

**СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ПО ФИЗИКЕ**

**(РАЗДЕЛЫ «МЕХАНИКА»,
«МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И
ТЕРМОДИНАМИКА»)**

ISBN 978-985-477-687-3



9 789854 776873

МГПУ им. И.П.Шамякина

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Мозырский государственный педагогический
университет имени И. П. Шамякина»

Физико-инженерный факультет

Кафедра физики и математики

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ФИЗИКЕ
(разделы «МЕХАНИКА»,
«МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА»)

Для студентов специальностей
1-08 01 01-05 Профессиональное обучение (строительство),
1-08 01 01-01 Профессиональное обучение (машиностроение)

Мозырь
МГПУ имени И. П. Шамякина
2019

УДК 53(035)
ББК 22.3я2
С71

Составитель

Ж. И. Равуцкая, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры физики и математики УО МГПУ им. И. П. Шамякина

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры геологии и географии
УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»

Г. С. Митюрин;

кандидат педагогических наук, доцент, профессор кафедры общей физики УО «Могилевский
государственный университет им. А. А. Кулешова»

В. М. Кротов

Печатается по решению редакционно-издательского совета
учреждения образования
«Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина»

**Справочные материалы по физике (разделы «Механика»,
С71 «Молекулярная физика и термодинамика»)** / сост. Ж. И. Равуцкая. –
Мозырь : МГПУ им. И. П. Шамякина, 2019. – 52 с.
ISBN 978-985-477-687-3.

Справочные материалы содержат основные теоретические сведения по разделу «Физические основы механики. Основы молекулярной физики и термодинамики»: определения физических величин, единицы их измерения, основные законы механики и молекулярной физики, физические формулы, являющиеся математическим выражением физических законов. Выводы всех законов и закономерностей проиллюстрированы соответствующими рисунками, что способствует лучшему восприятию и запоминанию материала. Для эффективной организации самостоятельной работы студентов предложен список рекомендуемой литературы.

Справочные материалы целесообразно использовать в учебном процессе по подготовке студентов по специальностям 1-08 01 01-05 Профессиональное обучение (строительство), 1-08 01 01-01 Профессиональное обучение (машиностроение).

УДК 53(035)
ББК 22.3я2

ISBN 978-985-477-687-3

© Равуцкая Ж. И., составление, 2019
© УО МГПУ им. И. П. Шамякина, 2019

Справочное издание

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ФИЗИКЕ
(разделы «МЕХАНИКА», «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА»)

Составитель

Равуцкая Жанна Ивановна

Корректор *С. И. Журавлёва*

Оригинал-макет *Л. И. Фецула*

Подписано в печать 02.09.2019. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2.
Тираж 88 экз. Заказ 25.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Мозырский государственный
педагогический университет имени И. П. Шамякина».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий N 1/306 от 22 апреля 2014 г.
Ул. Студенческая, 28, 247777, Мозырь, Гомельская обл.
Тел. (0236) 32-46-29

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Кинематика.....	5
Динамика материальной точки.....	12
Законы сохранения в механике.....	17
Динамика твердого тела.....	20
Механика сплошных сред.....	24
Механические колебания.....	26
Упругие волны.....	31
Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов.....	33
Термодинамика.....	37
Реальные газы.....	42
Жидкости.....	44
Кристаллическое состояние.....	46
Фазовые переходы.....	48
Список рекомендуемой литературы.....	49
Предметный указатель.....	50

ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика является фундаментом всякого естественнонаучного образования. Содержание раздела «Физические основы механики. Основы молекулярной физики и термодинамики» дисциплины «Физика» рассчитано на приобретение студентами знаний о физических процессах, происходящих в природе, при их органичном сочетании с современными данными других наук. Целью изучения данного раздела является ознакомление студентов с основными положениями механики и молекулярной физики в соответствии с программой подготовки студентов при получении профессионального инженерно-технического образования. В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- основные законы и теории классической и современной физической науки, а также границы ее применимости;
- методы измерения физических характеристик веществ и полей;
- физические основы методов исследования вещества;
- принципы экспериментального и теоретического изучения физических явлений и процессов;

уметь:

- применять законы физики для решения прикладных инженерных задач;
- использовать измерительные приборы при экспериментальном изучении физических и технологических процессов;
- обрабатывать и анализировать результаты экспериментальных измерений физических величин;

владеть методами:

- физического моделирования физических процессов;
- анализа и решения прикладных инженерных задач.

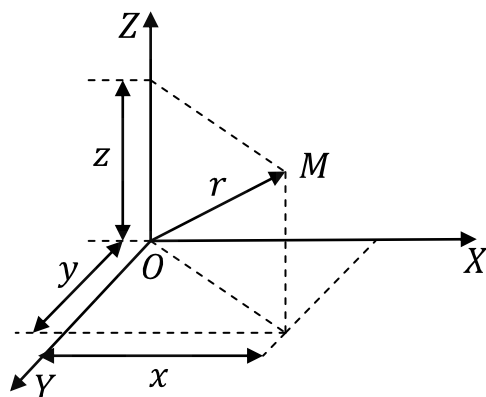
Реализации поставленной цели могут служить разработанные справочные материалы. В пособии представлены основные теоретические сведения по разделу, включающие определения физических величин, единицы их измерения, основные законы механики и молекулярной физики, физические формулы, являющиеся математическим выражением физических законов. Для лучшего восприятия и запоминания материала выводы всех законов и закономерностей проиллюстрированы соответствующими рисунками. Для эффективной реализации самостоятельной работы студентов по подготовке к занятиям по разделу «Физические основы механики. Основы молекулярной физики и термодинамики» представлен список рекомендуемой литературы. Для быстрого нахождения необходимых сведений в конце пособия представлен предметный указатель.

КИНЕМАТИКА

Система отсчета включает в себя следующие компоненты:

- тело отсчета,
- систему координат,
- способ измерения времени.

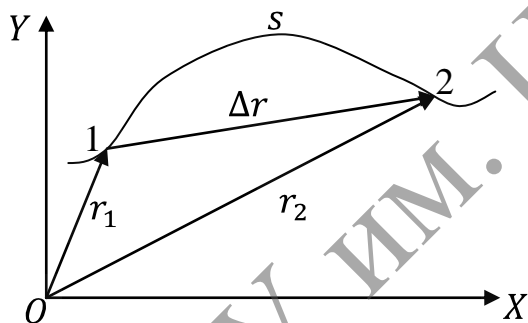
Положение материальной точки в выбранной системе отсчета



$$M(r), M(x, y, z),$$

r – радиус-вектор,
 x, y, z – проекции радиус-вектора r на
 оси координат.

Движение материальной точки

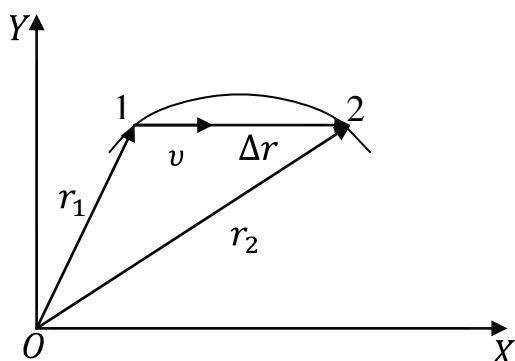


- *Траектория* – линия, которую описывает в пространстве движущаяся точка.
- *Путь* Δs – скалярная физическая величина, численно равная расстоянию, пройденному точкой вдоль траектории за время Δt (отрезок траектории).
- *Перемещение* Δr – векторная физическая величина, определяемая как направленный отрезок, проведенный из положения 1 в положение 2 (приращение радиус-вектора точки за промежуток времени Δt):

$$\Delta r = r_2 - r_1.$$

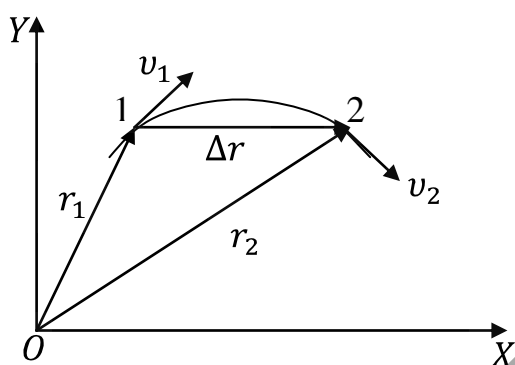
Скорость

Векторная физическая величина, которая характеризует как быстроту движения, так и его направление в данный момент времени.

Средняя скорость

Векторная физическая величина, характеризует движение за некоторый конечный промежуток времени, численно равна отношению перемещения к промежутку времени, за которое это перемещение произошло:

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t}, \quad v \uparrow \Delta r, \quad v = \frac{m}{c}$$

Мгновенная скорость

Векторная физическая величина, характеризует движение в данный момент времени (в данной точке траектории), численно равна пределу отношения вектора перемещения Δr к интервалу времени Δt , за который произошло это перемещение, при условии, что Δt стремится к нулю, т. е. первой производной радиус-вектора по времени:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}$$

Направлена по касательной к траектории в направлении движения.

Ускорение

Векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

Среднее ускорение

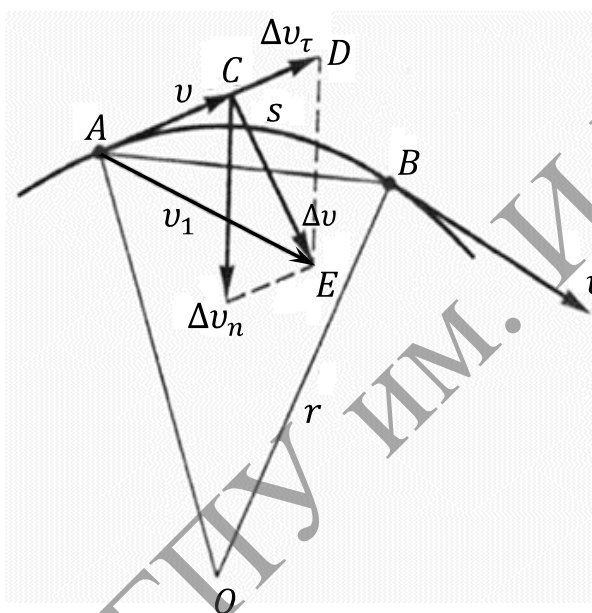
Векторная физическая величина, характеризует изменение скорости за некоторый промежуток времени, численно равна отношению изменения скорости к интервалу времени, за которое произошло это изменение:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad a \uparrow \Delta v, \quad a = \frac{m}{c^2}$$

Мгновенное ускорение

Векторная физическая величина, характеризует изменение скорости в данный момент времени, численно равна пределу отношения изменения вектора скорости к интервалу времени Δt , за который произошло это изменение, при условии, что Δt стремится к нулю, т. е. первой производной от вектора скорости по времени, или второй производной радиус-вектора по времени:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}.$$

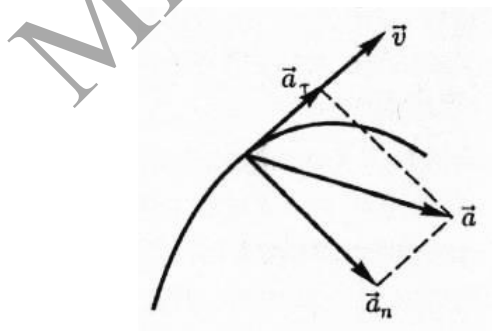
Плоское движение материальной точки

a_τ – тангенциальное (касательное) ускорение, характеризует быстроту изменения скорости по величине, направлено по касательной к траектории:

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt};$$

a_n – нормальное (центростремительное) ускорение, характеризует быстроту изменения скорости по направлению, направлено к центру кривизны траектории:

$$a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}.$$



Полное ускорение

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

Виды движения в кинематике

Прямолинейное равномерное движение:

$$a_n = 0, a_\tau = 0$$

$$v = \frac{dr}{dt} = \text{const},$$

$$r = r_0 + vt, x = x_0 + v_x t, s = \Delta r = vt.$$

Прямолинейное равнопеременное (равноускоренное) движение:

$$a_n = 0, a_\tau = \text{const} \neq 0$$

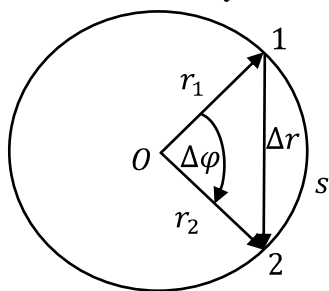
$$v = v_0 + at, v_x = v_{0x} + a_x t,$$

$$r = r_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2},$$

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}, s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Криволинейное равномерное движение:

$$a_n = \text{const} \neq 0, a_\tau = 0$$



r – радиус-вектор,
 $\Delta\varphi$ – угол поворота радиус-вектора за время Δt .

Угловая скорость равномерного вращения

Отношение угла поворота радиус-вектора ко времени, за которое этот поворот совершается:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi - \varphi_0}{\Delta t}, \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu,$$

$$\omega = \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Кинематическое уравнение криволинейного равномерного движения

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t.$$

Период вращения

Время, за которое точка совершает один полный оборот, то есть ее радиус-вектор поворачивается на угол 2π :

$$T = \frac{\Delta t}{N} = \frac{2\pi}{\omega}, T = \text{с}.$$

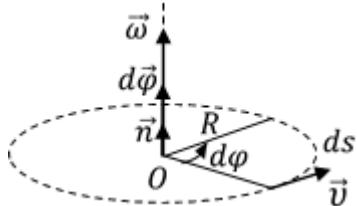
Частота вращения

Число полных оборотов, совершаемых телом при равномерном движении по окружности за единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t} = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \quad \nu = \text{с}^{-1}.$$

Криволинейное равнопеременное движение:

$$a_n = \text{const} \neq 0, a_\tau = \text{const} \neq 0$$



Правило правого винта

R – радиус окружности,
 $d\varphi$ – угловое перемещение.
 Направление $d\varphi$ – по правилу правого винта.

Если вращать правый винт в направлении вращательного движения точки, то его поступательное движение укажет направление вектора углового перемещения.

Средняя угловая скорость

Характеризует вращение за некоторый промежуток времени, численно равна отношению угла поворота радиус-вектора к интервалу времени, за который произошел этот поворот:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}.$$

Мгновенная угловая скорость

Векторная физическая величина, характеризует вращение в данный момент времени, численно равна пределу отношения угла поворота радиус-вектора к интервалу времени Δt , за который произошел этот поворот, при условии, что Δt стремится к нулю, т. е. производной угла поворота по времени:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}, \quad \omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} n.$$

Направление ω – по правилу правого винта.

Среднее угловое ускорение

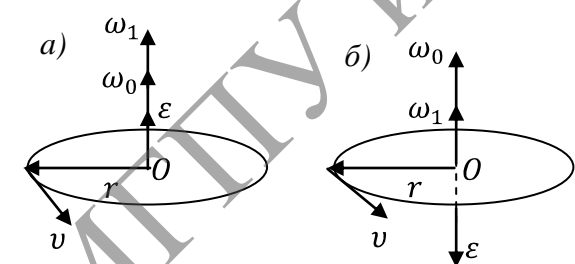
Векторная физическая величина, характеризует изменение вектора угловой скорости за некоторый интервал времени, численно равна отношению изменения угловой скорости ко времени, за который произошло это изменение:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad \varepsilon \uparrow \Delta\omega, \quad \varepsilon = \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Мгновенное угловое ускорение

Векторная физическая величина, характеризует изменение угловой скорости в данный момент времени, численно равна пределу отношения изменения угловой скорости к интервалу времени Δt , за который произошло это изменение, при условии, что Δt стремится к нулю, т.е. производной угловой скорости по времени, или второй производной угла поворота по времени:

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}.$$



При ускоренном движении $\varepsilon \uparrow \omega$ (рисунок а), при замедленном движении $\varepsilon \downarrow \omega$ (рисунок б).

Кинематическое уравнение криволинейного равнопеременного движения

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}, \quad \omega = \omega_0 \pm \varepsilon t.$$

Связь линейных и угловых величин

Линейные величины	Угловые величины	Связь
Δr	$\Delta \varphi$	$\Delta r = \Delta \varphi R$
$v = \frac{dr}{dt}$	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	$v = \omega R$
$a_\tau = \frac{dv}{dt}$	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$	$a_\tau = \varepsilon R$
$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ $v_x = v_{0x} + a_x t$	$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}$ $\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t$	

МГТУ им. И.П.Шамякина

ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

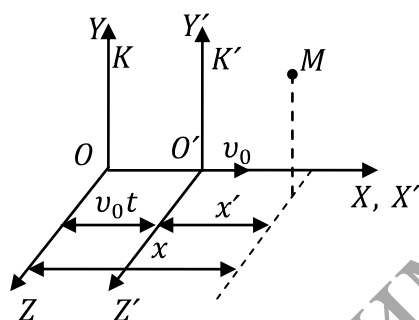
*Первый закон Ньютона
(закон инерции)*

Всякая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока на нее не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано.

Инерциальные системы отсчета

- *гелиоцентрическая*: центр совмещен с Солнцем, а оси направлены на соответствующим образом выбранные звезды;
- *геоцентрическая*: центр совпадает с центром Земли, одна из координатных осей совмещена с земной осью, а две другие расположены взаимно перпендикулярно в экваториальной плоскости.

Преобразования Галилея



$$x = x' + v_0 t', y = y', z = z', t = t';$$

$$v_x = v'_x + v_0, v_y = v'_y, v_z = v'_z;$$

$$v = v' + v_0, a = a'.$$

v – скорость тела относительно системы K ,
 v' – скорость тела относительно системы K' ,
 v_0 – скорость системы K' относительно системы K .

Масса

Физическая скалярная величина, определяющая механическую реакцию тела на действие силы и являющаяся мерой инертных и гравитационных свойств тела.

Сила

Векторная физическая величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры.

В каждый момент времени характеризуется:

- модулем (числовым значением),
- направлением в пространстве,
- точкой приложения.

Равнодействующая сила

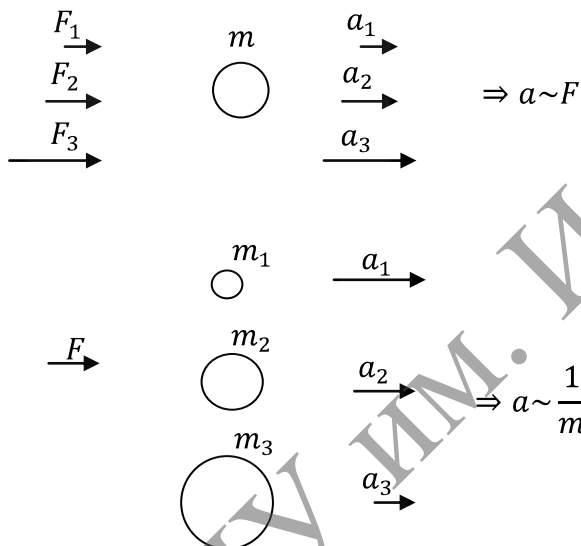
$$F = \sum_{i=1}^n F_i$$

Импульс материальной точки (тела)

Векторная физическая величина, характеризует механическое состояние материальной точки (тела) при поступательном движении, совпадает по направлению с вектором скорости, численно равна произведению массы точки (тела) на ее скорость:

$$p = mv, \quad p = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

Второй закон Ньютона



Ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом) под действием силы, прямо пропорционально этой силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела):

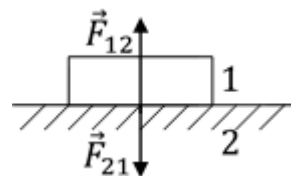
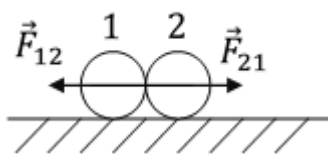
$$a = \frac{F}{m}, \quad F = \sum_{i=1}^n F_i = ma$$

$$a = \frac{dv}{dt} \Rightarrow F = m \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dt}$$

Скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на нее силе.

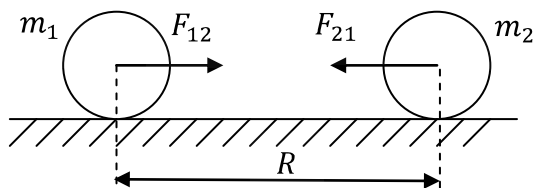
Третий закон Ньютона

$$F_{12} = -F_{21}$$



Силы приложены к разным телам, поэтому не компенсируют друг друга.

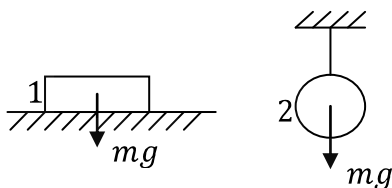
Закон всемирного тяготения



$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2},$$

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ – гравитационная постоянная.

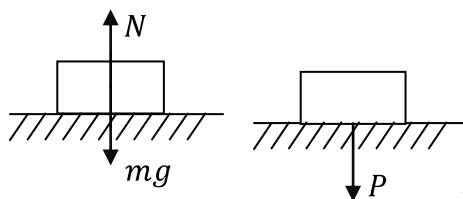
Сила тяжести



$$F_T = mg,$$

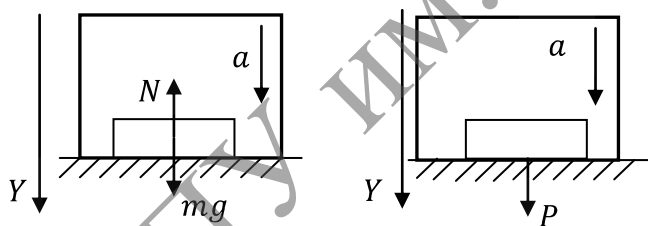
$$g = G \frac{M}{R^2}.$$

Вес тела



$$P = -N, P = -F_H.$$

Невесомость

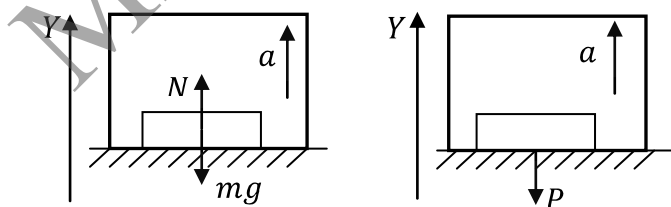


$$P = m g - a ,$$

$$P = m g - a ,$$

$$a = g \Rightarrow P = 0.$$

Перегрузка

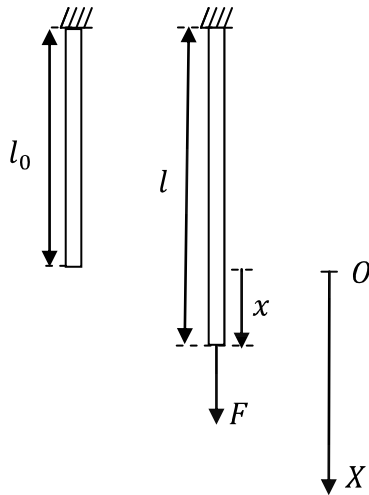


$$P = m g - a ,$$

$$P = m g + a ,$$

$$n = \frac{P}{mg} = \frac{m g + a}{m g} = 1 + \frac{a}{g}.$$

Сила упругости

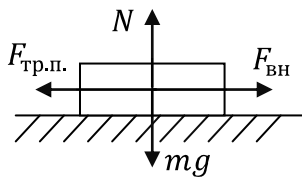


$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

$$OX: F_{\text{упр}} = kx = k\Delta l,$$

$$\Delta l = l - l_0.$$

Сила трения



$$F_{\text{тр.п.}} = F_{\text{вн}} \text{ при } v = 0,$$

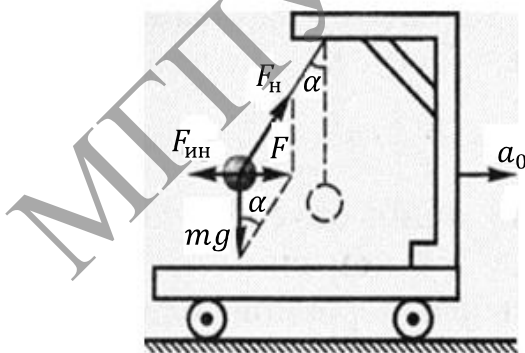
$$0 \leq F_{\text{тр.п.}} \leq F_{\text{тр.п. max}},$$

$$F_{\text{тр.п. max}} = \mu N.$$

Сила инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета

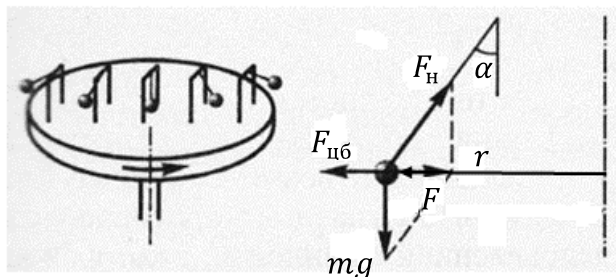
$$\text{tg } \alpha = \frac{a_0}{g},$$

$$F_{\text{ин}} = -ma_0.$$



Пример – внезапное торможение, резкое начало движения.

Центробежная сила инерции

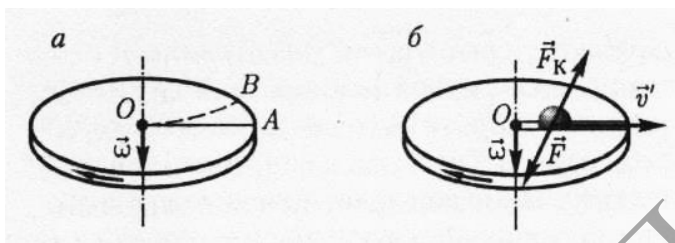


$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega^2 r}{g},$$

$$F_{\text{цб}} = -ma_n, F_{\text{цб}} = m\omega^2 r.$$

Пример – движение на повороте, на карусели.

Сила Кориолиса



$$v' = \text{const}, \omega = \text{const},$$

$$v' \perp \omega;$$

$$F_K = 2m v' \omega .$$

Основной закон динамики для неинерциальных систем отсчета (НИСО)

$$ma' = F + F_{\text{ин}} + F_{\text{ц}} + F_K.$$

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Закон сохранения импульса

Полный импульс замкнутой системы тел остается постоянным во все время движения:

$$\frac{dp}{dt} = 0 \Rightarrow p = \text{const.}$$

Центр масс (центр инерции) системы материальных точек

$$r_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i r_i}{m}, v_c = \frac{dr_c}{dt},$$

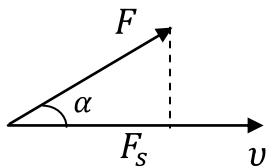
$$v_c = \text{const.}$$

Уравнение движения тела переменной массы (уравнение И. В. Мещерского)

$$ma = F + F_p,$$

$$F_p = -u \frac{dm}{dt}.$$

Работа постоянной силы

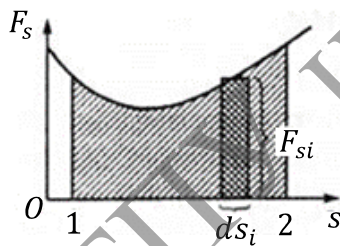


$$\delta A = F dr = F dr \cos \alpha,$$

$$\delta A = F ds \cos \alpha = F_s ds,$$

$$A = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж.}$$

Работа переменной силы



$$\delta A_i = F_{si} ds_i,$$

$$A_{12} = \int_1^2 F_s ds = \int_1^2 F dr.$$

Мощность

$$P = \frac{\delta A}{dt} = \frac{F dr}{dt} = Fv, P = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ Вт.}$$

Энергия

Универсальная мера различных форм движения и взаимодействия.

Кинетическая энергия

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

Теорема об изменении кинетической энергии

Работа силы при перемещении материальной точки равна приращению кинетической энергии этой точки:

$$A_{12} = E_{к2} - E_{к1}.$$

Потенциальная энергия

Механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.

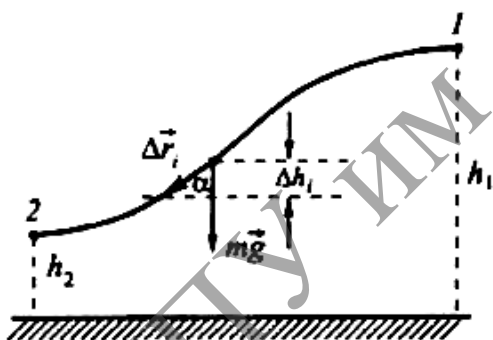
Работа консервативных сил

Работа консервативных сил при перемещении тела из начального положения в конечное равна разности потенциальных энергий между начальным и конечным положениями тела:

$$A_{конс} = E_{п1} - E_{п2} = -\Delta E_{п}.$$

Работа консервативных сил по замкнутой траектории равна нулю.

Работа силы тяжести

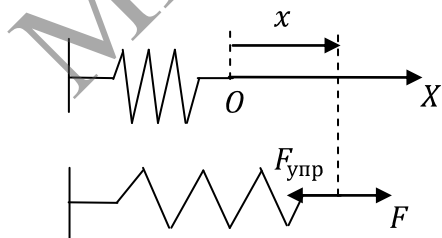


$$A_{12} = mgh_1 - mgh_2,$$

$$A_{12} = E_{п1} - E_{п2} \Rightarrow E_{п} = mgh.$$

Сила тяжести – консервативная сила.

Работа силы упругости



$$A_{12} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2},$$

$$A_{12} = E_{п1} - E_{п2} \Rightarrow E_{п} = \frac{kx^2}{2}.$$

Сила упругости – консервативная сила.

Полная механическая энергия

$$E = E_{к} + E_{п}.$$

Закон сохранения энергии

В системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется:

$$\Delta E = \Delta E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{п}} = 0,$$

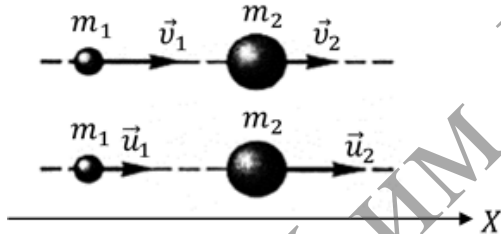
$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const.}$$

В системе тел, в которой действуют также диссипативные силы, полная механическая энергия не сохраняется, она постепенно уменьшается за счет преобразования в другие (немеханические) формы энергии; изменение полной механической энергии равно работе диссипативных сил:

$$\Delta E = \Delta E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{п}} = A_{\text{дисс.}}$$

Энергия никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой.

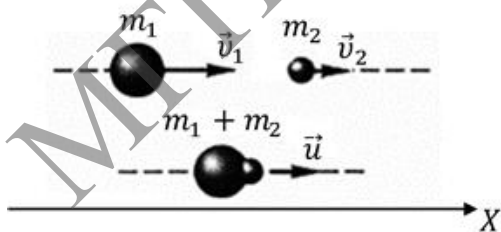
Абсолютно упругий удар



$$OX: m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2,$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}.$$

Абсолютно неупругий удар



$$OX: m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u,$$

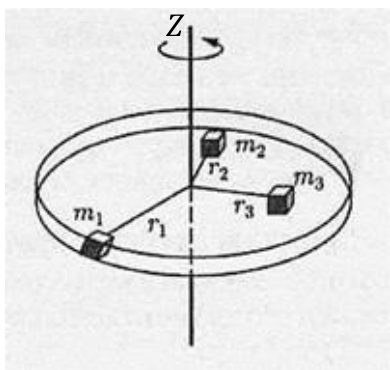
$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

ДИНАМИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Момент инерции материальной точки относительно центра вращения

$$I = mr^2, \quad I = \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции системы (тела) относительно оси вращения

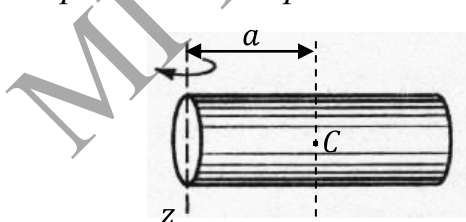


$$I_z = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

Значения моментов инерции для некоторых тел

Тело	Положение оси	Момент инерции
Полый тонкостенный цилиндр радиуса R	Ось симметрии	$I = mR^2$
Сплошной цилиндр или диск радиуса R	Ось симметрии	$I = \frac{1}{2}mR^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину	$I = \frac{1}{12}ml^2$
Шар радиуса R	Ось проходит через центр шара	$I = \frac{2}{5}mR^2$

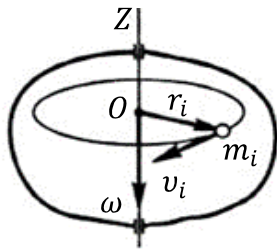
Теорема Штейнера



Момент инерции тела относительно произвольной оси равен сумме момента инерции относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр масс C тела, и произведения массы тела на квадрат расстояния a между осями:

$$I_z = I_C + ma^2.$$

Кинетическая энергия вращающегося тела



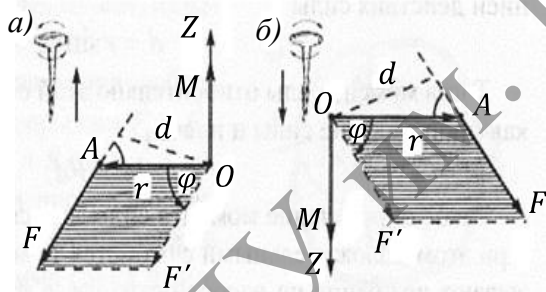
$$E_{\text{к вр}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2} = \frac{I_z \omega^2}{2}.$$

Полная кинетическая энергия твердого тела

$$E_{\text{к}} = \frac{m v_c^2}{2} + \frac{I_c \omega^2}{2},$$

v_c – скорость поступательного движения центра масс,
 I_c – момент инерции тела относительно оси вращения, проходящей через центр масс,
 ω – угловая скорость вращения тела относительно той же оси.

Момент силы относительно неподвижной точки O

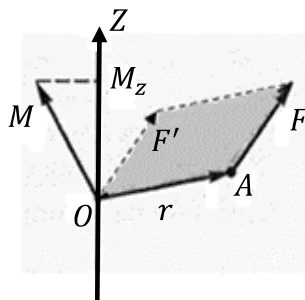


Векторная физическая величина, определяемая векторным произведением радиус-вектора, проведенного из точки O в точку A приложения силы, на силу F:

$$M = r F, M = Fr \sin \varphi = Fd,$$

φ – угол между векторами r и F ,
 $r \sin \varphi = d$ – плечо силы – кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой O.

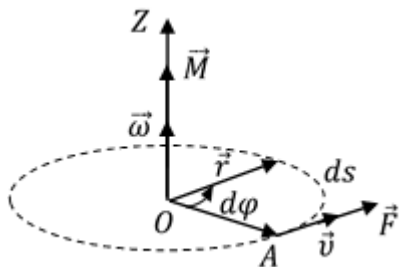
Момент силы относительно неподвижной оси



Скалярная физическая величина, равная проекции на данную ось вектора момента силы, определенного относительно произвольной точки O данной оси Z:

$$M_z = r F_z.$$

Работа при вращении тела



$$dA = M_Z d\varphi.$$

Основной закон динамики вращательного движения твердого тела

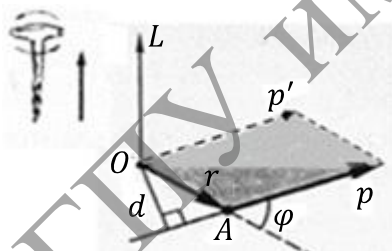
Момент силы относительно неподвижной оси равен произведению момента инерции относительно той же оси и углового ускорения:

$$M_Z = I_Z \varepsilon, M = I \varepsilon.$$

Производная момента импульса твердого тела относительно неподвижной оси равна моменту сил относительно той же оси:

$$M_Z = \frac{dL_Z}{dt}, M = \frac{dL}{dt}.$$

Момент импульса относительно неподвижной точки O



Векторная физическая величина, численно равная векторному произведению радиус-вектора точки на вектор ее импульса:

$$L = r p = r m v, L = p r \sin\varphi = p d, r \sin\varphi = d - \text{плечо вектора } p.$$

Момент импульса относительно неподвижной оси

Скалярная физическая величина L_Z , равная проекции на данную ось вектора момента импульса, определенного относительно произвольной точки O данной оси:

$$L_Z = r p_z,$$

$$L_Z = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i = \sum_{i=1}^n m_i \omega r_i^2 = I_Z \omega.$$

Закон сохранения момента импульса

Момент импульса замкнутой системы не изменяется с течением времени:

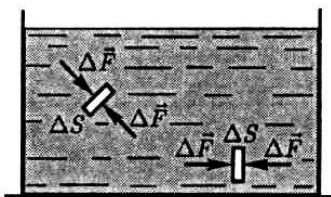
$$\frac{dL}{dt} = 0 \Rightarrow L = \text{const}, I\omega = \text{const}.$$

Сопоставление основных величин и соотношений для поступательного и вращательного движений тела

Поступательное движение	Вращательное движение
Масса m	Момент инерции I
Перемещение dr	Угловое перемещение $d\varphi$
Скорость $v = \frac{dr}{dt}$	Угловая скорость $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
Ускорение $a = \frac{dv}{dt}$	Угловое ускорение $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$
Сила F	Момент силы M
Импульс $p = mv$	Момент импульса $L = I\omega$
Основное уравнение динамики	
$F = ma, F = \frac{dp}{dt}$	$M = I\varepsilon, M = \frac{dL}{dt}$
Работа	
$dA = F_s ds$	$dA = M_z d\varphi$
Кинетическая энергия	
$E_k = \frac{mv^2}{2}$	$E_{k \text{ вр}} = \frac{I_z \omega^2}{2}$

МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Давление жидкости (газа)



Скалярная физическая величина, определяемая нормальной силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади:

$$p = \frac{\Delta F_n}{\Delta S}, \quad p = \frac{1\text{Н}}{1\text{ м}^2} = 1\text{ Па.}$$

Закон Паскаля

Давление в любом месте покоящейся жидкости одинаково по всем направлениям, причем давление одинаково передается по всему объему, занятому покоящейся жидкостью.

Гидростатическое давление

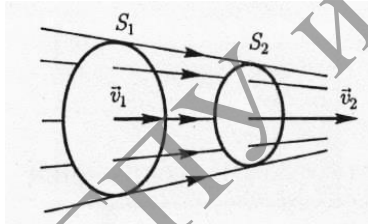
$$p = \rho gh.$$

Закон Архимеда

На тело, погруженное в жидкость, действует со стороны этой жидкости выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости:

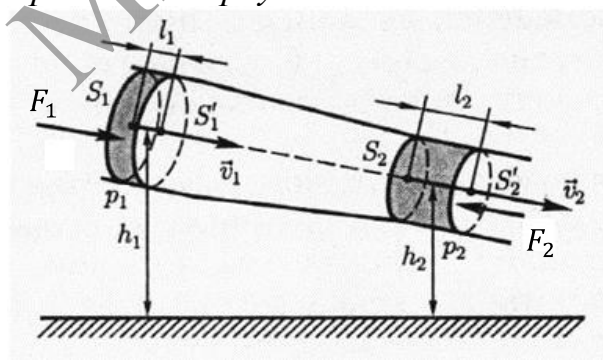
$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{погр.}}$$

Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости



$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \text{ или } Sv = \text{const.}$$

Уравнение Бернулли



$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const.},$$

$\frac{\rho v^2}{2}$ – динамическое давление,

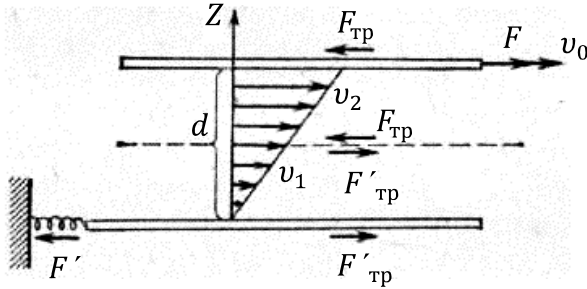
ρgh – гидростатическое давление,

p – давление, обусловленное внешними силами.

Вязкость

Свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

Сила внутреннего трения



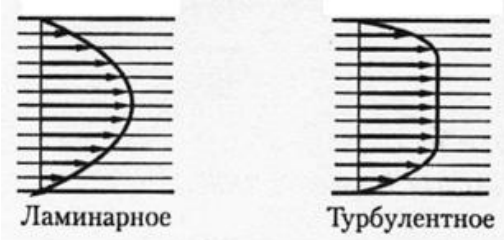
$$F_{\text{тр}} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta z} S,$$

η – динамическая вязкость (Па · с),

$\frac{\Delta v}{\Delta z}$ – градиент скорости,

S – площадь поверхности касания слоев.

Режимы течения жидкости



Течение называется *ламинарным (слоистым)*, если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними.

Течение называется *турбулентным (вихревым)*, если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (частицы жидкости переходят из слоя в слой).

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} = \frac{v d}{\nu},$$

$\nu = \frac{\eta}{\rho}$ – кинематическая вязкость,

ρ – плотность жидкости,

v – средняя по сечению трубы скорость жидкости,

d – характерный линейный размер (диаметр трубы).

Формула Стокса

$$F_c = 6\pi\eta v.$$

Формула Пуазейля

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{p_1 - p_2}{l} t.$$

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Гармонические колебания Периодически повторяющиеся процессы, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону косинуса или синуса:

$$x = A \cos \omega_0 t + \varphi_0 .$$

Амплитуда колебания A Наибольшее отклонение колеблющейся точки от положения равновесия.

Период колебаний Время, за которое совершается полное колебание:

$$T = \frac{t}{N}, T = c.$$

Частота колебаний Число полных колебаний за единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}, \nu = \frac{1}{c} = c^{-1}.$$

Циклическая (круговая) частота колебания ω_0 Число полных колебаний за 2π секунд:

$$\omega_0 = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}, \omega_0 = \frac{\text{рад}}{c}.$$

Фаза колебания $\omega_0 t + \varphi_0$ Аргумент периодической функции, определяющий значение физической величины в любой момент времени.

Начальная фаза колебания φ_0 Определяет состояние колебательной системы в начальный момент времени.

Скорость колеблющейся точки

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin \omega_0 t + \varphi_0 = \\ &= A\omega_0 \cos \omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}, \end{aligned}$$

$v_0 = A\omega_0$ – амплитуда скорости.

Ускорение колеблющейся точки

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -A\omega_0^2 \cos \omega_0 t + \varphi_0 =$$

$$= A\omega_0^2 \cos \omega_0 t + \varphi_0 + \pi ,$$

$a_0 = A\omega_0^2$ – амплитуда ускорения.

Дифференциальное уравнение гармонического колебания

$$a_x + \omega_0^2 x = 0,$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0.$$

Квазиупругая сила

$$F_x = ma_x = -m\omega_0^2 x, \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Кинетическая энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания

$$E_k = \frac{mv_x^2}{2} = \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2 \sin^2 \omega_0 t + \varphi_0 .$$

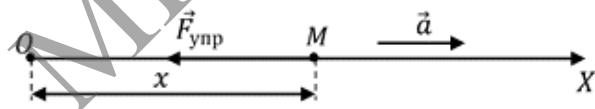
Потенциальная энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания

$$E_n = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2 \cos^2 \omega_0 t + \varphi_0 .$$

Полная энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания

$$E = E_k + E_n = \frac{mA^2 \omega_0^2}{2}.$$

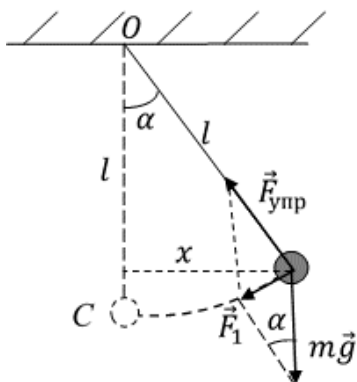
Пружинный маятник



$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0,$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

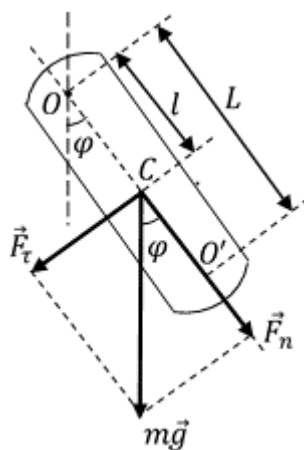
Математический маятник



$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{g}{l}x = 0,$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}, T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Физический маятник

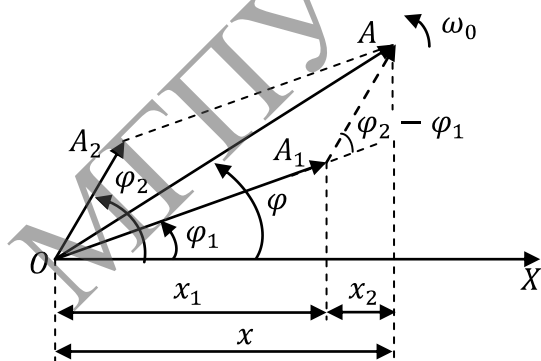


$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{mgl}{I}\varphi = 0,$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{I}}, T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

$L = \frac{I}{ml}$ — приведенная длина физического маятника.

Сложение гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты



$$\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0.$$

$$x_1 = A_1 \cos \omega_0 t + \varphi_1,$$

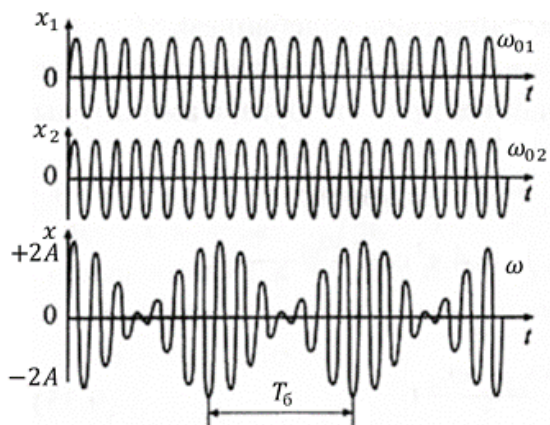
$$x_2 = A_2 \cos \omega_0 t + \varphi_2,$$

$$x = x_1 + x_2 = A \cos \omega_0 t + \varphi,$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi_2 - \varphi_1,$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

Сложение гармонических колебаний одного направления и различной частоты



$$\omega_{01} = \omega, \omega_{02} = \omega + \Delta\omega, \Delta\omega \ll \omega.$$

$$x_1 = A \cos \omega t, x_2 = A \cos \omega + \Delta\omega t,$$

$$A_{\text{рез}} = 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t,$$

$$x = 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \cos \omega t,$$

$$T_6 = \frac{2\pi}{\Delta\omega} = \frac{2\pi}{\omega_{02} - \omega_{01}},$$

$$v_6 = \frac{1}{T_6} = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{\omega_{02} - \omega_{01}}{2\pi} = v_2 - v_1.$$

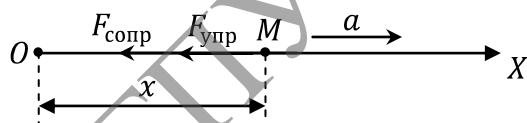
Сложение взаимно перпендикулярных колебаний

$$x = A \cos \omega t, y = B \cos \omega t + \varphi,$$

φ – разность фаз обоих колебаний, A и B – амплитуды складываемых колебаний.

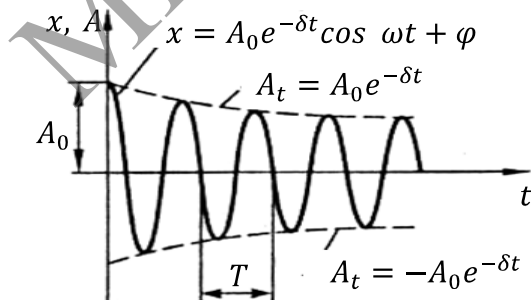
$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - 2 \frac{xy}{AB} \cos \varphi = \sin^2 \varphi.$$

Затухающие колебания



$$F_{\text{упр}} = kx, F_{\text{сопр}} = rv,$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0.$$



$$x = A_0 e^{-\delta t} \cos \omega t + \varphi,$$

A_0 – начальная амплитуда,

$\delta = \frac{r}{2m}$ – коэффициент затухания,

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ – частота затухающих колебаний.

Коэффициент затухания

Физическая величина, обратная промежутку времени, за который амплитуда колебаний уменьшится в e раз.

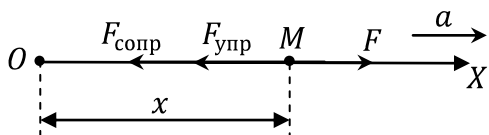
Период затухающих колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega_0^2 - \delta^2}$$

Логарифмический декремент затухания

$$\theta = \ln \frac{A t}{A t + T} = \ln e^{\delta T} = \delta T.$$

Вынужденные колебания



$$F = F_0 \cos \omega t,$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t,$$

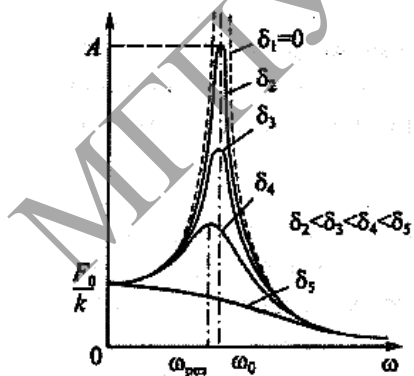
$$\frac{r}{m} = 2\delta, \frac{k}{m} = \omega_0^2, \frac{F_0}{m} = f_0,$$

$$x = A \omega \cos \omega t + \varphi_0 \omega .$$

Амплитудно-частотная характеристика вынужденных колебаний

$$A \omega = \frac{F_0}{m \sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}^2 + 4\delta^2 \omega^2}$$

Резонанс



Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы с частотой собственных колебаний системы:

$$\omega_{\text{рез}} = \omega_0^2 - 2\delta^2, \delta \ll \omega_0 \Rightarrow \omega_{\text{рез}} = \omega_0,$$

$$A_{\text{рез}} = \frac{F_0}{2\delta m \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}$$

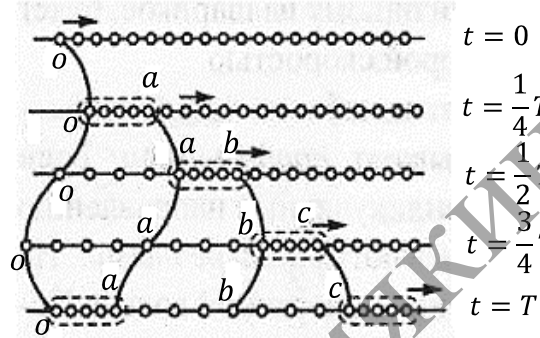
УПРУГИЕ ВОЛНЫ

Волна

Процесс распространения колебательного движения в среде.

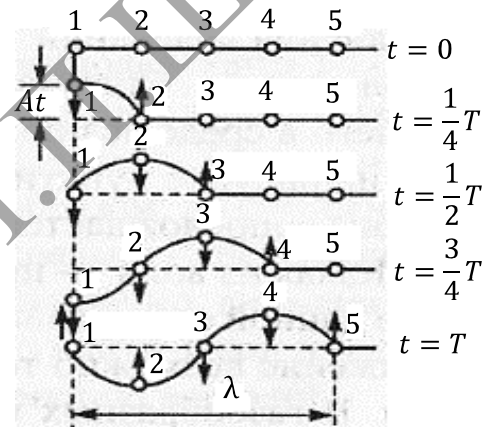
Продольная волна

Частицы среды колеблются в направлении распространения волны:



Поперечная волна

Частицы среды колеблются в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны:

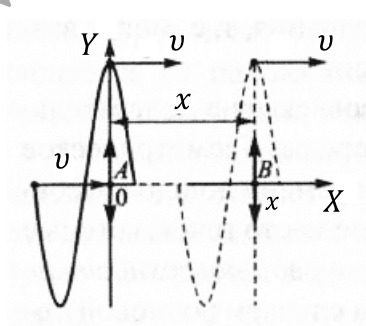


Длина волны

$$\lambda = vT,$$

v – скорость волны (скорость распространения колебаний от одной точки среды к другой),
 T – период колебаний частиц среды.

Уравнение плоской волны

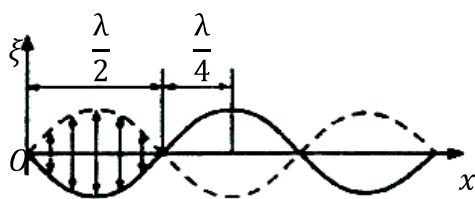


$$\xi = A \cos \omega t - kx + \varphi_0 ,$$

$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} x$ – начальная фаза колебаний в данной точке,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ – волновое число.}$$

Уравнение стоячей волны



Волна, возникающая при интерференции двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой:

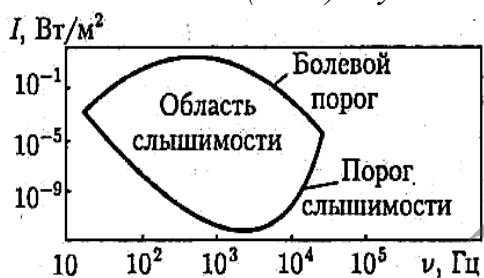
$$\xi = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t,$$

$$A_{\text{ст}} = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} .$$

Звуковые волны

Распространяющиеся в среде упругие волны, обладающие частотами в пределах 16 Гц – 20000 Гц; $\nu < 16$ Гц – инфразвук, $\nu > 20$ кГц – ультразвук.

Интенсивность (сила) звука



$$I = \frac{W}{\Delta S_{\perp} \Delta t}, \quad I = \frac{W}{\text{м}^2}.$$

Громкость звука

$$L = \lg \frac{I}{I_0}, \quad L = \text{Б}.$$

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad L = \text{дБ}.$$

$I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ – интенсивность звука на пороге слышимости.

Эффект Доплера

Изменение частоты колебаний, воспринимаемой приемником, при движении источника этих колебаний и приемника относительно друг друга:

$$\nu = \frac{v \pm v_{\text{пр}}}{v \mp v_{\text{ист}}} \nu_0.$$

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ (МКТ) ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

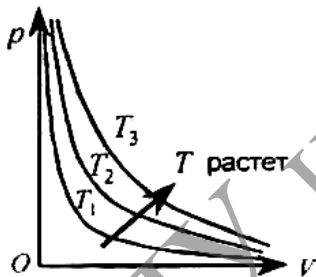
Основные положения МКТ

- все вещества состоят из отдельных частиц – молекул, которые, в свою очередь, состоят из атомов,
- между молекулами тела одновременно действуют силы взаимного притяжения и отталкивания,
- молекулы, образующие тело, находятся в состоянии непрерывного беспорядочного движения.

Модель идеального газа

- собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда,
- между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия,
- столкновение молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

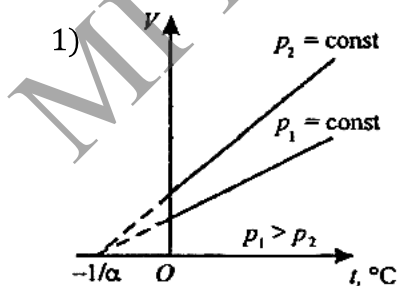
Закон Бойля-Мариотта



$m = const, T = const$ (изотермический процесс)

$$pV = const \Rightarrow p \sim \frac{1}{V}$$

Законы Гей-Люссака

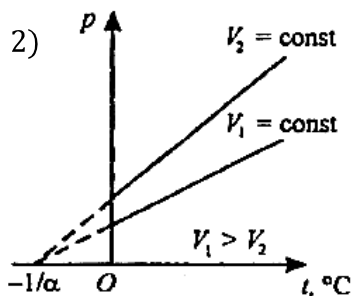


$m = const, p = const$ (изобарный процесс)

$$V = V_0 (1 + \alpha t)$$

$$t = -\frac{1}{\alpha} = -273^\circ\text{C}, T = t + \frac{1}{\alpha}$$

$$\frac{V}{T} = const \Rightarrow V \sim T$$



$m = const, V = const$ (изохорный процесс)

$$p = p_0 (1 + \alpha t)$$

$$\frac{p}{T} = const \Rightarrow p \sim T.$$

Закон Авогадро

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1},$$

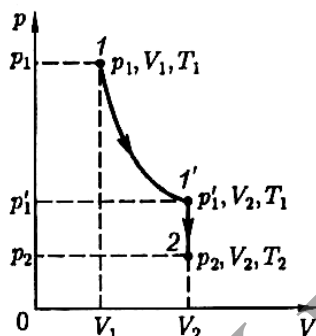
$$V_M = 22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$$

Закон Дальтона

Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n.$$

Уравнение Клапейрона



$$\frac{pV}{T} = B = const.$$

Уравнение Клапейрона-Менделеева (уравнение состояния идеального газа)

$$pV_M = RT, pV = \frac{m}{M} RT,$$

$$R = \frac{p_0 V_M}{T_0} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

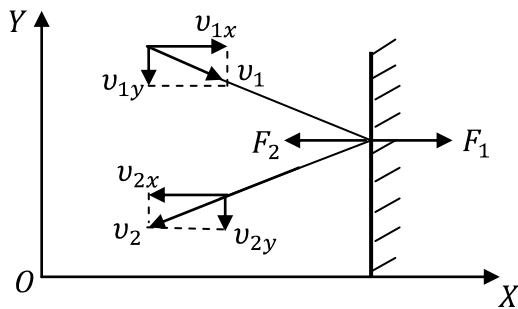
$$p = nkT.$$

Число Лошмидта

Число молекул, содержащихся в 1 м^3 газа при нормальных условиях:

$$N_L = \frac{p_0}{kT_0} = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Основное уравнение МКТ
идеальных газов



$$p = \frac{1}{3} m_0 n v^2 ,$$

$$p = \frac{2}{3} n E_k .$$

Кинетическая энергия
поступательного
движения молекулы

$$E_k = \frac{m_0 v^2}{2}$$

$$E_k = \frac{3}{2} kT .$$

Средняя квадратичная
скорость поступательного
движения молекулы

$$v_{кв} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} .$$

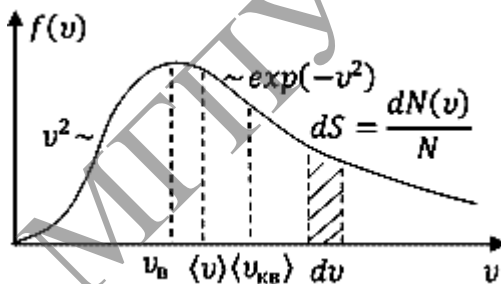
Закон Максвелла о
распределении молекул
идеального газа по
скоростям

$$f(v) = 4\pi \frac{m_0}{2\pi kT}^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left(-\frac{m_0 v^2}{2kT} \right) ,$$

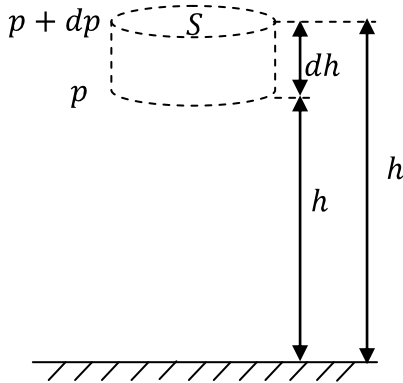
$$v_B = \frac{2kT}{m_0} = \frac{2RT}{M} ,$$

$$v = \frac{8kT}{\pi m_0} = \frac{8RT}{\pi M} = 1,13 v_B ,$$

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = 1,22 v_B .$$



Барометрическая формула



Представляет собой закон изменения давления с высотой:

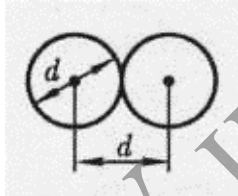
$$p = p_0 \exp -\frac{Mgh}{RT} .$$

Распределение Больцмана для внешнего потенциального поля

При постоянной температуре плотность газа больше там, где меньше потенциальная энергия его молекул:

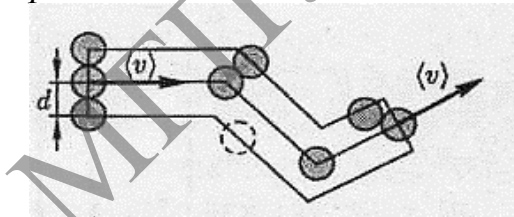
$$n = n_0 \exp -\frac{m_0gh}{kT} = \\ = n_0 \exp -\frac{E_{\text{п}}}{kT} .$$

Эффективный диаметр молекулы



Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул.

Среднее число столкновений



$$z = \bar{2}n\pi d^2 v .$$

Средняя длина свободного пробега молекулы

Путь, который проходят молекулы между двумя последовательными столкновениями:

$$l = \frac{1}{\bar{2}n\pi d^2} .$$

ТЕРМОДИНАМИКА

Число степеней свободы механической системы

Число независимых координат, определяющих ее положение и конфигурацию в пространстве.

Число степеней свободы	Одноатомный газ	Двухатомный газ	Многоатомный газ
			
Поступательных	3	3	3
Вращательных	-	2	3
Всего	3	5	6

Средняя кинетическая энергия молекулы идеального газа

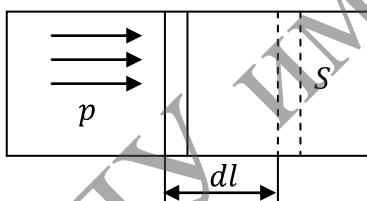
$$E_k = \frac{i}{2} kT.$$

Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT,$$

$$dU = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R dT.$$

Работа в термодинамике



$$\delta A = F dl = p S dl = p dV,$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

Теплоемкость

$$C = \frac{\delta Q}{dT}, \quad C = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Удельная теплоемкость

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}, \quad c = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Молярная теплоемкость

$$C_M = \frac{\delta Q}{\nu dT}, \quad C_M = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}},$$

$$C_M = cM.$$

Количество теплоты

$$\delta Q = C_M v dT = \frac{m}{M} C_M dT.$$

Первое начало термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A.$$

Применение первого начала термодинамики к различным процессам

Изохорный процесс ($V = \text{const}$)

$$\delta Q = dU,$$

$$\frac{m}{M} C_V dT = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R dT, C_V = \frac{i}{2} R.$$

Изобарный процесс ($p = \text{const}$)

$$\delta Q = dU + \delta A,$$

$$\frac{m}{M} C_p dT = \frac{m}{M} C_V dT + \frac{m}{M} R dT,$$

$$C_p = C_V + R = \frac{i+2}{2} R$$

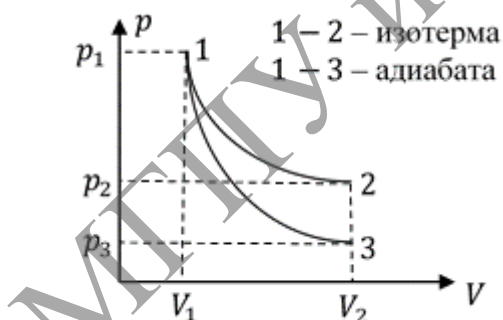
соотношение Майера.

Изотермический процесс
($T = \text{const}$)

$$\delta Q = \delta A,$$

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Адиабатный процесс



Процесс, при котором отсутствует теплообмен между системой и окружающей средой: $\delta Q = 0$.

$$\delta A = -dU.$$

$$pV^\gamma = \text{const},$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}, T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const},$$

$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}$ – показатель адиабаты (коэффициент Пуассона).

$$A = -\frac{m}{M} C_V \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2),$$

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left(1 - \frac{V_1^{\gamma-1}}{V_2^{\gamma-1}} \right).$$

Политропный процесс

Всякий процесс изменения состояния, при котором теплоемкость остается постоянной:

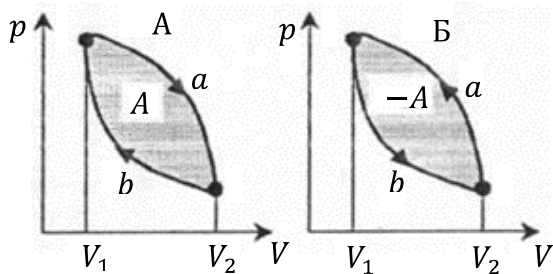
$$C = \frac{\delta Q}{dT} = const,$$

$$pV^n = const,$$

$n = \frac{c-c_p}{c-c_v}$ – показатель политропы,

C – теплоемкость газа в данном процессе.

Круговой процесс (цикл)



Процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное состояние.

Рисунок А – прямой цикл (протекает по часовой стрелке), рисунок Б – обратный цикл (протекает против часовой стрелки).

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

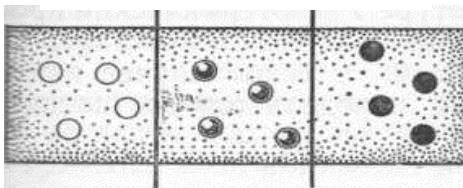
Энтропия

Функция состояния, полным дифференциалом которой является приведенное количество теплоты:

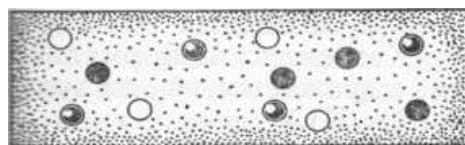
$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \quad dS = \frac{Дж}{К}.$$

Энтропия – мера неупорядоченности системы.

а) Низкая энтропия



б) Высокая энтропия



Изменение энтропии

$$\Delta S_{1-2} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU}{T} + \int_1^2 \frac{\delta A}{T},$$

$$\Delta S_{1-2} = \frac{m}{M} C_V \int_1^2 \frac{dT}{T} + \frac{m}{M} R \int_1^2 \frac{dV}{V} =$$

$$= \frac{m}{M} C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Второе начало термодинамики

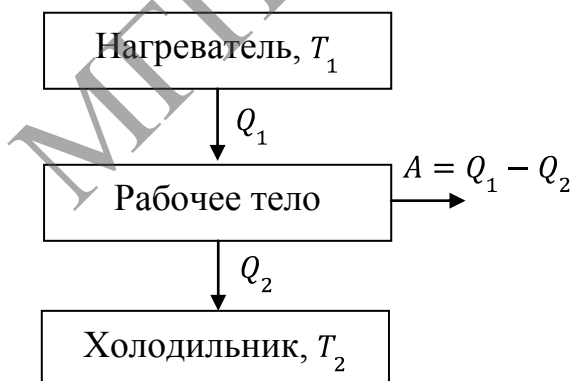
- по Кельвину: невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу;
- по Клаузиусу: невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к телу более нагретому.

Третье начало термодинамики (теорема Нернста-Планка)

Энтропия всех тел в состоянии равновесия стремится к нулю по мере приближения температуры к нулю Кельвина:

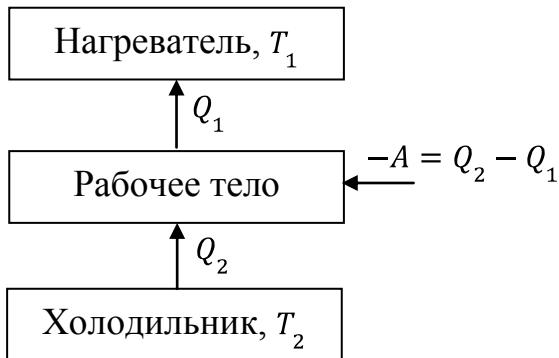
$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0.$$

Тепловой двигатель



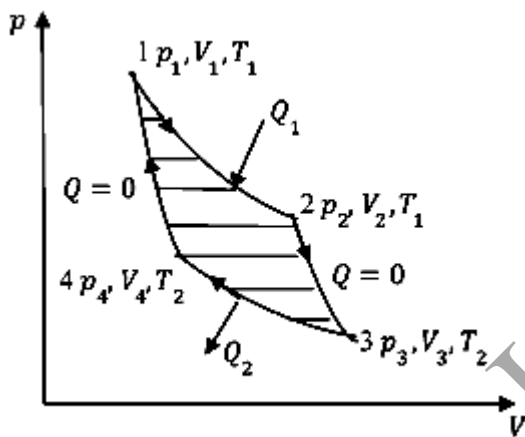
$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Холодильная машина



$$\eta_x = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Цикл Карно



- 1–2 – изотермическое расширение,
- 2–3 – адиабатное расширение,
- 3–4 – изотермическое сжатие,
- 4–1 – адиабатное сжатие.

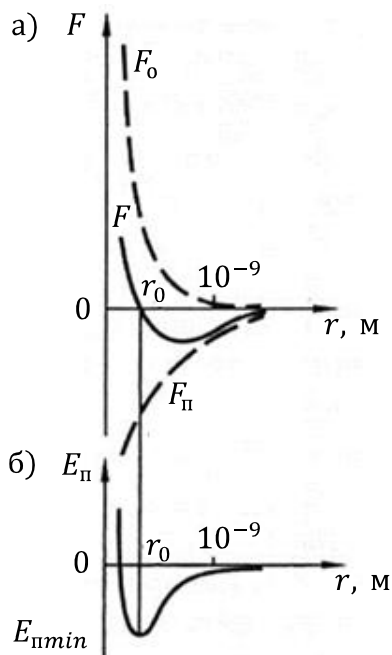
$$\eta_{\text{к}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Реальный газ

Газ, свойства которого зависят от взаимодействия молекул.

Силы и потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия

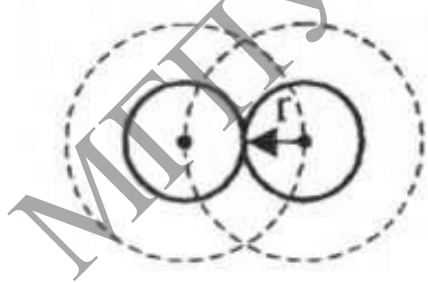


$F_{\text{П}}$ – равнодействующая сил притяжения (преобладают на больших расстояниях, считаются отрицательными),
 F_0 – равнодействующая сил отталкивания (преобладают на малых расстояниях, считаются положительными),
 r_0 – равновесное расстояние между молекулами, на котором бы они находились в отсутствие теплового движения $F = 0$.

$$\delta A = F dr = -dE_{\text{П}}$$

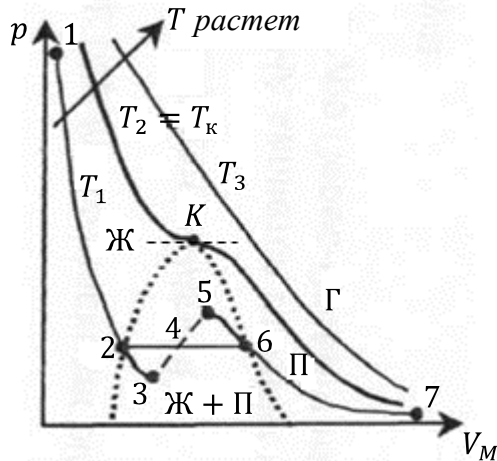
Уравнение Ван-дер-Ваальса (уравнение состояния реального газа)

$$p + \frac{m^2 a}{M^2 V^2} \quad V - \frac{m}{M} b = \frac{m}{M} RT,$$



V – объем всего газа,
 $\frac{m^2 a}{M^2 V^2}$ – давление, обусловленное силами взаимодействия молекул,
 $\frac{m}{M} b$ – объем, связанный с собственным объемом всех молекул,
 a – постоянная, зависящая от природы газа (постоянная Ван-дер-Ваальса), характеризующая силы межмолекулярного притяжения,
 b – объем, занимаемый самими молекулами.

Изотермы реальных газов



K – критическая точка,

$$V_{кр} = 3b, p_{кр} = \frac{a}{27b^2}, T_{кр} = \frac{8a}{27bR}$$

Внутренняя энергия реального газа

Складывается из кинетической энергии теплового движения молекул (определяет внутреннюю энергию идеального газа $C_V T$) и потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия:

$$U_M = C_V T - \frac{a}{V_M}$$

Внутренняя энергия 1 моль реального газа растет с повышением температуры и увеличением объема.

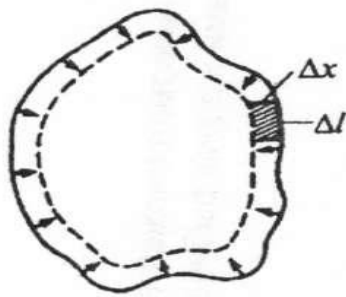
ЖИДКОСТИ

Поверхностная энергия

Дополнительная энергия, которой обладают молекулы в поверхностном слое жидкости:

$$\Delta E = \sigma \Delta S.$$

Силы поверхностного натяжения



Силы, препятствующие увеличению поверхности жидкости, то есть стремящиеся сократить эту поверхность до минимально возможной; направлены по касательной к поверхности жидкости и перпендикулярно участку контура, на который они действуют.

Коэффициент поверхностного натяжения

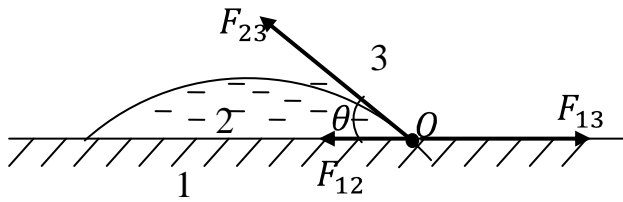
Поверхностная энергия единицы площади этой поверхности:

$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S}, \quad \sigma = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2},$$

Сила поверхностного натяжения, приходящаяся на единицу длины контура, ограничивающего поверхность:

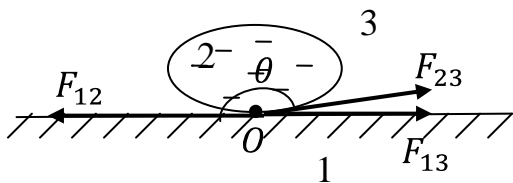
$$\sigma = \frac{F_{\text{п}}}{l}, \quad \sigma = \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Смачивание и несмачивание



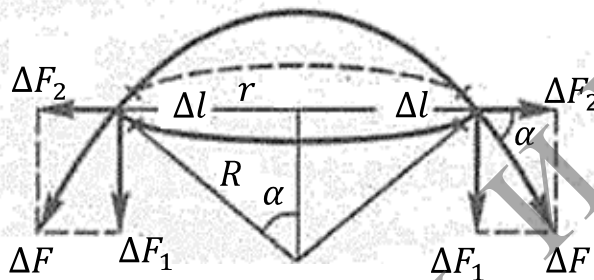
$$\cos\theta = \frac{F_{13} - F_{12}}{F_{23}} = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}},$$

если $\sigma_{13} > \sigma_{12}$, то $\cos\theta > 0$ и угол θ – острый (смачивание),
если $\sigma_{13} > \sigma_{12} + \sigma_{23}$ – полное смачивание $\theta = 0$,



если $\sigma_{13} < \sigma_{12}$, то $\cos\theta < 0$ и угол θ – тупой (несмачивание),
если $\sigma_{12} > \sigma_{13} + \sigma_{23}$ – полное несмачивание $\theta = \pi$.

Формула Лапласа

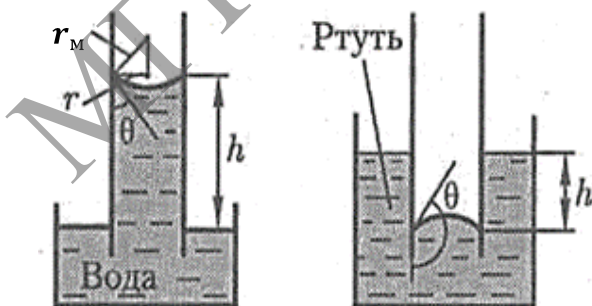


Избыточное (добавочное) давление, обусловленное силами поверхностного натяжения:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости в данной точке. Всегда направлено к центру кривизны поверхности.

Капиллярные явления



Явления изменения высоты уровня жидкости в капиллярах:

$$h = \frac{2\sigma\cos\theta}{\rho gr}.$$

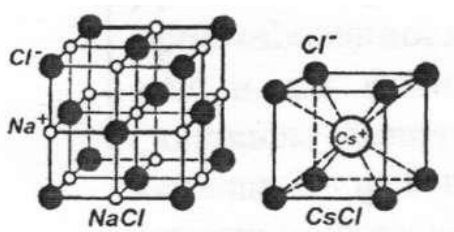
При смачивании $\cos\theta > 0, h > 0$ – жидкость в капилляре поднимается, при несмачивании $\cos\theta < 0, h < 0$ – жидкость в капилляре опускается.

КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

Кристаллические тела

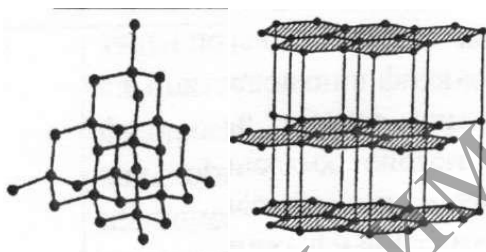
Твердые тела, имеющие упорядоченное, периодически повторяющееся расположение частиц.

Ионные кристаллы



В узлах кристаллической решетки располагаются поочередно ионы противоположного знака. Связь, обусловленная кулоновскими силами притяжения между разноименно заряженными ионами, называется *ионной*.

Атомные кристаллы



В узлах кристаллической решетки располагаются нейтральные атомы, удерживаемые в узлах решетки *ковалентными связями* квантово-механического происхождения (у соседних атомов обобществляются валентные электроны, наименее связанные с атомом). Пример – алмаз и графит.

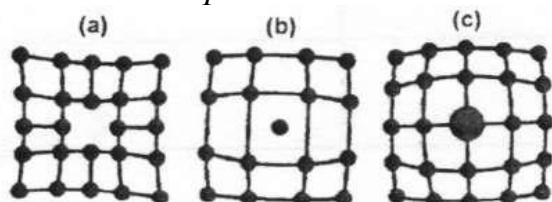
Металлические кристаллы

В узлах кристаллической решетки располагаются положительные ионы металла. При образовании кристаллической решетки валентные электроны, слабо связанные в атомами, отделяются от атомов и коллективизируются: они уже не принадлежат не одному атому, как в случае ионной связи, не паре соседних атомов, как в случае ковалентной связи, а всему кристаллу в целом.

Молекулярные кристаллы

В узлах кристаллической решетки располагаются нейтральные молекулы вещества, силы взаимодействия между которыми обусловлены незначительным взаимным смещением электронов в электронных оболочках атомов (ван-дер-ваальсовы силы). Примеры – органические соединения (парафин), инертные газы Ne, Ar, Kr, Xe , атмосферные газы CO_2, O_2, N_2 в твердом состоянии, лед.

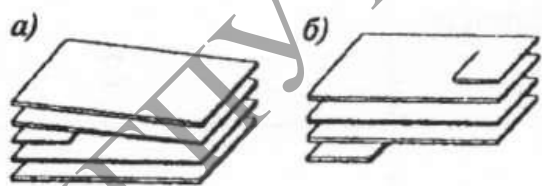
Точечные дефекты



Нарушают только ближний порядок в кристаллах:

вакансия – отсутствие атома в узле кристаллической решетки (а), *междоузельный атом* – атом, внедрившийся в междоузельное пространство (б), *примесный атом* – атом примеси, либо замещающий атом основного вещества в кристаллической решетке (*примесь замещения* (с)), либо внедрившийся в междоузельное пространство (*примесь внедрения*).

Линейные дефекты



Нарушают дальний порядок в кристаллах. Дислокации – линейные дефекты, нарушающие правильное чередование атомных плоскостей: *краевые* – край атомной плоскости, обрывающейся в кристалле (а), *винтовые* – атомные плоскости образуют винтовую поверхность (б).

Закон Дюлонга-Пти

Молярная теплоемкость химически простых тел в кристаллическом состоянии одинакова и не зависит от температуры:

$$C_V = \frac{dU_M}{dT} = 3R = 25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Фаза

Термодинамическое равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества.

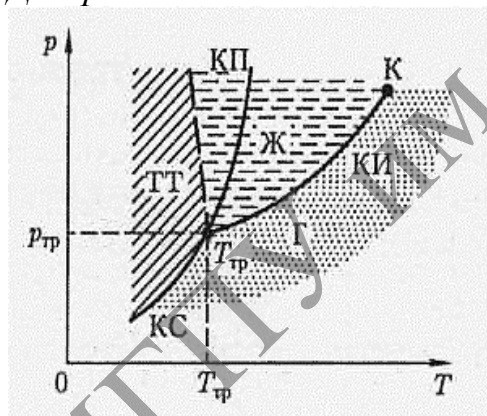
Фазовый переход I рода

Сопровождается поглощением или выделением теплоты, называемой *теплотой фазового перехода*; характеризуется постоянством температуры, изменениями энтропии и объема (например, плавление, кристаллизация).

Фазовый переход II рода

Переход, не связанный с поглощением или выделением теплоты и изменением объема; характеризуется постоянством объема и энтропии, но скачкообразным изменением теплоемкости.

Диаграмма состояния



КИ – кривая испарения,
 КП – кривая плавления,
 КС – кривая сублимации;
 ТТ – твердая фаза,
 Ж – жидкая фаза,
 Г – газообразная фаза.

Кривые на диаграмме называются *кривыми фазового равновесия*, каждая точка на них соответствует условиям равновесия двух сосуществующих фаз: КП – твердого тела и жидкости, КИ – жидкости и газа, КС – твердого тела и газа.

Список рекомендуемой литературы

1. Архангельский, М. М. Курс физики : Механика / М. М. Архангельский. – М. : Просвещение, 1975. – 448 с.
2. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский – М. : Академия, 2008. – 718 с.
3. Кикоин, И. К. Молекулярная физика / И. К. Кикоин, А. К. Кикоин. – М : Наука, 1975. – 480 с.
4. Телеснин, Р. В. Молекулярная физика / Р. В. Телеснин. – М.: Высшая школа, 1980. – 172 с.
5. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.

МГТУ ИМ. И.П. ШАМЯКИНА

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Амплитуда колебания 26
Амплитудно-частотная характеристика
вынужденных колебаний 30

Б

Барометрическая формула 36

В

Вес тела 14
Волна 31

- звуковая 32
- поперечная 31
- продольная 31

Вязкость 25

Г

Громкость звука 32

Д

Давление 24

- гидростатическое 24
- динамическое 24
- обусловленное внешними
силами 24

Дефекты

- линейные 47
- точечные 47

Диаграмма состояния 48
Длина волны 31

З

Закон

- Авогадро 34
- Архимеда 24
- Бойля-Мариотта 33
- всемирного тяготения 14
- Гей-Люссака 33, 34
- Дальтона 34
- динамики вращательного
движения твердого тела 22
- динамики для НИСО 16
- Дюлонга-Пти 47
- Максвелла о распределении
молекул идеального газа по
скоростям 35

- Ньютона 12, 13
- Паскаля 24
- сохранения импульса 17
- сохранения момента импульса 22
- сохранения энергии 19

И

Изотермы реальных газов 43
Импульс материальной точки (тела) 13
Интенсивность (сила) звука 32

К

Капиллярные явления 45
Кинематическое уравнение движения

- криволинейного равномерного 8
- криволинейного
равнопеременного 10
- прямолинейного равномерного 8
- прямолинейного
равнопеременного 8

Колебания

- вынужденные 30
- гармонические 26
- затухающие 29

Количество теплоты 38

Коэффициент

- затухания 30
 - поверхностного натяжения 44
- Коэффициент полезного действия
- термический для кругового
процесса 39
 - цикла Карно 41

Кристаллы

- атомные 46
- ионные 46
- металлические 26
- молекулярные 47

Л

Логарифмический декремент
затухания 30

М

Масса 12
Машина

- тепловая 40

- холодильная 41
- Маятник
 - математический 28
 - пружинный 27
 - физический 28
- Модель идеального газа 33
- Момент импульса
 - относительно неподвижной оси 22
 - относительно неподвижной точки 22
- Момент инерции
 - материальной точки относительно центра вращения 20
 - системы (тела) относительно оси вращения 20
- Момент силы
 - относительно неподвижной оси 21
 - относительно неподвижной точки 21
- Мощность 17
- Н**
- Начало термодинамики
 - второе 40
 - первое 38
 - третье 40
- Невесомость 14
- Несмачивание 45
- О**
- Основные положения МКТ 33
- П**
- Перегрузка 14
- Перемещение 5
 - угловое 8
- Период
 - вращения 8
 - гармонических колебаний 26
 - затухающих колебаний 30
- Плечо силы 21
- Правило правого винта 9
- Преобразования Галилея 12
- Приведенная длина физического маятника 27
- Процесс
 - адиабатный 38
 - изобарный 33, 38
 - изотермический 33, 38
 - изохорный 34, 38
 - круговой (цикл) 39
 - политропный 39
- Путь 5
- Р**
- Работа
 - в термодинамике 37
 - консервативных сил 18
 - переменной силы 17
 - постоянной силы 17
 - при вращении тела 21
 - силы тяжести 18
 - силы упругости 18
- Распределение Больцмана 36
- Реальный газ 42
- Резонанс 30
- С**
- Сила 12
 - внутреннего трения 25
 - инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета 15
 - квазиупругая 27
 - Кориолиса 16
 - межмолекулярного взаимодействия 42
 - поверхностного натяжения 44
 - равнодействующая 13
 - трения 15
 - тяжести 14
 - упругости 15
 - центробежная 16
- Система отсчета 5
 - инерциальная 12
- Скорость 5
 - колеблющейся точки 26
 - мгновенная 6, 9
 - средняя 6, 9
 - средняя квадратичная 35
 - угловая 8
- Сложение гармонических колебаний
 - взаимно перпендикулярных 29

Предметный указатель

- одного направления и одинаковой частоты 28
 - одного направления и различной частоты 29
- Смачивание 45
- Среднее число столкновений 36
- Средняя длина свободного пробега молекулы 36
- Т**
- Теорема
- об изменении кинетической энергии 18
 - Штейнера 20
- Теплоемкость 37
- молярная 37
 - удельная 37
- Течение жидкости
- ламинарное 25
 - турбулентное 25
- Траектория 5
- У**
- Удар
- абсолютно неупругий 19
 - абсолютно упругий 19
- Уравнение
- Бернулли 24
 - Ван-дер-Ваальса 42
 - вынужденного колебания 29
 - гармонического колебания 27
 - движения тела переменной массы 17
 - затухающего колебания 29
 - Клапейрона 34
 - Клапейрона-Менделеева 34
 - МКТ идеальных газов 35
 - неразрывности для несжимаемой жидкости 24
 - плоской волны 31
 - стоячей волны 32
- Ускорение 6
- колеблющейся точки 27
 - мгновенное 7, 10
 - нормальное 7
 - полное 7
 - среднее 6, 10
 - тангенциальное 7
 - угловое 10
- Ф**
- Фаза
- колебания 26
 - состояния вещества 48
- Фазовый переход
- I рода 48
 - II рода 48
- Формула
- Лапласа 45
 - Пуазейля 25
 - Стокса 25
- Ц**
- Центр масс (или центр инерции) системы материальных точек 17
- Цикл Карно 41
- Ч**
- Частота
- вращения 9
 - колебаний 26
 - циклическая 26
- Число
- Лошмидта 34
 - Рейнольдса 25
 - степеней свободы механической системы 37
- Э**
- Энергия 17
- внутренняя идеального газа 37
 - внутренняя реального газа 43
 - кинетическая 17, 20, 21, 35
 - поверхностная 44
 - полная механическая 18
 - потенциальная 18
 - потенциальная межмолекулярного взаимодействия 42
 - при гармонических колебаниях 27
- Энтропия 39, 40
- Эффект Доплера 32
- Эффективный диаметр молекулы 36