T_{\text{онол}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, с	$\Delta T_{\text{онол}}$, с
1							
2							
3							

Онолоор тооцоолсон үеийн алдаа $\varepsilon(T) = \frac{1}{2}\varepsilon(m) + \frac{1}{2}\varepsilon(k)$.

$\varepsilon(m)$ алдаа $\varepsilon(k)$ -аас бага учир тооцохгүй байж болно. Иймд $\varepsilon(T) = \frac{1}{2}\varepsilon(k) = \frac{\Delta k}{2\langle k \rangle}$;
 $\Delta T = \varepsilon(T)T$

Туршилтын үр дүнг боловсруулах

1. 1-р хэсгийн үр дүнгээр янз бүрийн далайцтай үед хэлбэлзлийн үеийг ол. ΔT алдааг ол. Хэлбэлзлийн үе далайцаас яаж хамаарах вэ?
2. 2-р хэсгийн үр дүнгээр туршилтын T ба онолын T - ийн утгыг янз бүрийн масс ба далайцын үед тооцоол. Алдааны хязгаарын дотор үеүд давхцаж буй эсэхийг шалга.

3. МЕХАНИК ДОЛГИОН

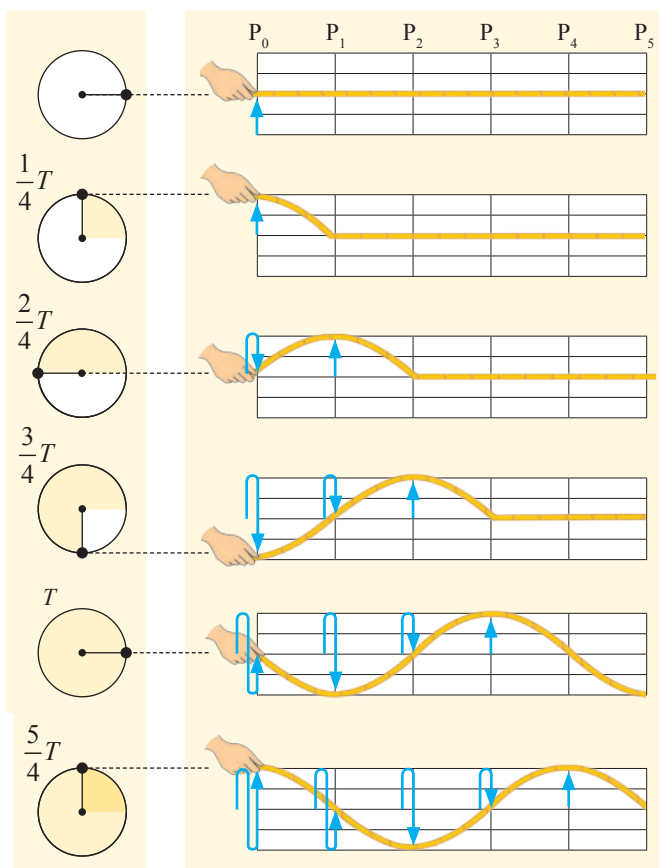
Хөндлөн ба тууш долгион тархах механизм

Хатуу, шингэн, хий зэрэг бодисын харимхай чанараас хамаарч тууш эсвэл хөндлөн долгион тархдаг. Бодисын харимхай чанар түүний атом молекулын дулааны хөдөлгөөний шинж чанар, тэдгээрийн харилцан үйлчлэлээс шалтгаална.

Бодисын аль нэг жижиг хэсгийг тэнцвэрийн байрлалаас нь хазайлгахад буцааж түүнийг тэнцвэрийн байрлалд нь оруулах эрмэлзэлтэй харимхай хүч үйлчилж байвал түүнийг харимхай орчин гэж нэрлэдэг. Деформацын хэмжээ бага үед бүх биеийг харимхай гэж тооцож болно.



Хөндлөн ба тууш долгион бодисын харимхай чанартай холбоотой. Долгион тархах хурд орчин бүрт өөр.



Зураг 34. Хөндлөн долгион тархах

БҮЛЭГ 4. МЕХАНИК ХЭЛБЭЛЗЭЛ, ДОЛГИОН

Орчны бүтцийн загвар

↓

Загвараар долгион үүсэхийг тайлбарлах

↓

Дүгнэлт хийх

Орчны нэг цэгт үүссэн хэлбэлзэл зэргэлдээ цэгүүдэд дамжих процессыг **механик долгион** гэнэ. Механик долгион харимхай орчинд тардаг.

Урт олс, харимхай пүршээр холбогдсон олон жижиг хэсгээс тогтоно.

Эхний хэсэг хэлбэлзэхэд дараагийн хэсгүүд дагаж хэлбэлзэнэ.

Урт олсоор синусоид хэлбэртэй хөндлөн долгион тархана.

Дасгал Урт олсонд хөндлөн долгион үүсэх байдлыг зураг 34-д хугацааны 6 өөр агшинд харуулав. Хугацааны тэг агшинд олс хэвтээ байрлалтай. Долгион тухайн агшинд хүрэх P_0, P_1, P_2, \dots цэгүүд хоорондоо тэнцүү зайтай. Цэг бүр тэнцвэрийн байрлалаас хамгийн их хазайх зайг A гэж үзээд хугацааны агшин бүрт P_0, P_1, P_2, \dots цэгүүдийн шилжилтийг олж 5-р хүснэгтийг бөглөөд цэг бүрийн хөдөлгөөний талаар тайлбарлаж ярилцаарай.

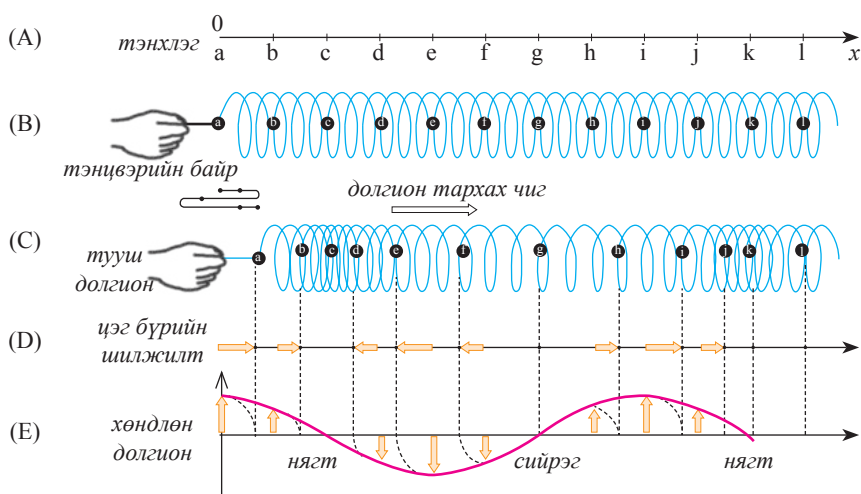
Тухайн агшинд орчны хэсгүүдийн шилжилтээс үүсэх олсны хэлбэр нь түүгээр тархах долгионы хэлбэрийг харуулна. Гармоник хэлбэлзлээр үүссэн хөндлөн долгион синусоид хэлбэртэй.

Хүснэгт 5

хугацаа	шилжилт					
	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
$\frac{1}{4}T$						
$\frac{2}{4}T$						
$\frac{3}{4}T$						
T						
$\frac{5}{4}T$						

Тууш долгионыг хэрхэн илэрхийлэх вэ?

Урт пүршинд үүсэх тууш долгионыг судлахдаа пүршийг хоорондоо харимхай богино пүршүүдээр холбогдсон олон бөмбөрцгөөр төлөөлүүлэн загварчилъя (Зураг 35).



Зураг 35. Тууш долгионыг хөндлөн долгион болгон илэрхийлэх

Орчны жижиг хэсгүүд буюу бөмбөрцгүүдийн тэнцвэрийн байрлалын цэгийг x тэнхлэг дээр a, b, c, \dots үсгээр тэмдэглэв. Анхны агшинд бүх хэсгүүд тэнцвэрийн байранд байна (Зураг 35-В).

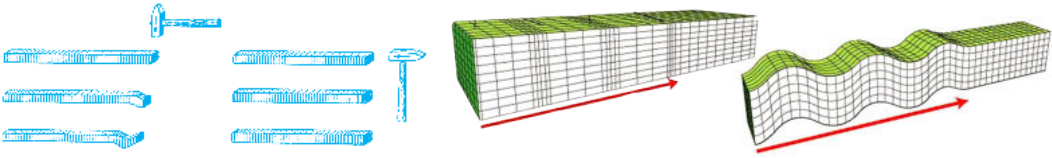


Тууш долгионыг хөндлөн долгион шиг илэрхийлэх x тэнхлэгийн эерэг чиглэл дэх шилжилт \rightarrow y тэнхлэгийн эерэг чиглэл дэх шилжилт x тэнхлэгийн сөрөг чиглэл дэх шилжилт \rightarrow y тэнхлэгийн сөрөг чиглэл дэх шилжилт

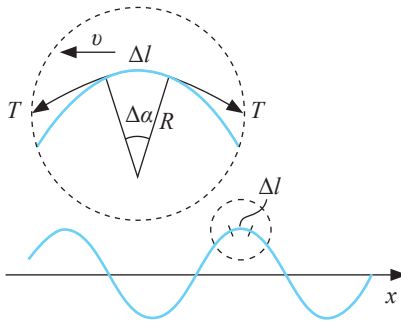
Эхний бөмбөрцгийг хэлбэлзүүлэхэд пүршний харимхай үйлчлэлээр долгион тарж цэгүүд хэлбэлзэнэ. Хэлбэлзэл эхэлснээс $\frac{5}{4}T$ хугацааны дараа бөмбөрцөг тус бүрийн байрлалыг Зураг 35С-д үзүүлэв. Энэ зургаас пүршний нягтрал сийрэгжлийг тодорхой ажиглаж болно. Зургийн c ба k цэгүүдийн орчимд хамгийн их нягтарч g цэгийн орчим хамгийн сийрэгжсэн байна. Бөмбөрцөг бүрийн шилжилтийг зураг 35 D-д сумаар тэмдэглэн харуулав. Орчны хэсгүүдийн шилжилтийг долгион тархах чиглэлд перпендикуляр болгон дүрсэлбэл тууш долгионыг хөндлөн долгионтой адилхан синусоидоор илэрхийлж болдог.

Зураг 35 D-д зургийн шилжилтийг хувиргаснаар тууш долгион хөндлөн долгион шиг (Зураг 35-E) дүрслэгдэнэ.

Хатуу, шингэн, хийн бүтцийн онцлог деформацийн төрлөөс шалтгаалан тууш эсвэл хөндлөн долгион үүснэ. Хатуу бие тууш (сунах, агших) болон хөндлөн (ташилтын) деформацад ордог учраас тууш болон хөндлөн долгион хоёулаа тархаж чаддаг (зураг 36). Хий, шингэн эзлэхүүний буюу шахагдах сийрэгжих деформацад ордог учраас зөвхөн тууш долгион тархана.



Зураг 36. Хатуу биеийн деформаци ба долгион



Зураг 37. Чавхдас утасны долгион

Долгионы хурд

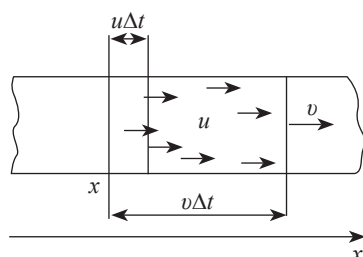
Чавхдас утсанд хөндлөн долгион тархах. Чангалж татсан чавхдас утсаар хөндлөн долгион x тэнхлэгийн сөрөг чиглэлд v хурдтай тарж байг (Зураг 37).

Долгион тархах чиглэлд v тогтмол хурдтай хөдлөх тооллын систем ашиглая. Энэ системд утасны долгионы синусоид хөдөлгөөнгүй байх бөгөөд утасны бодис утас дагуу баруун гар тийш v хурдтай урсана. Долгионы гүдгэр дээр $\Delta l (\Delta l \ll \lambda)$ урттай хэсгийн хоёр үзүүрт утасны татах хүчийг T гэвэл энэ хэсэгт перпендикуляр чиглэлд татах хүчний байгуулагчуудын

нийлбэрийг олбол: $2T \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \cong T \Delta \alpha$ байна. Энэ хүч

хурдатгал олгоно. $F = \Delta m a$. Муруйлтын радиусыг R гэвэл Δl урттай хэсгийн төвд тэмүүлэх хурдатгал $a = v^2 / R$, масс $\Delta m = \rho \Delta l$; ρ -утасны шугаман нягт. Иймд $\frac{\rho \Delta l v^2}{R} = T \Delta \alpha$ мөн

$$\Delta l = R \Delta \alpha \text{ учраас } \frac{\rho R \Delta \alpha v^2}{R} = T \Delta \alpha \Rightarrow v^2 = \frac{T}{\rho} \text{ чавхдасаар дуу тархах хурд } v = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \text{ болно.}$$



Зураг 38. Хатуу саваанд тууш долгион тархах

Саваанд тууш долгион тархах хурд

Хатуу саваагаар баруун тийш v хурдтай тархах долгионы гадарга 0 агшинд x координаттай цэгт байсан гэе (Зураг 38). Δt бага хугацаанд долгионы гадарга $v\Delta t$ - ээр шилжинэ. Энэ муж дотор бүх бөөмүүд ойролцоогоор ижил u хурдтай болсон гэе. Δt хугацааны агшинд долгионы гадарга дээр байсан бүх бөөм $u\Delta t$ зайд шилжиж тухайн муж деформацилагдана.

$l = v\Delta t$ урттай хэсгийн деформацийн хэмжээ $\Delta l = u\Delta t$.

Харьцангуй деформаци $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow \varepsilon = \frac{u\Delta t}{v\Delta t} = \frac{u}{v}$

Гукийн хуулиар $\sigma = E\varepsilon \Rightarrow \frac{F}{S} = E\varepsilon; F = E\varepsilon S$;

Үүнд: E —савааны материалын Юнгийн модуль; F —деформацийн хүч; S —савааны хөндлөн огтлолын талбай;

Харьцангуй суналтын илэрхийллийг орлуулбал $F = \frac{ESu}{v}$

Ньютоны 2-р хуулиар $u\Delta m = F\Delta t$ Үүнд: Δm — долгион тарсан хэсгийн масс;

Хүч ба массын илэрхийллийг орлуулбал $u\rho S v\Delta t = \frac{ESu}{v}\Delta t \Rightarrow v^2 = \frac{E}{\rho}$,

Долгионы хурд $v = \sqrt{E/\rho}$ болно.

Хийд долгион тархах хурд

Хатуу саваагаар долгион тархах илэрхийлэлтэй төстэйгээр хийд долгион тархах хурдыг $v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ томъёогоор илэрхийлнэ. K - эзлэхүүний харимхайн (бүх чиглэлд шахагдалтын) модуль, ρ —хийн нягт; Хий хэлбэрээ чөлөөтэй өөрчилж савны хэлбэрийг дагадаг тул хэлбэрээ хадгалах харимхай чанар байхгүй. Харин эзлэхүүний өөрчлөлтийг эсэргүүцэх чанар буюу эзлэхүүний харимхай чанартай.

Хийд долгион тархах үед адиабат өөрчлөлт явагдана гэдгээс K —ийн илэрхийллийг олъё.

Адиабат процессын тэгшитгэл $pV^\gamma = const.$ $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ -адиабатын илтгэгч

Уламжлал авбал $dpV^\gamma + p\gamma V^{\gamma-1} dV = 0$. Эндээс $dp = -\frac{\gamma}{V} dVp \Rightarrow dp = -\gamma p \frac{dV}{V}$;

Хийн p даралтын өөрчлөлт нь V эзлэхүүний харьцангуй өөрчлөлттэй пропорционал.

Пропорционалын коэффициент $K = \gamma p$ нь хийн эзлэхүүний харимхайн модуль болно.

$K = \gamma p$ —ийн утгыг хурдны илэрхийлэлд орлуулбал $v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$;

Хийн төлөвийн $pV = \frac{m}{\mu} RT$ тэгшитгэлээс даралтыг олж орлуулбал $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$.

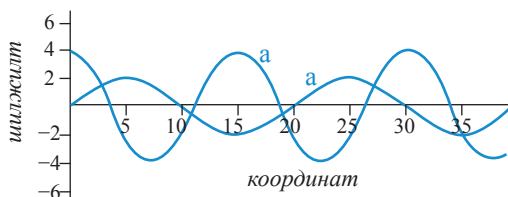
μ —хийн молийн масс; T — абсолют температур; R —хийн универсал тогтмол.

Дасгал Зураг 39-д үзүүлсэн a, b долгион тус бүрийн далайц, долгионы уртыг ол.

Дасгал Агаарт дуу тархахад агаарын бөөмүүдийн байрлалыг харуулав.



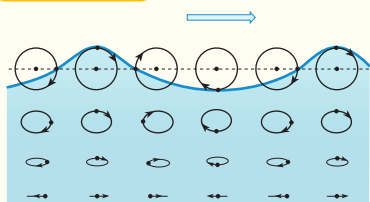
P



Зураг 39.

- A. Зургийг дэвтэртээ хуулаад бөөмүүд нягтарсан хэсгийг Н, сийрэгжсэн хэсгийг С гэж тэмдэглэ.
- B. P цэгт нягтарсан уу, сийрэгжсэн үү?
- B. Дууны давтамж 240 Гц бол нэг бөөмийн хувьд үүний утгыг тайлбарла.
- Г. Дууны хурд 320 м/с байжээ. Дууны долгионы уртыг ол.

Нэмэлт



Зураг 40. Усны гадарган долгион үүсэх

Усны гадаргын долгион

Усны гадарга дээрх долгион усны гадарга таталцлын үзэгдэл ба хүндийн хүчний үйлчлэлээр явагдана. Усны гадарга дээр жижиг бие хөвүүлээд долгион үүсгэвэл долгион тархахад бие дээш доош, баруун зүүн тийш хөдөлж харагдана. Усны гадаргын долгион хөндлөн ба тууш шинжийг агуулсан долгион юм. Усны гадаргын жижиг хэсгийн хөдөлгөөнийг тойргоор эргэх хөдөлгөөнтэй адилтгаж загварчилдаг. Зураг

40-д усны гадаргыг тойргоор эргэж буй хэсгүүдээр төлөөлүүлжээ.

Тухайн агшинд тойрог бүр дээр жижиг хэсгүүд хаана байрлаж байгаагаар долгионы хэлбэр тодорхойлогдоно. Зурагт тойрог бүр дээрх цэгүүдийг холбоход циклоид маягийн хэлбэр үүссэн байна. Цэгүүд цагийн зүүний дагуу эргэж буй тул долгион баруун гар тийш тарна. Гадаргаас доош орших давхаргуудад тойргууд зууван болон шахагдаж эцэстээ зөвхөн тууш хэлбэлзэл хийнэ.

Усны гүн $h \ll \lambda$ тохиолдолд усны гадаргаар долгион тархах хурд $v = \sqrt{gh}$ байдаг. Долгионы тэвшин дэх усны гүн гүехэн болох тутам савны ёроол ба усны зуурамтгай үрэлт нөлөөлөх тул долгион тархах хурд багасна. Ингэснээр усны гадаргаар тарсан долгион эрэг рүү ойртохдоо долгионы гадаргын хэлбэр өөрчлөгдөж эргийн шугамны хэлбэрийг дагадаг.

Долгионы тэгшитгэл

Олсны үзүүрийг хэлбэлзүүлэхэд хөндлөн долгион үүсэх явцыг өмнө судалсан. Зураг 34 ба 5-р хүснэгтийн үр дүнгээр дараах асуултуудад хариулж дүгнэлт гаргаарай.

P_0 цэгийн $\frac{T}{4}$ агшин дахь шилжилт ямар хугацааны дараа ижил байх вэ? P_0 цэгийн $\frac{T}{4}$ агшин дахь шилжилт ямар координаттай цэгүүдэд ижил байх вэ? Бусад цэгүүдийн

Орчны x координаттай цэг дэх шилжилт хугацааны хувьд T үетэйгээр, орон зайн хувьд λ үетэйгээр давтагдана.

хувьд мөн дээрх асуултад хариулаарай.

x тэнхлэгийн эерэг чиглэлд тархах синусоид долгионыг авч үзье. Долгионы хурд v, далайц A, үе T, долгионы урт λ байг. Тэнхлэгийн эх O цэгт $y = A \sin \omega t = A \sin \frac{2\pi}{T} t$ гармоник хэлбэлзэл

БҮЛЭГ 4. МЕХАНИК ХЭЛБЭЛЗЭЛ, ДОЛГИОН

явагдана. Үүсгэгчээс x зайтай P цэгт хэлбэлзэл ямар хуулиар явагдах вэ?

P цэгт долгион тарж ирэх хугацаа $t_0 = \frac{x}{v}$. O цэгт хэлбэлзэл эхэлснээс хойш ямар нэг t агшин дахь P цэгийн шилжилт нь $t - \frac{x}{v}$ хугацаан дахь O цэгийн шилжилттэй ижил байна.

{ P цэгийн t агшин дахь шилжилт} = { O цэгийн агшин дахь шилжилт} $y = A \sin \frac{2\pi}{T} (t - \frac{x}{v})$



Долгионы тэгшитгэл тухайн координаттай цэгт, тухайн агшинд хазайлт (шилжилт) ямар байхыг илэрхийлнэ.

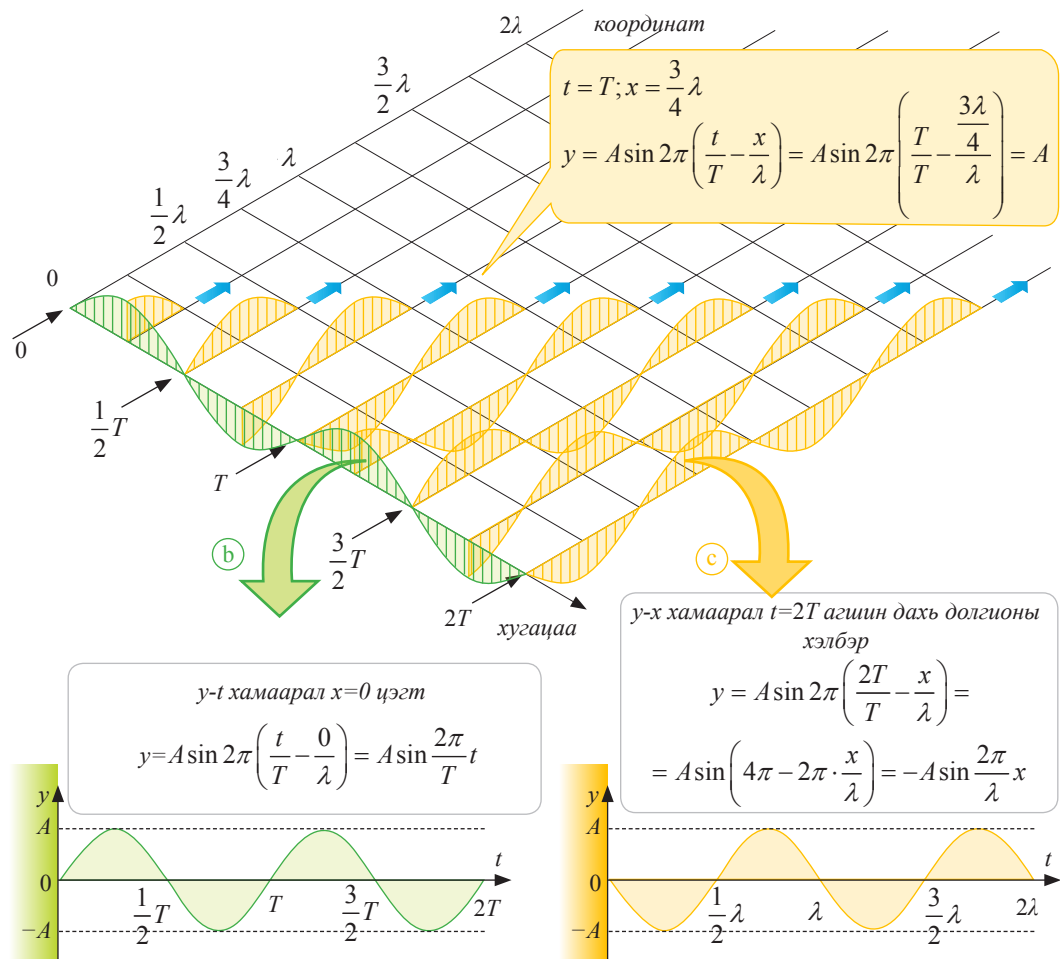
Энэхүү илэрхийллийг долгионы тэгшитгэл гэнэ. Долгионы тэгшитгэлд $vT = \lambda$ гэдгийг анхааран хувиргалт хийвэл

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} (t - \frac{x}{v}) = A \sin 2\pi (\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda})$$

Үүнийг долгионы тэгшитгэлийн стандарт хэлбэр гэж үздэг. Долгион x – тэнхлэгийн сөрөг чиглэлд тархах тохиолдолд

долгионы тэгшитгэл $y = A \sin \frac{2\pi}{T} (t + \frac{x}{v}) = A \sin 2\pi (\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda})$

Хэвтээ хавтгай дээр харилцан перпендикуляр чиглэлд x ; t тэнхлэгүүд авч долгионы тэгшитгэлийг орон зай (координат), цаг хугацаанаас хамааруулан графикаар дүрсэлбэл:

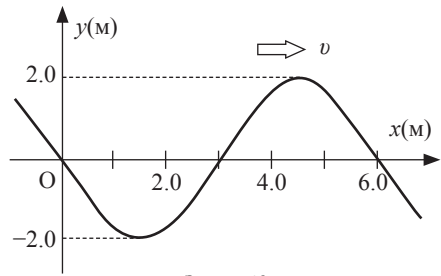


Зураг 41.

Жишээ Синусоид долгионы график ба тэгшитгэл.

$t = 0$ с агшин дахь хэлбэрийг зурагт үзүүлсэн. 0.2 с үетэй синусоид долгион x тэнхлэгийн эерэг чиглэлд v хурдтай тарж байв. Дараах зүйлүүдийг бодож олно уу.

- (1) Долгионы урт λ , давтамж ν , хурд v
- (2) $t = 0$ с, $x = 1.5$ м үед шилжилт
- (3) x координаттай цэгт t агшин дахь x шилжилтийг олох илэрхийллийг гарга.



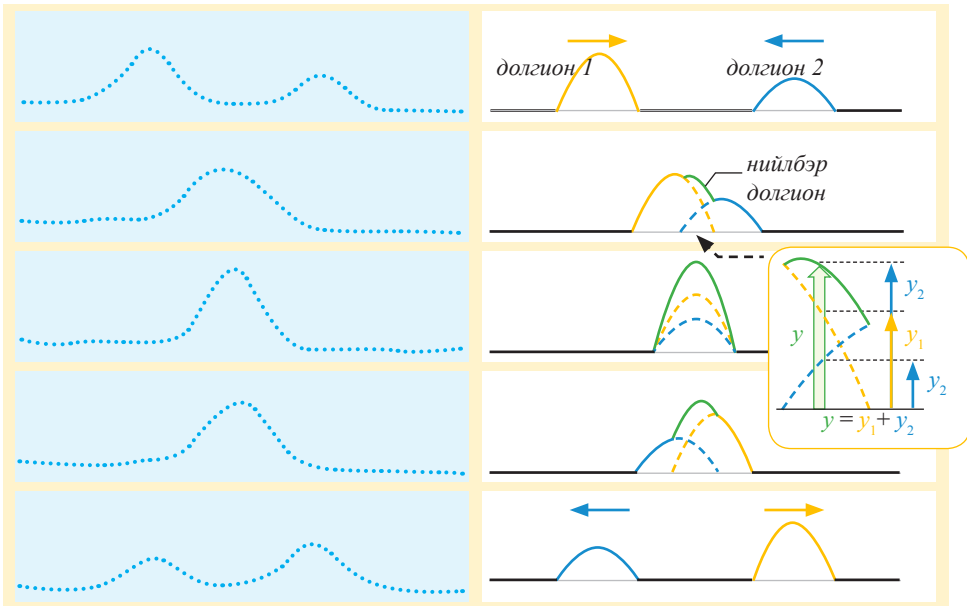
Зураг 42.

Бодолт

- (1) Графикаас долгионы урт $\lambda = 660$ м. Давтамж $\nu = \frac{1}{T}$; $\nu = 5.0$ Гц. Долгионы үндсэн тэгшитгэлээр $v = \nu \lambda = 30$ м/с.
- (2) Графикаас шилжилт -2.0 м.
- (3) Графикаас далайц 2.0 м. 0 с агшин дахь долгионы хэлбэрийг долгион тархах зүгт бага зэрэг зөөж ажиглахад O цэг y - ийн эерэг чиглэлд шилжих нь харагдана. O цэгийн хэлбэлзлийн тэгшитгэл $y(0,t) = A \sin \frac{2\pi}{T}t = 2.0 \sin \frac{2\pi}{0.20}t$. Иймд $y = 2.0 \sin 10\pi \left(t - \frac{x}{30} \right)$.

Долгион нэмэгдэх

Нэг орчинд хэд хэдэн долгион зэрэг тархах тохиолдол элбэг байдаг. Долгионууд давхцах үедээ нийлбэр долгион үүсгэдэг. Долгионы машины 2 үзүүрээс пульс долгион гаргаж хоёр долгион давхцах ба салах явцын стробоскоп зураг болон загварчилсан диаграммыг зураг 43-д харуулав. Долгион 1 баруун тийш, долгион 2 зүүн тийш тарна. Долгион давхцаж байгаа хэсэгт долгионы хэлбэр хувирсан боловч долгион зөрж өнгөрөхөд өмнөх хэлбэр нь хэвээр байна.

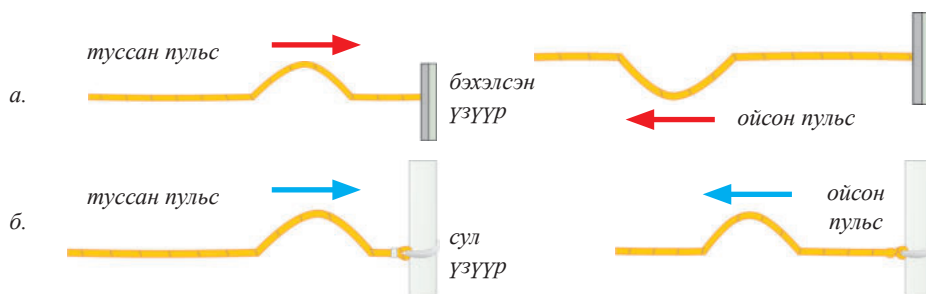


Зураг 43.

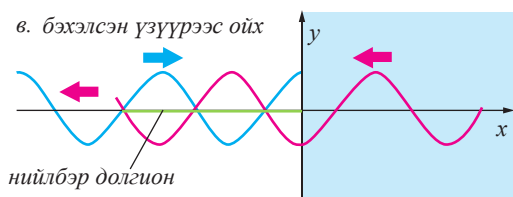
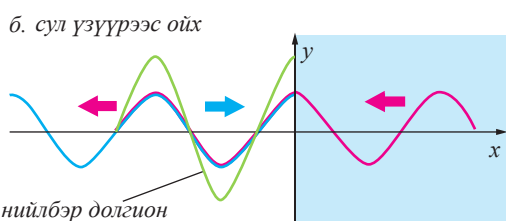
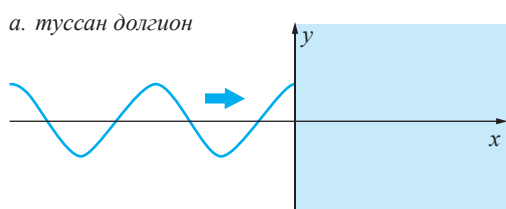
БҮЛЭГ 4. МЕХАНИК ХЭЛБЭЛЗЭЛ, ДОЛГИОН

Долгионууд орчин дотор тархахдаа бие даасан тусгаар шинж чанартай байх боловч давхцах үед шилжилтүүд нь нэмэгддэг байна. $y=y_1+y_2$. Долгионы энэ шинж чанарыг *суперпозицийн зарчим* гэнэ. Олсны нэг үзүүрийг хэлбэлзүүлэн хөндлөн долгион үүсгэхдээ нөгөө үзүүрийг хананд бэхлэх эсвэл сул байлгаж болно.

Бэхэлсэн үзүүрээс ойход долгион тархах чиг, олсны бөөмийн хөдөлгөөний чиг хоёр хоёулаа эсрэг чигтэй болж солигдоно. Үүнийг долгион ойхдоо фазаа эсрэгээр ($180^\circ -$ аар) өөрчлөх гэж нэрлэдэг (Зураг 44а). Чөлөөт үзүүрээс ойход долгион тархах чигээ эсрэгээр сольж бөөмийн хөдөлгөөний чиг хэвээр үлдэнэ. Энэ тохиолдолд долгионы фаз өөрчлөгдөхгүй (Зураг 44б).



Зураг 44.

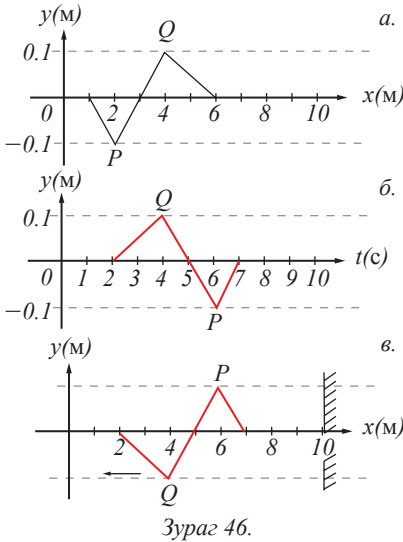


Зураг 45. Туссан ойсон долгионыг нэмэх

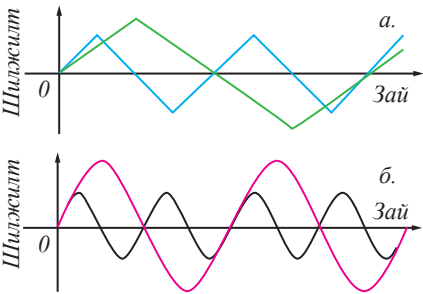
Долгион хана руу тусаж ойход эсрэг чиглэлд тарж буй хоёр долгион нэмэгдэнэ. Дээрх хоёр тохиолдолд туссан ба ойсон долгионыг дүрслэх, нийлбэр долгионыг олох аргыг зурагт харуулав (Зураг 45).

Чөлөөт үзүүрээс ойход фазын өөрчлөлт гарахгүй. Иймд ойсон долгионыг зурахдаа туссан долгионыг үргэлжлүүлж зураад x тэнхлэгтэй тэгш хэмтэйгээр нугалж зурна. y – ийн утга бүрт туссан ойсон долгионы шилжилтүүдийг нэмж нийлбэр долгионыг гаргаж авна (Зураг 45б).

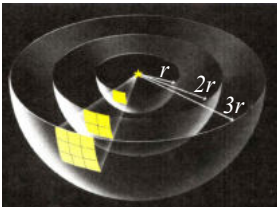
Бэхэлсэн үзүүрээс ойход фаз эсрэгээр өөрчлөгддөг. Туссан долгионыг үргэлжлүүлж зураад тэнхлэгийн эхийг тойруулан 180° эргүүлэх буюу x –тэнхлэгийн хувьд тэгш хэмтэй хувиргалт хийж дараа нь y –тэнхлэгтэй тэгш хэмтэйгээр нугална. x –ийн утга бүрт туссан ойсон долгионы шилжилтүүдийг нэмж нийлбэр долгионыг гаргаж авна (Зураг 45в).



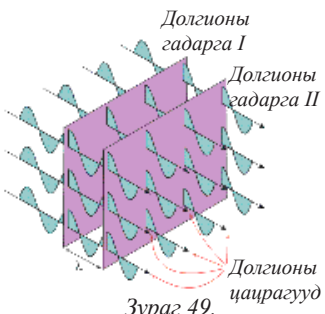
Зураг 46.



Зураг 47.



Зураг 48. Бөмбөлөг долгионоор энерги зөөгдөх



Зураг 49.

а. **Жишээ** 1 м/с хурдаар x тэнхлэгийн эерэг чиглэлд тарж буй пульс долгионы $t=0$ с агшин дахь хэлбэрийг харуулав (46а).

(1) $x=8$ м координаттай цэгийн хэлбэлзлийн $y-t$ график байгуул.

(2) $x=10$ м координаттай цэгт пульс долгион бэхлэгдсэн үзүүрээс ойх ойлт хийсэн бол $t=12$ с агшинд ойсон долгионы хэлбэрийг зур.

Бодолт (1) долгион 1 м/с хурдтай тархах тул $x=8$ м цэг 2 с-ийн дараагаас хэлбэлзэж эхэлнэ. Үүнээс 2 с-ийн дараа дээш хамгийн их хазайх ба 4 с-ийн дараа доош хамгийн их хазайж 5 с-ийн дараа долгион бүрэн дайрч өнгөрөхөд хэлбэлзэл зогсоно (46б).

(2) $t=0$ с агшинаас 4 с-ийн дараа пульсын үзүүр ойх цэгт хүрнэ. Ойсноос 8 с-ийн дараа ойсон пульсийн үзүүр 2 м координаттай цэгт хүрнэ. Бэхэлсэн үзүүрээс ойход фаз эсрэгээр өөрчлөгддөг тул оройнуудын байр солигдоно. Ойсон долгионыг зураг 46в-д харуулав.

Дасгал Зураг 47а-д үзүүлсэн хоёр гурвалжин долгионы нэгийн далайц 2 см, долгионы урт 8 см нөгөөгийн далайц 3 см ба долгионы урт 16 см. Хоёр долгионы нийлбэр долгионыг зур.

Дасгал А. Зураг 47б-д үзүүлсэн хоёр синусоид долгионы нийлбэр долгионыг зур. Б. Нийлбэр долгионы урт нь хоёр долгионы урттай харьцуулахад ямар байх вэ?

Долгионы гадарга. Гюйгенсийн зарчим

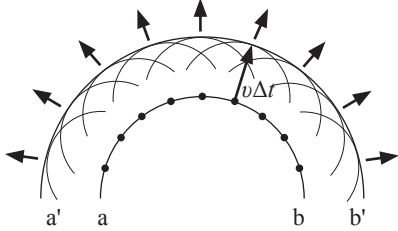
Долгион ижил хугацаанд тарж очсон цэгүүд буюу ижил фазтай цэгүүдээс тогтох гадаргыг долгионы фронт гэж нэрлэдэг. Долгион үүсгэгчийн хэмжээг тооцохгүй нөхцөлд долгионы цэгэн үүсгэгч гэж загварчилж болно.

Цэгэн үүсгэгчийн долгион фронтын радиус нь хугацаанаас жигд хамааран өсдөг бөмбөлөг хэлбэртэй байна (Зураг 48). Ийм долгионыг бөмбөлөг долгион гэнэ. Усны гадарга дээр цэгэн үүсгэгчээс цагариг долгион үүснэ. Хэлбэлзэж байгаа ялтсын үүсгэх долгионы фронт эхэндээ мөн хавтгай бөгөөд үүсгэгчтэйгээ параллел байдаг. Үүсгэгчийг хязгааргүй үргэлжилсэн гэж үзээд хавтгай долгионы тухай хийсвэр ойлголт оруулж болно. Урт шугам хэрэглэн усны гадарга дээр хавтгай долгион үүсгэдэг. Усны гадаргаар тархах долгионы гүдгэрүүд нь долгионы фронтын жишээ юм (Зураг 49). Долгионы гадаргад перпендикуляр шугамуудыг долгионы цацраг (эдгээр шугамын дагуу хэлбэлзэл тарж энерги зөөгдөнө) гэнэ. Бөмбөлөг долгионы цацраг радиусын дагуу шулуунууд хавтгай долгионы хавтгайд перпендикуляр параллел шулуунууд байдаг (Зураг 49).

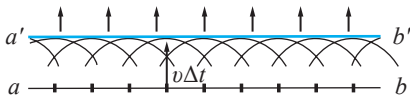
Дасгал

Зураг 48-д үзүүлсэн бөмбөлөг долгионы фронтын радиус $2r$, $3r$ болоход гадаргын нэгж талбайгаар нэгж хугацаанд өнгөрөх энерги хэрхэн өөрчлөгдөх вэ?

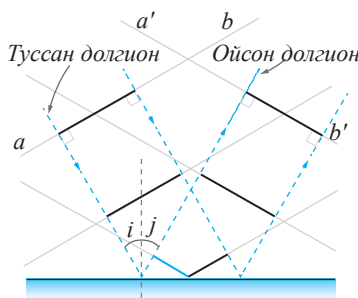
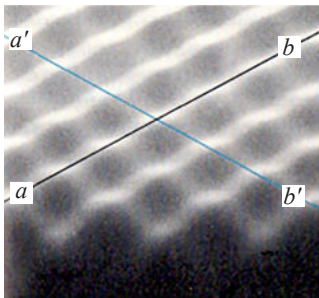
Бөмбөлөг долгион



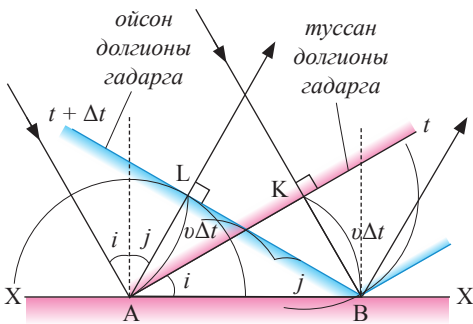
Хавтгай долгион



Зураг 50. Хавтгай ба бөмбөлөг долгионы гадарга үүсэх



Зураг 51. Хавтгай долгионы ойлт



Зураг 52. Ойлтын хууль.

Долгион тархах ерөнхий зарчмыг Голландын эрдэмтэн Х.Гюйгенс анх дэвшүүлсэн.

1. Долгионы гадаргын цэг бүр хоёрдогч долгион үүсгэгч болно. Хоёрдогч долгионуудын бөмбөрцөг гадаргыг зөвхөн долгион тарж буй чиглэлд зурна.
2. Хоёрдогч долгионуудын гадуур бүрхсэн шүргэгч гадарга нь долгионы шинэ гадарга болно.

Бөмбөрцөг ба хавтгай долгионы ямар нэг t агшин дахь гадаргаас $t+\Delta t$ агшинд долгионы шинэ гадарга хэрхэн үүсэхийг зураг 50-д харуулав.

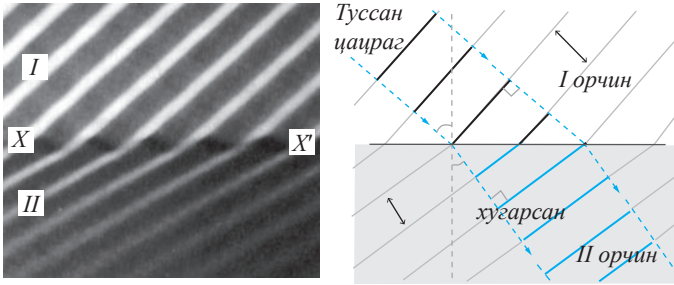
Гюйгенсийн зарчмаар долгион ойх, хугарах үзэгдлүүдийг бүрэн тайлбарлана.

Долгионы тэвш хэрэглэн усны гадарга дээр хавтгай долгион үүсгэж тэгш гадарга руу тусган ойх байдал ба түүнийг загварчлан зурсныг зураг 51-д харуулав.

Хэвтээ тэгш гадарга руу туссан хавтгай долгионы цацрагууд ба t агшин дахь туссан долгионы гадаргыг зурагт харуулав (Зураг 52).

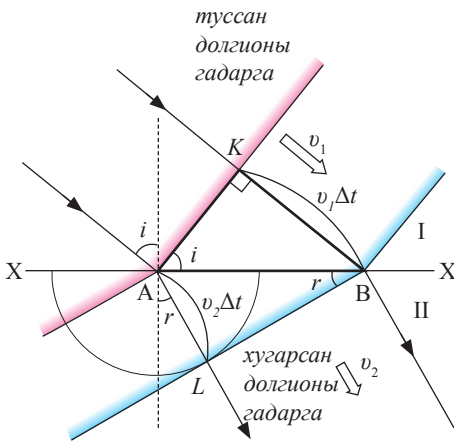
А ба К цэгүүдэд долгион зэрэг ирнэ. К – г дайрах цацраг В – д ирэх Δt хугацаанд А цэгээс $v\Delta t$ радиустай хоёрдогч бөмбөрцөг долгион тарна. АВ хэрчмийн бусад цэгүүдээс арай бага радиустай хоёрдогч долгионууд үүснэ.

Эдгээрийн гадуур шүргэгч татахад $t+\Delta t$ агшин дахь ойсон долгионы гадарга гарна. А ба В цэгүүдээс ойсон долгионы гадаргад перпендикуляр татахад ойсон цацрагууд үүснэ. Зураг 52-ийн АКВ ба ALB гурвалжнуудаас $i=j$ гэсэн ойлтын хууль батлагдана.



Зураг 53а. Долгионы хугарал

Долгионы тэвшний ёроолд шилэн хавтан тавьж тэвшин дэх усыг хоёр өөр гүнтэй болгоод гүн хэсгийн усны гадарга дээр хавтгай долгион үүсгэж гүехэн хэсэг рүү тусган хугарах байдал ба түүнийг загварчлан зурсныг зураг 53а-д харуулав.

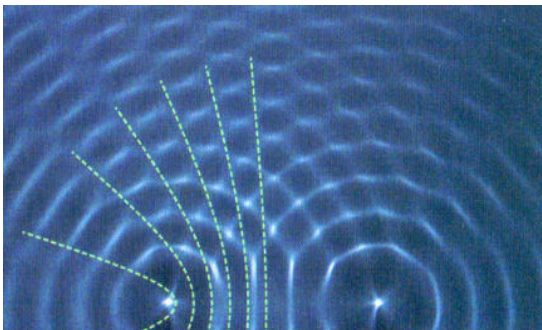


Зураг 53б. Долгионы хугарлын хууль

Орчны зааг уруу туссан хавтгай долгионы цацрагууд ба t агшин дахь туссан долгионы гадаргыг зурагт харуулав. (Зураг 53б) А ба К цэгүүдэд долгион зэрэг ирнэ. К – r дайрах цацраг В – д ирэх Δt хугацаанд А цэгээс $v_2 \Delta t$ радиустай хоёрдогч бөмбөрцөг долгион гүехэн ус руу тарна. АВ хэрчмийн бусад цэгүүдээс арай бага радиустай хоёрдогч долгионууд үүснэ. Эдгээрийн гадуур шүргэгч татахад $t + \Delta t$ агшин дахь хугарсан долгионы гадарга гарна. А ба В цэгүүдээс хугарсан долгионы гадаргад перпендикуляр татахад хугарсан цацрагууд үүснэ. Зураг 53б-ийн АКВ ба ALB гурвалжнуудаас хугарлын хуулийг гаргая.

$$\sin i = \frac{v_1 \Delta t}{AB}; \quad \sin r = \frac{v_2 \Delta t}{AB};$$

Синусуудын харьцааг олбол: $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$



Зураг 54. Долгионы интерференц

Долгионы интерференц

Усны гадарга дээр хоёр долгион үүсгэгчийг зэрэг хэлбэлзүүлж бөмбөрцөг долгионууд үүсгээд хэрхэн нэмэгдэж байгааг ажиглахад зарим цэгүүд илүү их далайцтай зарим цэгүүд хэлбэлзэл нь мэдэгдэхгүй болсон нь харагддаг. Зураг 54-д тасархай зураасаар холбосон цэгүүд хэлбэлзэхгүй.

Зурагт үзүүлсэн ижил фаз, ижил далайц, давтамжтай хэлбэлзэж буй S_1, S_2 үүсгэгчүүдээс гарсан долгион орчны янз

бүрийн цэгт давхцахад гарах үр дүнг авч үзье. Долгионы гүдгэрүүд нь гүдгэртэй, хотгор нь хотгортой тод шугам дээр, гүдгэр ба хотгор давхцсан газар тасархай шугам дээр байрлана (Зураг 55).

- Р цэгт интерференцийн ямар үр дүн гарахыг хэлэлцэн тайлбарла.
- Q цэгт интерференцийн ямар үр дүн гарахыг хэлэлцэн тайлбарла.

Далайц ихсэх нөхцөл буюу максимумын нөхцөл

$$|S_1P - S_2P| = m\lambda = \frac{\lambda}{2} \cdot 2m; \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots$$

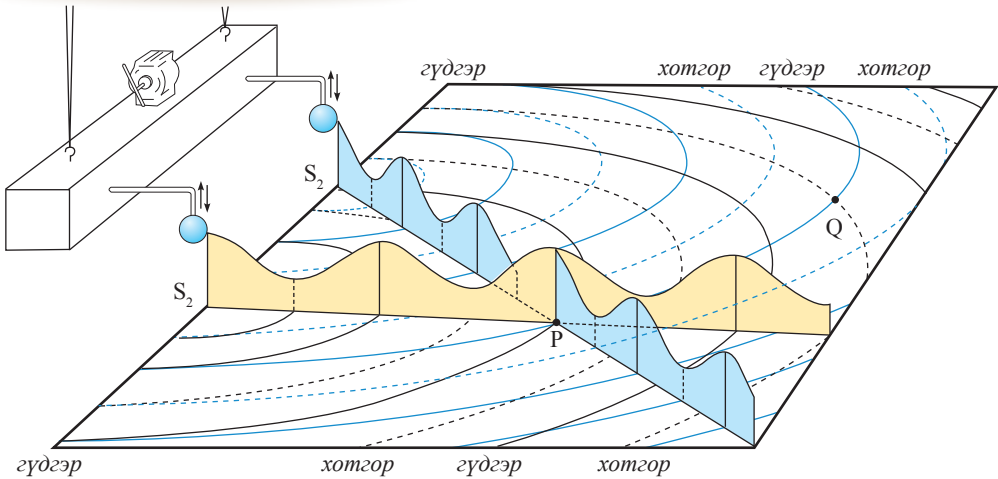


Хоёр үүсгэгч эсрэг фазтай хэлбэлзэж байсан бол далайц ихсэх багасах нөхцөлүүд солигдоно. Хоёр долгионы замын зөрөөнд $\lambda/2$ тэгш тоо дахин багтвал интерференцийн максимум, $\lambda/2$ сондгой тоо дахин багтвал минимум үүснэ.

Максимум нөхцөл биелсэн цэгт хэлбэлзлийн далайц 2 дахин их болоход хэлбэлзлийн энерги далайцын квадраттай пропорционал учир 4 дахин ихсэнэ. Далайц тэг болох буюу минимумын нөхцөл:

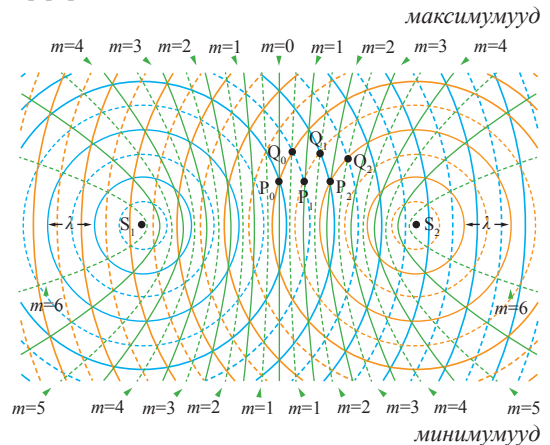
$$|S_1Q - S_2Q| = m\lambda - \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2} \cdot (2m - 1); m = 1, 2, 3 \dots$$

Минимум нөхцөл биелсэн цэгт далайц тэг болно.



Зураг 55. Долгионы интерференцийг тооцоолох

Хавтгай гадарга (усны гадарга шиг) дээр үүсэх интерференцийн үр дүнг геометр байгуулалтын тусламжтай тодорхойлж болно. Үргэлж шугамууд (долгионы гүдгэр) эсвэл тасархай шугамууд (долгионы хотгор) хоорондоо огтлолцсон цэгүүдэд далайц хоёр дахин ихсэнэ. Харин тасархай ба үргэлж шугам огтлолцсон цэгт далайц тэг байна. Үүсгэгчүүд ижил фазтай тохиолдолд S_1, S_2 -ын гол цэгийг дайрсан перпендикуляр шулуун бүх 0 дүгээр максимумын байрлалыг харуулна. m дугаар максимумын шугам замын ялгавар нь $m\lambda$ байх бүх цэгүүдийг дайрна.



Зураг 56.

Дасгал

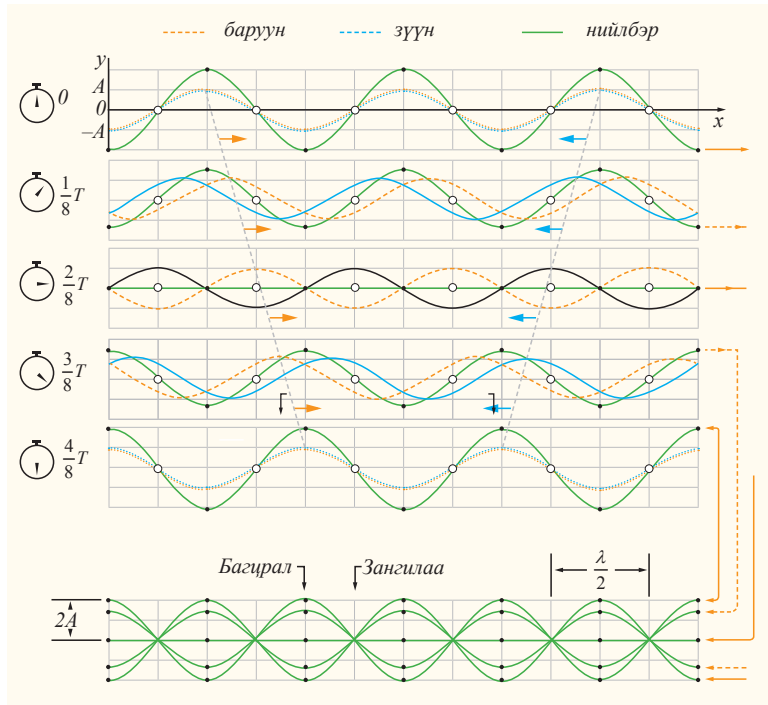
1. Зураг 56-ын S_1 ба S_2 үүсгэгчүүдээс $P_0, Q_0, P_1, Q_1, P_2, Q_2$ цэгүүд хүртэлх зайг долгионы λ уртаар илэрхийл.
2. Зургийн $P_0, Q_0, P_1, Q_1, P_2, Q_2$ цэгүүдэд интерференцийн үр дүн ямар байхыг тодорхойл.

Зогсонги долгион

Нэг шулуун дагуу өөд өөдөөсөө тарж буй когерент долгионууд давхцахад интерференцийн өвөрмөц тохиолдол болох зогсонги долгион үүсдэг. Үүсгэгчүүдийг холбосон шугам дээр зарим цэг огт хэлбэлзэхгүй, үүнийг зангилаа (интерференцийн минимум) гэж нэрлэнэ. Хоёр

зангилааны хоорондох хэсгийн бүх цэг ижил фазтайгаар өөр өөр далайцтай хэлбэлзэнэ. Зэргэлдээ хоёр багцрал эсрэг фазтай хэлбэлзэнэ. Хамгийн их далайцтай цэгийг багцрал (интерференцийн максимум) гэнэ. Хоёр долгионы хэлбэр давхцах агшныг 0 агшин гэж сонгоод түүнээс

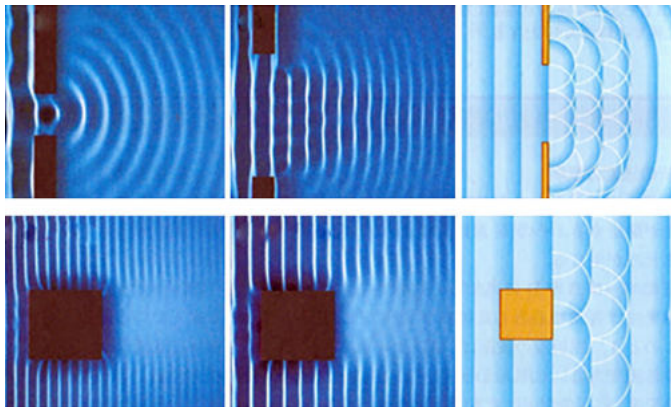
хойш $\frac{T}{8}$ хугацааны завсартайгаар долгион тус бүрийн хэлбэр болон нийлбэр долгионыг байгуулж үзүүлсэн байна. Зэргэлдээ зангилаанууд $\frac{\lambda}{2}$ зайтай, зэргэлдээ багцралууд $\frac{\lambda}{2}$ зайтай, багцрал зангилаа хоёр $\frac{\lambda}{4}$ зайтай. Гүйгч долгион энерги зөөдөг бол зогсонги долгион энерги зөөхгүй.



Зураг 57.

Долгионы дифракц

Долгионы замд саад тохиолдоход саадыг тойрч эхэлдэг. Энэ үзэгдлийг долгионы дифракц гэнэ. Усны гадарга дээр хавтгай долгион үүсгэн түүний замд долгион нэвтрэх өргөн завсар болон жижиг завсраас үүсэх дифракцын туршилтын зураг ба загварчлан харуулсныг зураг 58-д үзүүлэв. Завсар нарийн байхад завсраас цагариг долгионууд таржээ. Завсрын өргөн их байхад өргөний хэмжээтэй долгион нэвтрэх бөгөөд ирмэг орчимд долгионы гадарга бага зэрэг муруй байна.



Зураг 58. Долгионы дифракц



Завсар болон саадны хэмжээ долгионы урттай жишэхүйц бага байх үед дифракц тод ажиглагддаг. Дифракцийн үр дүнг тайлбарлахад долгион тархах зарчмаас гадна интерференцийн нөхцөлийг ашиглана.



4. ДУУНЫ ДОЛГИОН

Хүний чих 20 Гц – 20000 Гц давтамжтай механик долгионыг хүлээн авдаг. Агаарт зөвхөн тууш долгион тархаж чадна. Агаарын нягтрал, сийрэгжил маш хурдан явагддаг учир агаарт дуу тархах нь адиабат процесс юм. Агаарт дуу тархахад үүсэх тууш долгионыг хөндлөн долгион шиг болгон графикаар илэрхийлдэг.

Нэмэлт

Агаарт дуу тархах хурд температураас хамаарах

Хийд дуу тархах хурд $c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$ гэж илэрхийлэгддэг. Агаарын адиабатын илтгэгч $\gamma=1.40$; 0°C температурт даралт $p=1.013 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$; нягт $\rho=1.29 \text{ кг/м}^3$ болохыг орлуулбал $c_0 = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = 331.5 \text{ м/с}$.

Идеал хийн төлөвийн тэгшитгэлээс

$$p = \frac{\rho RT}{\mu}$$

Хурдны илэрхийлэлд орлуулбал $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$, $T=273+t$

$$t \ll 273^\circ\text{C} \text{ тохиолдолд } c = c_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right)^{\frac{1}{2}} \approx c_0 \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{t}{273}\right) = 331.5 + 0.6t$$

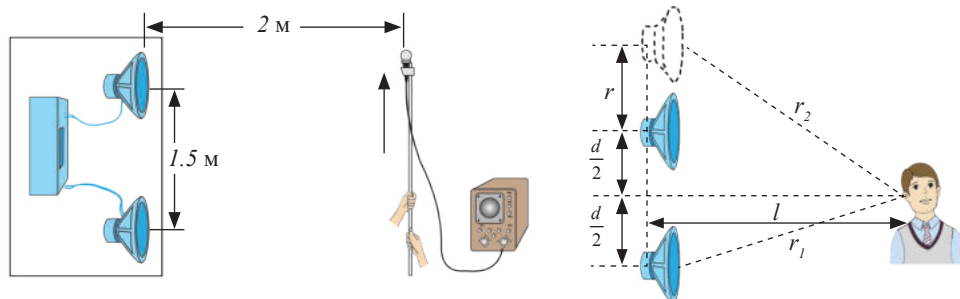
t – агаарын температур (Цельсээр)

15°C температурт дууны хурдыг 340 м/с гэж авна.

Дууны интерференц

Дууны когерент долгион орчин дотор давхцан тархахад дууны интерференц болж зарим цэгт дуу чанга сонсогдож байхад зарим цэгт сонсогдохоо болино.

Нэг үүсгүүрээс гарсан дууг хоёр чанга яригчаар үүсгэж тэдгээртэй параллел шулууны дагуу дууг сонсох буюу микрофоноор хүлээн авч цахилгаан дохио болгон хувиргаж судалбал интерференцийг ашиглаж болно (Зураг 59).



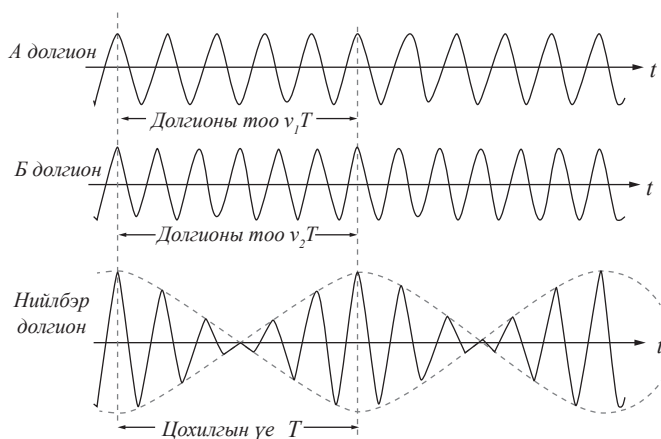
Зураг 59.

$$r_2 - r_1 = \frac{\lambda}{2} \cdot 2m; m = 0, 1, 2, \dots \text{ дуу чангарах нөхцөл}$$

$$r_2 - r_1 = \frac{\lambda}{2} \cdot (2m - 1); m = 1, 2, \dots \text{ дуу сулрах нөхцөл}$$

Дасгал

- Зураг 59-д микрофоны хөдлөх зүг дагуу x тэнхлэг авч дуу чангарах байрлалуудыг тодорхойл.
- 2500 Гц давтамжтай дууны зогсонги долгионы хоорондоо 20 см зайтай хоёр зангилааны хооронд 3 багцрал байсан бол
 - Дууны долгионы уртыг ол.
 - Агаарт дуу тархах хурдыг ол.



Зураг 60.

Дууны цохилго

Ижил давтамжтай дуунууд давхцахад интерференц явагддаг бол ойролцоо давтамжтай дуунууд давхцан сонсоход дууны цохилго гэдэг үзэгдэл явагддаг.

Зурагт v_1 давтамжтай А долгион, v_2 давтамжтай В долгион хоёр давхцахад нийлбэр хэлбэлзэл ямар болохыг зурагт харуулав. Нийлбэр долгионы далайц ямар нэг T үетэй хэлбэлзэнэ гээ. Энэ хугацаанд зурагдах долгионы гүдгэрийн тоо $v_1 T$ ба $v_2 T$ гэвэл зөрөө нь нэгтэй тэнцүү.

$$|v_1 T - v_2 T| = 1$$

Үеийн урвуу хэмжигдэхүүн нь давтамж учраас далайц өөрчлөгдөх давтамж $N = \frac{1}{T}; N = |v_1 - v_2|$.

Цохилгын давтамж хоёр долгионы давтамжийн зөрөөтэй тэнцүү байна. Далайц хувирахад дууны чанга сул хувирна. Иймд цохилгын үед хоёр долгионы дундаж давтамжтай (дундаж өндөртэй) дуу сонсогдох ба чанга сул нь цохилгын давтамжаар хувирах болно.

Дасгал А, В, С гурван дуу үүсгэгч байна. А болон В – г зэрэг дуугаргахад 1 с – д 3 удаа цохилго болж, В болон С – г зэрэг дуугаргахад 1 с – д 1 удаа цохилго болж байв. А дуу үүсгэгчийн давтамж 500 Гц байсан бол В болон С дуу үүсгэгчийн давтамж хэд вэ? В нь А – аас өндөр дуу үүсгэдэг, С нь В – ээс нам дуу үүсгэдэг.

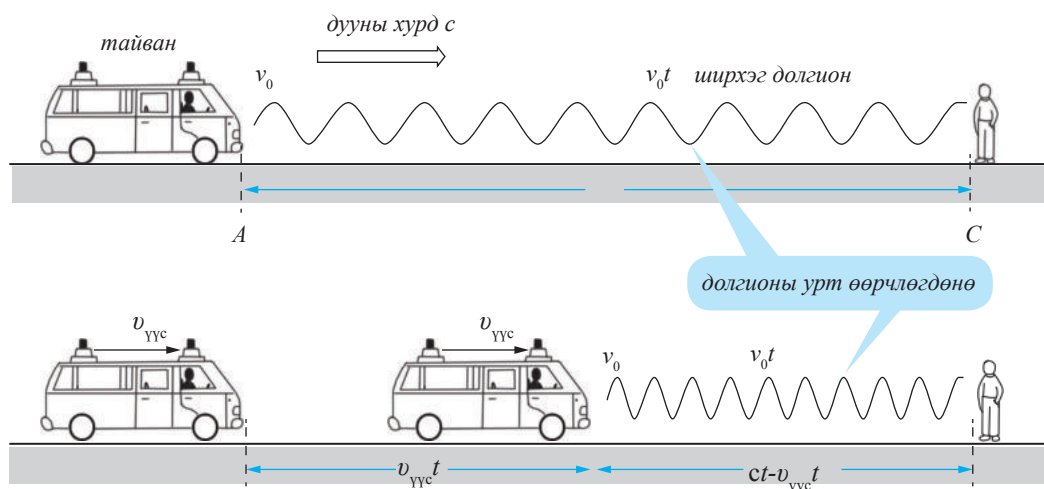
Доплерын үзэгдэл

Тодорхой давтамжтай дуу үүсгэгч, дууг хүлээн авах ажиглагч хоёрын харьцангуй хөдөлгөөнөөс хамаарч ажиглагчид мэдрэгдэх давтамж өөрчлөгддөг үзэгдлийг Австрийн физикч Иоганн Доплер 1842 онд нээжээ. Үүсгэгч ажиглагч хоёрын хоорондох зай ойртож байхад давтамж ихэсдэг, зай холдож байхад давтамж багасдаг.

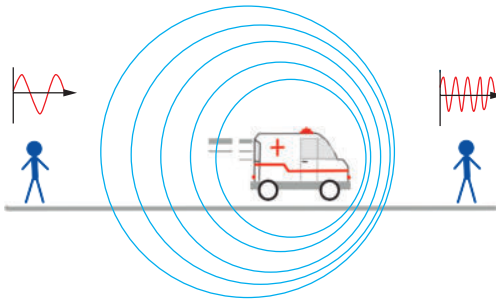
Ажиглагч хөдөлгөөнгүй, дуу үүсгэгч хөдлөх тохиолдол. Дуу үүсгэгч $v_{\text{үүс}}$ хурдтай хөдлөнгөө v_0 давтамжтай дуу үүсгэсэн. Агаарт дуу тархах хурд c . А байрлал дахь дууны фронт С байранд буй тайван байгаа ажиглагчид тархаж очиход t хугацаа зарцуулжээ. Дууны хурд үүсгэгчийн хурдаас хамаарахгүй учраас АС зай ct хэмжээтэй. Дуу үүсгэгч энэ хооронд $AB = v_{\text{үүс}} t$ зай туулах бөгөөд t хугацаанд үүсгэгч $v_0 t$ удаа хэлбэлзэн $v_0 t$ ширхэг долгион гаргана.

BC = $ct - v_{\text{үүс}} t$ хооронд $v_0 t$ ширхэг долгион байгаа учраас долгионы урт $\lambda = \frac{ct - v_{\text{үүс}} t}{v_0 t} = \frac{c - v_{\text{үүс}}}{v_0}$.

Иймд С – цэгт тайван байгаа ажиглагчид сонсогдох давтамж $v' = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{c - v_{\text{үүс}}} v_0$.

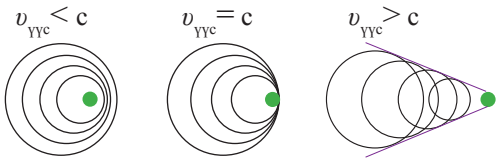


Зураг 61.



Зураг 62.

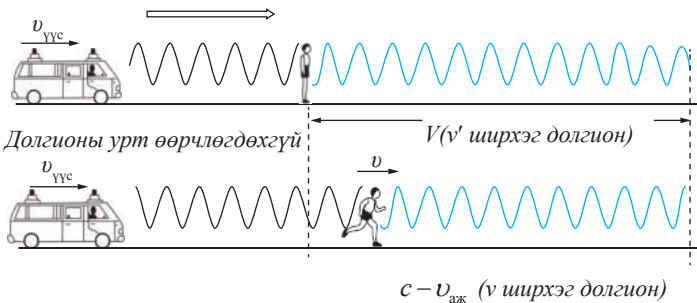
Зураг 62-г цэгэн үүсгэгч хөдөлж байхад түүний долгионы гадаргын хэлбэрийг харуулав. Үүсгэгчийн өмнө талд долгионы гадарга шахагдан ойртож долгионы урт багассан бол үүсгэгчийн ар талд долгионы гадарга холдож долгионы урт ихэссэн байна.



Зураг 63. Дуу үүсгэгчийн долгионы гадарга

Зураг 63-г үүсгэгчийн хурд янз бүр байх тохиолдлуудад долгионы гадаргад ямар байхыг харуулав.

Дуу үүсгэгч, ажиглагч хоёулаа хөдлөх тохиолдол



Зураг 64.

Зураг 64-д үзүүлснээр ажиглагч дуу үүсгэгчийн хөдлөх чиглэлд $v_{аж}$ хурдаар хөдлөх тохиолдлыг авч үзье. Түүнийг тайван байх үед нэгж хугацаанд дайран өнгөрөх долгионы тоо v' байна. Ажиглагч $v_{аж}$ хурдтай хөдлөх үед ажиглагчийг нэгж хугацаанд дайрах долгионы тоо буюу сонсдох давтамж нь

$$v = \frac{c - v_{аж}}{c} v' \quad \text{Үүнд } v' \text{ - ийг орлуулбал } v = \frac{c - v_{аж}}{c - v_{үүс}} v_0 \quad (1)$$

Үүсгэгч ба ажиглагч нэг шулуун дээр дурын чиглэлд хөдөлж байхад энэ томьёог хэрэглэхдээ үүсгэгчээс ажиглагч руу чиглэлийг эерэг чиглэл болгон авч үүсгэгч ба ажиглагчийн хурд түүнтэй ижил чиглэлтэй бол эерэг, эсрэг бол сөрөг утгатай гэж тооцно.

Жишээ 40 м/с хурдтайгаар шулуун яваа эмнэлгийн тэрэг 760 Гц давтамжтай дуу гаргаж байв. Эсрэг чиглэлд 20 м/с хурдтай яваа тэрэг ямар давтамжтай дуу хүлээж авах вэ? Тэрэг зөрж өнгөрсний дараа ямар давтамжтай дуу хүлээж авах вэ?

Бодолт Доплер үзэгдлийн (1) томьёогоор

$$v_1 = \frac{340 - (-20)}{340 - 40} \cdot 760 = 912 \text{ Гц} \quad v_2 = \frac{340 - 20}{340 - (-40)} \cdot 760 = 640 \text{ Гц}$$

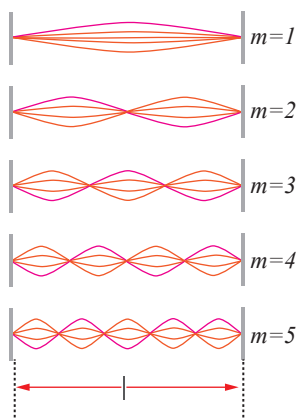
Дасгал Цахилгаан тэрэг дохио үүсгэн зам дээр хөдөлгөөнгүй байгаа хүний өмнүүр өнгөрөв. Хүний хүлээж авах давтамж ойртож ирэх үед 550 Гц, холдох үед 450 Гц байв. Цахилгаан галт тэрэгний хурд болон дохионы давтамжийг ол. Агаарт дууны хурд 340 м/с гэж үзнэ.

Дасгал Тогтмол давтамжтай дуу үүсгэгч ажиглагч хоёр нэг шулууны дагуу бие бие рүүгээ ижил 20 м/с хурдтай ойртох үед ажиглагч хүнд сонсогдох дууны давтамж v_1 байв. Бие биенээсээ ижил 20 м/с хурдтай холдох үед ажиглагч хүнд сонсогдох дууны давтамж v_2 байв. Холдох ба ойртох үеийн давтамжуудын харьцаа v_2/v_1 хэд вэ? Дууны хурдыг 340 м/с гэж үзнэ.

Утсан ба үлээвэр хөгжим хэрхэн дуугардаг вэ?



Зураг 65.



Зураг 66.

Чавхдас утасны хэлбэлзэл ба дуу

Чавхдас утасны хоёр үзүүрийг бэхлээд утасны голоос татаж тавибал утас хэлбэлзэхэд утсаар хоёр тийш долгион тарж бэхэлсэн үзүүрүүдээс ойгоод давхцахдаа интерференцэд орж зогсонги долгион үүсгэнэ. Чавхдас утсанд зогсонги долгион үүссэн байдлыг зураг 66-д харуулав.

Утсанд үндсэн хэлбэлзэл явагдаж байхад хоёр үзүүр буюу зангилааны хооронд ганц багцрал байна, үндсэн хэлбэлзлээр үүссэн дууг үндсэн гармоник гэдэг.

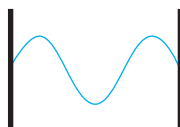
Хоёрдогч хэлбэлзэл буюу хоёрдогч гармоник дуугарч байхад хоёр багцрал үүссэн байна.

$$m - \text{дугаар гармоникийн долгионы урт } \frac{\lambda_m}{2} \cdot m = l \Rightarrow \lambda_m = \frac{2l}{m}$$

$$\text{Давтамж } v_m = \frac{c}{\lambda_m} \Rightarrow v_m = \frac{c}{2l} m ; m = 1, 2, 3, \dots$$

l - чавхдас утасны урт; m - гармоникийн дугаар (багцралын тоо); V - агаарт дуу тархах хурд

Давтамжуудын харьцаа: $v_1 : v_2 : v_3 \dots = 1 : 2 : 3 \dots$ байна.



Зураг 67.

Дасгал Хоёр хананы хооронд чангалж татсан 9.0 м урт чавхдас утсанд зогсонги долгион үүссэнийг харуулав. Долгион тархах хурд 16 мс⁻¹.

А. Зогсонги долгионы уртыг ол.

Б. Долгионы үе, давтамжийг ол.

В. Дээрх зургийн агшнаас 3/32 с ба $\frac{3}{16}$ с – ийн дараа долгионы хэлбэрийг зур.

Агаарын баганын хэлбэлзлээр дуу үүсэх

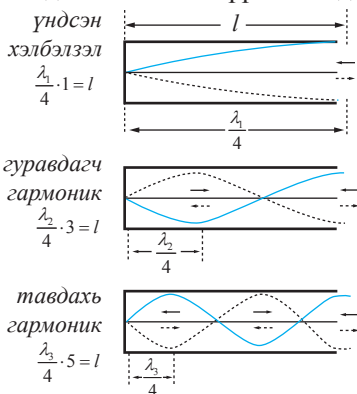
Янз бүрийн урттай соруул хоолойг багцлаад энгийн ая оруулж болдог. Цохилуур хөгжмийн доор янз бүрийн урттай хоолойнууд байдаг нь дууг чанга болгоход чухал үүрэгтэй.

Хоолойнууд яагаад дуугарсан бэ?



Зураг 68.

Агаар бүхий хоолой руу дуу ороход туссан ойсон дуу интерференцэд орсноор хоолой доторх агаарын багананд зогсонги долгион үүсвэл агаарын багана дуу үүсгэгчтэй резонанслагдаж дагаж дуугарна. Агаарын багана үүсгэх хоолойны нэг тал битүү эсвэл хоёр тал задгай байж болдог. Нэг тал битүү хоолойд дуу үүсэхийг авч үзье.



Зураг 69.

Битүү хоолойд зогсонги долгион үүсгэж резонанслах тохиолдолд битүү талд зангилаа, задгай амсар дээр багцрал үүсдэг. Зургаас долгионы урт, хоолойн уртын хамаарлыг ажиглаж тогтоовол

$$\frac{\lambda_m}{4} \cdot (2m - 1) = l \Rightarrow \lambda_m = \frac{4l}{2m - 1} \quad \text{үүний } m=1, 2, 3, \dots$$

Давтамжийг олбол $v_m = \frac{c}{\lambda_m} \Rightarrow v_m = \frac{c}{4l} (2m - 1)$.

$m=1, 2, 3, \dots$ тоонуудад харгалзах хэлбэлзэл ба дууг үндсэн хэлбэлзэл, гуравдагч хэлбэлзэл, тавдагч хэлбэлзэл буюу гармоник гэх мэт нэрлэнэ. Энэ нь үндсэн хэлбэлзлийг хэд дахин давтаж байгааг харуулна.

Давтамжуудын харьцаа $v_1 : v_2 : v_3 \dots = 1 : 3 : 5 \dots$ байна.

Хоёр тал задгай хоолойд дуу хэрхэн үүсэх вэ?

Резонансын үед хоёр задгай амсар дээр багцрал үүсдэг.

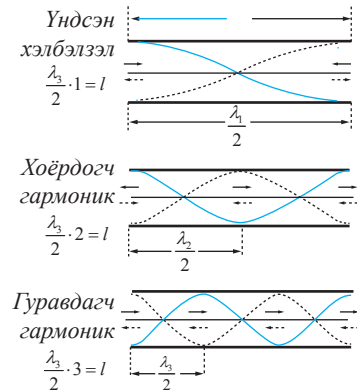
Зургаас долгионы урт хоолойн уртын хамаарлыг ажиглаж

тогтоовол $\frac{\lambda_m}{2} \cdot m = l \Rightarrow \lambda_m = \frac{2l}{m}$ үүний $m=1, 2, 3, \dots$

Давтамжийг олбол $v_m = \frac{c}{\lambda_m} \Rightarrow v_m = \frac{c}{2l} m ; m = 1, 2, 3, \dots$

$m=1, 2, 3, \dots$ тоонуудад харгалзах хэлбэлзэл ба дууг үндсэн хэлбэлзэл, хоёрдогч хэлбэлзэл, гуравдагч хэлбэлзэл буюу гармоник гэхчилэн нэрлэнэ. Энэ нь үндсэн хэлбэлзлийг хэд дахин давтаж байгааг харуулна.

Давтамжуудын харьцаа $v_1 : v_2 : v_3 \dots = 1 : 2 : 3 \dots$ байна.



Зураг 70.

Дасгал Усаар дүүргэсэн хоолойн дээд талд 256 Гц давтамжтай камертон байрлуулж дуугаргаад усны түвшинг доошлуулж резонанс үүсгэв.

- А. Резонанслах дуу огцом чангарсны учрыг тайлбарла.
 В. Резонанс анх сонсогдсон үеийн агаарын баганын өндөр 31.2 см байсан бол дууны долгионы хурдыг ол.

Туршилтын ажил

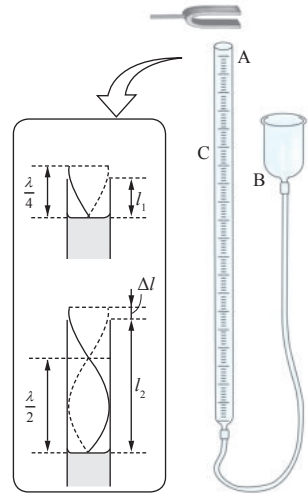
Агаарын баганын резонансыг судлах

Зорилго: Үлээвэр хөгжмийн агаарын баганатай хоолойг урт болгох тутам дуу өндөр болдог. Энэ үзэгдэл резонанстай хэрхэн холбогдохыг судлах.

Хэрэглэгдэхүүн: Резонансын хоолой, камертон, термометр, штангенциркуль, цохиур.

Ажиллах дараалал:

- (1) Хуваарьтай цилиндр хоолойг босоогоор нь байрлуулж усаар дүүргэх.
- (2) Усны температурыг хэмжих.
- (3) Камертоныг цохиж хэлбэлзүүлээд хоолойн амсарт ойртуулж В савыг аажим доошлуулахад усны С түвшин доошилно.
- (4) Камертоны дуу хамгийн чанга болох үеийн түвшинг тэмдэглэж хоолойн амсраас усны түвшин хүртэлх зайг хэмжинэ.
- (5) Усны түвшинг дахин доошлуулж хоёр дахь резонанс болох байрыг тэмдэглэж зайг хэмжинэ.
- (6) (3) - (5) – ийг 5 удаа гүйцэтгэнэ.
- (7) Туршилтыг өөр температурт гүйцэтгэнэ.
- (8) Хоолойны диаметрийг штангенциркулиэр хэмжинэ.



Зураг 71.

Хүснэгт бөглөх ба график байгуулах

Хүснэгт 7.

Анхны температур $t_1 = \dots \text{ }^\circ\text{C}$

Өөрчлөгдсөн температур $t_2 = \dots \text{ }^\circ\text{C}$

Дундаж температур $t = \dots \text{ }^\circ\text{C}$

Долгионы урт $\lambda = 2(l_2 - l_1) = \dots \text{ м}$

Дууны хурд $c = 331.5 + 0.6t = \dots \text{ м/с}$

Дүгнэлт гаргах

Камертоны давтамж $\nu = \frac{c}{\lambda} = \dots$

Хоолойн диаметр $d = \dots \text{ см}$

Туршилтын дугаар	1 – р резонанс үүсэх зай	2 – р резонанс үүсэх зай
1		
2		
3		
4		
5		
дундаж		

Хэлэлцүүлэг

- (1) Дуу үүсгэгчийн долгионы уртыг яагаад $2(l_2 - l_1)$ гэж олсон бэ?
- (2) Анхны резонансын l_1 зай нь $\frac{\lambda}{4}$ - тай яагаад тэнцүү биш вэ?
- (3) $\frac{\lambda}{4}$ ба l_1 - ийн зөрөөгөөр задгай амсрын засвар Δl - ийг ол.
- (4) Δl нь хоолойн d диаметрийн хэдэн хэсэгтэй тэнцүү байна вэ?
- (5) Хоолой доторх дууны өндөр нам температураас хэрхэн хамаарч буйг ярилц.

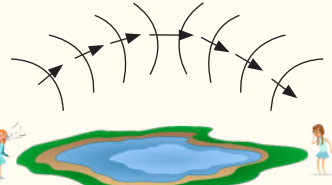
Өөрийгөө сорiorой

1. **Агаар дахь дууны хурдыг тодорхойлох.** Багш агаарт тархах дууны хурдыг тодорхойлох туршилт сэдэх даалгавар өгөв.

Баяр хол зайнаас дууны пульс ирэх хугацааг секундомерээр бүртгэж, зай ба хугацаагаар дууны хурдыг хэмжье гэсэн санал дэвшүүлэв. Гэвч энэ арга хугацаа хэмжихэд алдаа ихтэй байна гэсэн шүүмжлэлд өртөв. Сараа гармоник дууны үүсгүүр ашиглаж, тодорхой давтамжтай гармоник долгион үүсгэж, хананаас ойлгоод зогсонги долгион үүсгэж, үүссэн долгионы багцралыг осциллоскопоор бүртгэж, долгионы уртыг хэмжиж долгион тархах хурдыг олъё гэсэн санал дэвшүүлэв. Энхээ доплерийн үзэгдлийг ашиглах санал дэвшүүлэв. Тодорхой давтамжтай хоёр когерент дуу үүсгэгчийн завсарт дуу бүртгэгчийг байрлуулж, нэг үүсгүүр рүү тодорхой хурдтай хөдөлгөвөл ойртож байгаа үүсгүүрийн давтамж ихсэж, холдож байгаа үүсгүүрийн давтамж багасаж нийлбэр долгион цохилго үүсгэх болно. Цохилгын давтамж ба анхдагч дууны давтамж, бүртгэгчийн хөдөлгөөний хурдыг ашиглан агаарт тархах дууны хурдыг олох боломжтой гэв.

Энд гармоник дохионы үүсгүүр болгож гар утсаа ашиглаж болно. Мөн дуу бүртгэгч осциллоскоп болгож өөр нэг гар утсыг ашиглаж болох юм. Эдгээр санааг хэрэгжүүлж бодит туршилт болгох талаар саналаа дэвшүүлнэ үү. Боломжтой бол туршиж үзээрэй.

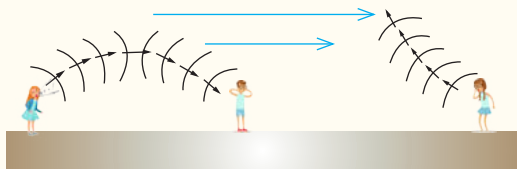
2. **Нуурын цаадах шивнээ.** Баярын анги өдрийн амралтаар нуурын эрэгт амрав. Өглөө эрт нуурын цаад талд яваа сурагчдын яриа нуурын наад талаас барагцаалбал 200 м зайнаас маш тод сонсдож байв. Зарим сурагчид үүний шалтгааныг нуурын усны гадарга орчмын агаарын температур бага учир агаарт дуу тархах хурд багассан, иймд дууны эрчим тод байна гэхэд зарим нь нуурын гадаргаас дуу ойж байгаа учир эрчим нэмэгдэж байна гэв. Үзмээ “Нуурын дээрх агаар чийглэг байгаа тул агаарын нягт ихэссэн. Иймд дууны хурд багассан” гэв. Харин Чулуунаа “Ийм нөлөө байхыг үгүйсгэхгүй. Гэхдээ гол нөлөө нь нуурын гадарга орчимд температур бага, дээшлэх тутам ихсэж байгаа. Ялгаатай температуртай агаарын үе рүү дуу орохдоо хурд нь өөрчлөгдсөнөөс дууны цацраг доошоо муруйж, хугарч байна. Хүүхдээс тал тал тийш гарсан дуу ажиглагчид ирэхдээ цугларч байна” гэв.



Сурагчдын гаргасан санаанд шинжилгээ хийнэ үү.

3. **Салхины нөлөө.** Ууланд аялагчид цуваа үүсгэн хүчтэй салхины өөдөөс бие биеэсээ төөрөхгүйн тулд чимээ гаргаж явав. Цувааны дунд явсан аялагч нэг зүйлийг ажиглав. Салхины дээр яваа хүний дуу тод сонсдож байгаа атал, салхины доор яваа хүний дуу бараг сонсдохгүй байв. Тэр эхлээд салхины өөдөөс дуу тархахад хурд нь багасна. Дагуу хурд нэмэгдэнэ. Иймд дууны хурд өөрчлөгдсөнтэй холбоотой гэж бодсоноо эргэлзэж эхлэв. Салхины хурд газраас дээшлэх тутам их байдаг. Дууны хугаралтай холбоотой юм болов уу гэж бодов. Чи энэ талаар юу хэлж чадах вэ?

салхины хурд газраас дээшлэх тутам их байна



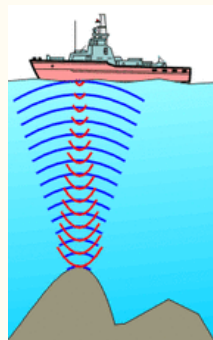
4. **Энэ үнэн үү.** Дуу тархах хурд, долгионы урт ба давтамж гурав $c = \lambda \cdot \nu$ томъёогоор холбоотойг бид мэднэ. Эндээс дууны хурд долгионы урт ба давтамжаас шууд пропорционал хамаарна гэж үзэж болох уу. Өөрөөр хэлбэл 1000 Гц давтамжтай

долгионоос 2000 Гц давтамжтай дуу хоёр дахин их хурдтай тарна гэж хэлж болох уу? Үгүй бол яагаад?

5. **Хөгжмийн үүсгэх дуу.** Үлээвэр хөгжмийн зэмсгүүд зогсонги долгионы резонансад үндэслэсэн байдаг. Хоолойны уртаас хамааран гаргах дууны өнгө (давтамж) ялгаатай байдаг. Хоолойны уртаас дууны давтамж хэрхэн хамаарах бол?



6. **Эхолокаци.** Далайн гүний газрын зургийг гаргахад дууны эхолокацийн арга хэрэглэдэг. Дууны пульс үүсгэж түүний ойж ирсэн хугацааг хэмжиж усны гүнийг тодорхойлдог. Эхолокацийн аргыг далайн гахай, сарьсан багваахай, зарим шувууд идэш тэжээлээ олох, саадыг илрүүлэхэд ашигладаг. Эхолокацийг өөр юунд хэрэглэж болох бол? Санаа гаргана уу.



7. **Хүний дуу.** Хүний дууны аппаратад амны хөндий, шүд, хэл, хоолой, дууны хөвч зэрэг хамаатай. Хүн янз бүрийн давтамжтай авиа гаргахдаа амныхаа хөндийн хэлбэрийг өөрчилдөг. Энэ нь ямар учиртай вэ?

8. **Гудамжны чимээ.** Ангийн цонх онгорхой байхад дуу үүсгэгч харагдахгүй атал үүсгэх чимээ нь тод сонсогддог. Ялангуяа нам давтамжтай дуу (мотоцикл, ачааны машины чимээ) илүү тод сонсогддог. Энэ ямар учиртай вэ?



9. **Далайн давалгааны хурд.** Туршлагагай далайчид давалгааны хэлбэрийг ажиглаад эрэг ойртож байгаа эсэхийг мэддэг. Далайн давалгаа эрэг рүү ойртох тутмаа өндөрсөж, урт нь багасдаг. Энэ ямар учиртай вэ?

10. **Максимумын тоо.** Хоёр дууны цэгэн үүсгүүр хоорондоо 1.00 м зайд байрлана. Үүсгэх дууны давтамж ижилхэн 1200 Гц. Хамгийн ихдээ интерференцийн хэдэн максимум үүсэх

боломжтой вэ? Дууны давтамжийг 2 дахин нэмэгдүүлбэл үүсэх максимумын тоо яаж өөрчлөгдөх вэ? Агаарт дуу тархах хурд 340 м/с.

11. **Инженерийн шийдэл.** Хурдны галт тэрэгний зам уулын хонгилоор олонтаа гардаг. Хонгил уруу их хурдтай орвол галт тэрэг хонгилын агаартай мөргөлдөж цонх хагарах, галт тэрэгний хөдөлгүүрийн чимээ хонгилын хананаас ойж резонанслан их чимээ, чичиргээ үүсгэх гэх мэт шийдэх ёстой асуудлууд олонтаа гардаг. Үүнийг хэрхэн эерэгээр шийдвэрлэх талаар санал дэвшүүлнэ үү.

