

## Bilet 1

3.

|                                                     |                                                                            |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta x = 3 \text{ км} = 3000 \text{ м}$          | $S^2 = c^2(t_2 - t_1)^2 - [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]$ |
| $\Delta t = \frac{5}{3} \cdot 10^{-5} \text{ с}$    |                                                                            |
| $v_x' \rightarrow v_x = 1,5 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ | Интервал - инвариантная величина                                           |
| $S' = ?$                                            | он не зависит от системы отсчета                                           |

$\Rightarrow S'^2 = S^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 = (3 \cdot 10^8)^2 \left(\frac{5}{3} \cdot 10^{-5}\right)^2 - (3 \cdot 10^3)^2$

$\qquad \qquad \qquad = 16 \cdot 10^6$

$\Rightarrow S' = \sqrt{S^2} = 4 \cdot 10^3$

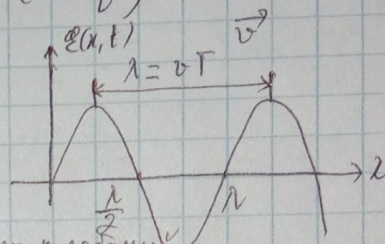
① Уравнение плоской гармонической волны. Характеристики волны: период, частота, длина волны, волновое число и волновой вектор. Единицы измерения этих величины в СИ.

— Уравнение плоской гармонической волны:  
 + В начале координат  $x=0$   $\xi = \xi(0, t) = A \cos \omega t$   
 + Путь  $x$ , время  $t = \frac{x}{v}$

$$\xi(x, t) = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

$$\text{или } \xi = A \cos \omega \left[ \left( t - \frac{r}{v} \right) + \varphi \right]$$

$$\boxed{\xi = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)}$$



— Период  $T = 2\pi / \omega$  — время одного полного колебания  
 —  $\omega$  — угловая циклическая частота по времени  
 —  $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число

— Длина волны:  $\lambda = \frac{2\pi}{k} = v \cdot T$  — расстояние, проходимое волной за время, равное периоду колебаний.  
 $\vec{k} = \frac{\omega}{v} \cdot \vec{n} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \vec{n}$  — волновой вектор.

$\frac{\omega}{k}$  — фазовая скорость; частота ( $\nu$ ) — число колебаний за единицу времени.

— Ед. измерения:

+ Период  $T$  (с)  
 + Частота  $\nu$  Гц (Герц)  
 +  $\omega$  : рад/с  
 +  $\lambda$  : м  
 +  $k$  : м<sup>-1</sup>



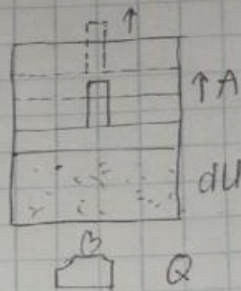
## ② Первое начало термодинамики (формулировка)

— Первое начало термодинамики (Закон сохранения энергии в термодинамике)

Количество теплоты, сообщаемой телу, идёт на увеличение внутренней энергии и на совершение работы.

$$Q = \Delta U + A$$

$$[Q] = \text{Дж}$$



(Правило знаков)

$\Delta Q > 0$ , если тепло передаётся от окружающей среды данной системе, при этом  $\Delta U > 0$ ,  $\Delta A > 0$

Если система производит работу над окружающей средой, то  $U < 0$ .

— Работа, совершаемая телом при изменении объёма

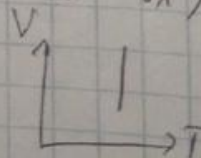
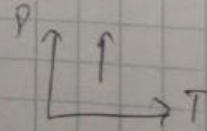
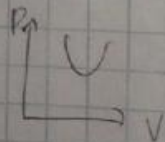
$$A = \int_{\Delta V} p dV$$

$$(\delta A = f dr \cos \alpha; f = pS, dV = S dr \cos \alpha)$$

$$\delta A = pS dr \cos \alpha = p dV.)$$

— Работа идеального газа при изотермическом процессе ( $T = \text{const}$ ,  $pV = \text{const}$ )

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{pV}{V} dV = \nu RT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$



$$\Delta U = 0, Q = A.$$

## Bilet 2

3.

$$W_{K'} = 1,25 W_0 \quad \left| \quad W_K = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_K^2}{c^2}}} \quad W_{K'} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_{K'}^2}{c^2}}}$$

$$v_0 = 0,5c$$

$$m_0$$

$$W_K = ?$$

$$\Rightarrow \frac{W_0^2 = m_0^2 c^4}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}^2} = \frac{m_0^2 c^4}{W_{K'}^2}$$

$$\Rightarrow \sqrt{1 - \frac{v_{K'}^2}{c^2}} = \frac{1}{1,25}$$

$$\Rightarrow 1 - \frac{v_{K'}^2}{c^2} = \frac{16}{25}$$

$$\Rightarrow \frac{v_{K'}^2}{c^2} = \frac{9}{25}$$

$$\Rightarrow v_{K'} = \frac{3}{5} c$$

$$v_K = \frac{v_{K'} + v_0}{1 + \frac{v_0 v_{K'}}{c^2}} = \frac{0,6c + 0,5c}{1 + \frac{0,3c^2}{c^2}} = \frac{11}{13} c$$

$$W_K = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_K^2}{c^2}}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{121}{169}}} = \frac{13 m_0 c^2}{4\sqrt{3}}$$



### ③ Понятия плоских и сферических волн. Уравнение сферической волны (без вывода)

Геометрическое место точек, колеблющихся одинаково в одинаковой фазе наз. волновой поверхностью.

Волны, волновые поверхности которых представляют собой плоскости, наз. плоскими.  $\omega t \pm kx = \text{const}$

$$\xi = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

Если волновая поверхность - сфера, то волна наз. сферической.

$$\xi = \frac{A}{r} \cos \omega \left( t - \frac{r}{v} \right) = \frac{A}{r} \cos (\omega t - kr)$$

$k$  - скаляр

$\frac{A}{r}$  - убывающая амплитуда колебаний.

$\omega$  - круговая частота.

$k$  - волновое число

$r$  - радиус

$$r \rightarrow 0 \Rightarrow A \rightarrow \frac{1}{r} \quad (A \rightarrow \infty)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Пример:

плоская волна: волна, возникающая в цилиндре с газом, при совершении колебаний поршня

сфер. во. - волны, генерируемые точечным источником в однородной среде



④ Основное уравнение МКТ идеального газа (с выводом)  
 Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул (с выводом)

— Основное уравнение МКТ идеального газа:  
 (молекулярно-кинетической теории газов)

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

(давление газов определяется средней кинетической энергией поступательного движения молекул и их плотностью).

$p$  - давление (Па = Н/м<sup>2</sup>)

$n$  - концентрация газа (1/м<sup>3</sup>)

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  (Дж/К)

$m_0$  - масса молекулы (кг)

$v$  - средняя скорость молекул (м/с)

$T$  - абсолютная температура газа (°C + 273) (К)

$E_k$  - средняя кинетическая энергия молекул газа (Дж)

— Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа.

$$\overline{E_k} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{i}{2} kT.$$

$i$  - число степеней свободы, для одноатомного газа  $i = 3$ .



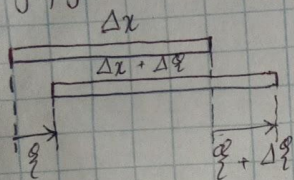
### Bilet 3

3.

|                                     |                                                                       |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $m = 56 \text{ g}$                  | $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{pRT}{V} dV$       |
| $V_1 = 1 \text{ l}$                 |                                                                       |
| $V_2 = 7,39 \text{ l}$              |                                                                       |
| $T = 273 + 27 = 300^\circ \text{C}$ |                                                                       |
| $M = 28 \text{ g/mol}$              |                                                                       |
| $A = ?$                             | $= \frac{m}{M} \cdot RT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$              |
|                                     | $= \frac{56}{28} \cdot 8,31 \cdot 300 \ln\left(\frac{7,39}{1}\right)$ |
|                                     | $\approx 9972 \text{ J}$                                              |

⑤ Одномерное волновое уравнение для продольной упругой волны в твердом теле (с выводом).  
 общий вид волнового уравнения (без вывода)

— Одномерное волновое уравнение для продольной упругой волны в твердом теле.



Относительная продольная деформация.  

$$\varepsilon = \frac{\partial \xi}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta \xi}{\Delta x}$$

$x$  - координата сечения стержня.  
 $\xi$  - смещение сечения,  $\xi(x, t)$ .

Закон Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$\sigma$  - напряжение

$E$  - модуль Юнга.

Масса и ускорение участка стержня

$$m = \rho_0 S \Delta x, \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = a$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{1}{v} \frac{\partial \xi}{\partial t}$$

$\frac{\partial \xi}{\partial t} = u_x$  - это проекция скорости частицы среды, движущейся около своего положения равновесия.

— Общее волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\xi'_\varphi) = \frac{\partial \xi'_\varphi}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \xi''_\varphi$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = -\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial x} (\xi'_\varphi) = -\frac{1}{v} \frac{\partial \xi'_\varphi}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} =$$

$$= -\frac{1}{v} \xi''_\varphi \cdot \left( -\frac{1}{v} \right) = \frac{1}{v^2} \xi''_\varphi$$

$$\left[ \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right]$$

$$\xi = f_1 \left( t - \frac{x}{v} \right) + f_2 \left( t + \frac{x}{v} \right)$$



6) Второе начало термодинамики в формулировках Клаузиуса и Томсона (Кельвина).

— Клаузиус (1850): невозможен произвольный переход тепла от менее к более нагретому телу, или невозможны процессы, единственным результатом которых был бы переход тепла от менее к более нагретому телу.

— Кельвин (1851): невозможны процессы, единственным конечным результатом которых было бы превращение тепла целиком в работу.

Другая форма формулировки Кельвина.

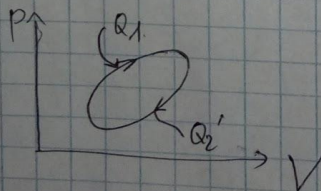
Невозможно создать тепловой двигатель с КПД (коэффициент полезного действия)  $\eta = 1$  или невозможен вечный двигатель 2-го рода.

Из опыта:  $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1}$ ;

$A$  - произведенная работа

$Q_1$  - сообщенное двигателю тепло.

КПД теплового двигателя  $\eta = \frac{A}{Q}$





## Bilet 4

⑦ Объёмная плотность энергии упругой волны (вывод на примере плоской продольной волны). Вектор Умова (вектор плотности потока энергии).

— Объёмная плотность энергии упругой волны.

Работа по растяжению стержня идёт на увеличение внутренней энергии.

$$A = \int_0^x F(x) dx = \kappa \int_0^x x dx = \frac{\kappa x^2}{2} \quad U = \frac{\kappa x^2}{2}$$

Плотность энергии:  $u_n = \frac{U}{Sl}$

$$\kappa x = F = \sigma F, \quad \sigma = E \varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{x}{l}$$

$$U = \frac{Fx}{2} = \frac{\sigma F \cdot \varepsilon l}{2} = \frac{E \varepsilon^2 Sl}{2}, \quad u_n = \frac{E \varepsilon^2}{2}$$

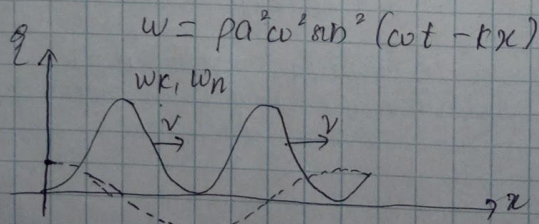
Плотность полной энергии:

$$\omega = u_k + u_n = \rho \frac{\dot{\xi}^2}{2} + \frac{E \varepsilon^2}{2}$$

Для твёрдого стержня  $E = \rho v^2$ ,

$$\omega = \frac{\rho}{2} \left[ \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} \right)^2 + v^2 \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \right]; \quad \omega = \rho \frac{\dot{\xi}^2}{2}$$

Для гармонической волны  $\xi = a \cos(\omega t - kx)$



Парадокс!

Изменения объёмных плотностей энергии синфазны.



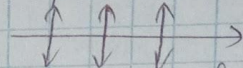
## Примеры

продольной волны  
колебания в направлении  
распространения волны

Пример: звуковая волна  
волна давления

## Волны

поперечной волны  
колебания в напр. перпендикулярном напр.  
распространения волны



электромагнитная волна  
волны на шнуре  
волны на поверхности  
жидкости

— Вектор Умова

$$\vec{S} = w \cdot \vec{v}$$

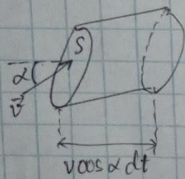
Поток энергии:  $\Phi = \frac{dw}{dt}$

$$j = \frac{d\Phi}{ds \perp}, \quad dw = w \cdot v \cdot dt \cdot ds \cos \alpha = w \cdot v \cdot dt \cdot ds_{\perp}$$

$$\frac{dw}{dt} = j \cdot S \cos \alpha, \quad \vec{S} = \vec{n} \cdot S$$

энергия через площадь определяется  
поток вектора Умова  
через эту площадь  $\frac{dw}{dt} = (\vec{j}, \vec{S})$

$\vec{v}$  — скорость, с которой энергия переносится  
 $\alpha$  — угол направления к нормали некоторой  
малой площади  $S$





## ⑧ Понятия квазистатических, обратимых и необратимых проц.

— Квазистатический процесс. В термодинамике - относительно медленный процесс (то есть переход термодинамической системы из одного состояния в другое), длительность протекания которого намного превышает характерные времена релаксации системы.

— Процесс наз. обратимым, если он протекает таким образом, что после окончания процесса он может быть проведен в обратном направлении через все те же промежуточные состояния, что и прямой процесс.

— Процесс наз. необратимым, если он протекает так, что после его окончания систему нельзя вернуть в начальное состояние через прежние промежуточные состояния.

(например: обратимый : процесс адиабатического расширения или сжатия газа)



3)

Дано

$$V_{H_2} = 10 \text{ л.} = 10^{-2} \text{ м}^3$$

$$P_{H_2} = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$$

$$\theta = 10^4 \text{ Дж}$$

$$\frac{P_2}{P_1} (n_2) = ?$$

Решение.

1)  $V = \text{const}$  (изохорический процесс)

$$\Rightarrow A = 0$$

$$\Rightarrow Q_{H_2} = \Delta U.$$

2)  $H_2$  - двухатомный  $\rightarrow i = 5.$

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T = \frac{5}{2} \nu R \Delta T = \frac{5}{2} \nu R (T_2 - T_1)$$

из-за уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \nu RT$$

$$\Rightarrow \Delta U = \frac{5}{2} V (P_2 - P_1)$$

$$\text{Подставляем } l = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Rightarrow \Delta U = \frac{5}{2} V P_1 (l - 1)$$

$$l = \frac{\Delta U}{\frac{5}{2} V P_1} + 1 = \frac{Q_{H_2}}{\frac{5}{2} V_{H_2} P_{H_2}} + 1 = \frac{10^4}{\frac{5}{2} \cdot 10^{-2} \cdot 10^5} + 1 = 4 + 1 = 5.$$

$$\text{Ответ: } \frac{P_2}{P_1} = 5.$$

## Bilet 5

③ Стоячая волна. Уравнение стоячей волны (вытекает из уравнения бегущей волны) Узлы и пучности.

Стоячая волна: явление интерференции волн, распространяющихся в противоположных направлениях, при котором перенос энергии ослаблен или отсутствует.

Уравнение стоячей волны

$$\xi = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos \omega t$$

$$\xi = A^* \cos \omega t, \text{ где } A^* = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

$$\begin{cases} \xi_1 = A \cos(\omega t - kx) \\ \xi_2 = A \cos(\omega t + kx) \end{cases}, \text{ начальная фаза } \varphi = 0.$$

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos\left(\frac{\omega t - kx + \omega t + kx}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega t - kx - \omega t - kx}{2}\right) \\ &= 2A \cos \omega t \cos kx = 2A \cos kx \cos \omega t, \quad \left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right) \end{aligned}$$

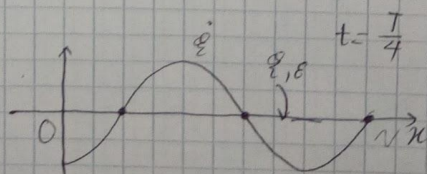
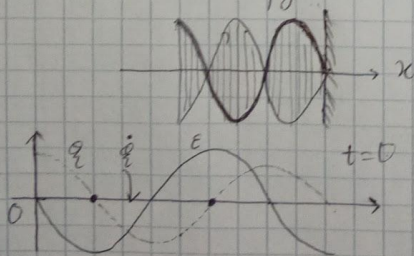
В точках, где координаты удовлетворяют условию  $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $\cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) = 1$ , суммарная амплитуда равна максимальному значению  $A^* = 2A$  — это пучности стоячей волны.

Координаты пучностей:  $x_{\text{пучн}} = \pm n \frac{\lambda}{2}$ .

В точках, координаты которых удовлетворяют условию

$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ),  $\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = 0$  и суммарная амплитуда колебаний равна нулю  $A^* = 0$  — это узлы

стоячей волны. Координаты узлов:  $x_{\text{узел}} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}$ .





10) Теплоёмкость идеального газа в изохорическом и изобарическом процессах (вывод с использованием формулы для внутренней энергии идеального газа) Уравнение Майера.

— Теплоёмкость газа при изохорном процессе ( $C_V$ ).

Для изохорного процесса первое начало термодинамики.

$$\delta Q = dU + \delta A; \quad dQ = dU \quad \text{т.к.} \quad dA = 0$$

$$(U_{\mu} = C_V T) \quad C_V \cdot \nu \cdot \Delta T = \nu \cdot \frac{i}{2} R \Delta T \Rightarrow \boxed{C_V = \frac{i}{2} R}$$

$$\boxed{C_V = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU_{\mu}}{dT}}$$

— Молярная теплоёмкость газа при изобарическом процессе ( $C_P$ )

Для изобарного процесса первое начало термодинамики:

$$Q = \Delta U + p \Delta V, \quad p \Delta V = \nu R \Delta T.$$

$$\text{т.к.} \quad C_P \cdot \nu \cdot \Delta T = \nu \cdot \frac{i}{2} R \Delta T + \nu R \Delta T.$$

$$\text{откуда} \quad C_P = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R.$$

— Уравнение Майера:  $C_P = C_V + R$  (для одного моля газа)

Для произвольного количества газов:  $C_V = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} R$

$$C_P = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{(i+2)}{2} R$$

$R$  — универсальная газовая постоянная.

5)

Dato.

$$\Delta t = 5 \cdot 10^{-5} \text{ c}$$

$$s = 12 \text{ km} = 12 \cdot 10^3 \text{ m.}$$

$$v_{K \rightarrow K'} = 2 \cdot 10^8 \text{ m/c.}$$

$$\Delta l = ?$$

$$s' = ?$$

Решение.

1) Интервал - инвариантная величина, и не зависит от выбора инерциальной системы отсчета

$$s = s' = \text{inv.}$$

$$\rightarrow s' = 12 \text{ km.}$$

$$1) \Delta s^2 = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta l)^2$$

$$\Delta l = \sqrt{c^2 (\Delta t)^2 - s^2}$$

$$= \sqrt{(3 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^{-5})^2 - (12 \cdot 10^3)^2}$$

$$= 9 \cdot 10^3 \text{ (m)}$$

$$= 9 \text{ (km)}$$

Ответ:  $s' = 12 \text{ km}$

$\Delta l = 9 \text{ km.}$



## Bilet 6

Постулаты специальной теории относительности (СТО)  
Область применимости СТО.

1-й Принцип относительности:

Все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой (проходят одинаково во всех инерциальных системах отсчета).

2-й принцип относительности:

Скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

Область применимости СТО: СТО применима для изучения движения тел с любыми скоростями (в том числе близкими или равными скорости света) при условии отсутствия очень сильных гравитационных полей.



12) Адиабатический процесс. Вывод уравнение Пуассона для идеального газа на основе известных формул для  $C_p$  и  $C_v$ .

Адиабатический процесс: - процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

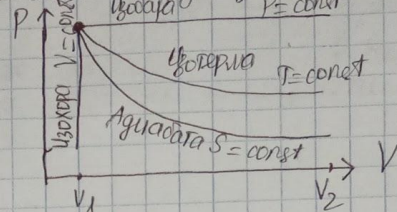
Адиабатический по сути изэнтропийный процесс ( $\Delta S = 0$ ,  $S = \text{const}$ )

Уравнение адиабаты.

$$P \cdot V^\gamma = \text{const}$$

где  $\gamma$  - показатель адиабаты,  $P = \text{const}$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$



- Вывод уравнение Пуассона:

$$P \cdot V^\gamma = \text{const}$$

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  - постоянная адиабаты (коэффициент Пуассона)

Из первого начала термодинамики:

$$u = \frac{\nu \cdot RT}{\gamma - 1} = \frac{PV}{\gamma - 1}, \quad \left[ \delta Q = d \left( \frac{PV}{\gamma - 1} \right) + P dV \right]$$

$$d(PV) + (\gamma - 1)P dV = V dP + P dV + \gamma P dV - P dV = 0$$

$$V dP + \gamma P dV = 0 \quad | : PV$$

$$\frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0 \rightarrow \gamma d(\ln V) + d(\ln P) = 0$$

$$\rightarrow \ln V^\gamma + \ln P = \text{const} \quad \boxed{PV^\gamma = \text{const}}$$

$$PV^\gamma = \frac{\nu RT}{V} \cdot V^\gamma \sim \boxed{T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}}$$

$$PV^\gamma = T \cdot V^{\gamma-1} = T \cdot \left( \frac{\nu RT}{P} \right)^{\gamma-1} \sim \boxed{P^{1-\gamma} \cdot T^\gamma = T P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const}}$$



⑥

Donno

$$q = 30 \cos(900t + 10,6z - \frac{\pi}{7})$$

$$q = [u_{km}]$$

---

$$f = ?$$

$$v = ?$$

$$\vec{k} = ?$$

$$a_{max} = ?$$

Remembre,

$$q = A \cos(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{R} + \alpha)$$

$$\Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{900}{2\pi} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$|\vec{k}| = 10,6 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{900}{10,6} = 84,9 \text{ (m/s)}$$

$$\vec{k} = (10,6; 0; 0)$$

$$a = \ddot{q} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{R} + \alpha)$$

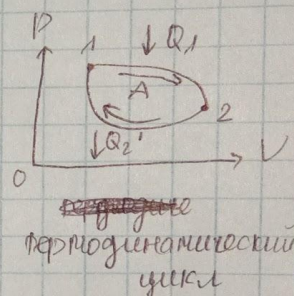
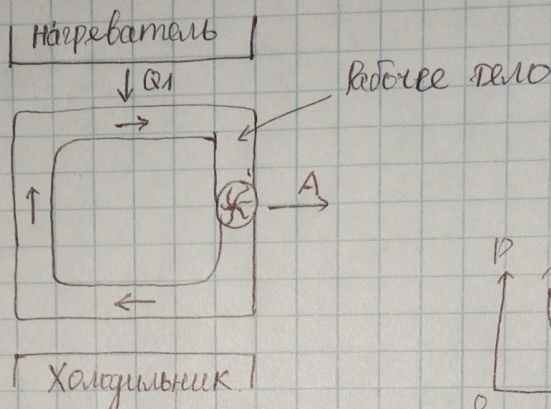
$$\Rightarrow a_{max} = A\omega^2 = 50 \cdot 900^2 = 29,3 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

## Bilet 7

14) Тепловая машина (блок-схема). КПД тепловой машины

Тепловой машиной наз. периодически действующий двигатель совершающий работу за счет получаемого извне тепла.

Схема:



— КПД тепловой машины

Коэффициентом полезного действия  $\eta$  тепловой машины наз. отношение работы тепловой машины  $A$  к сумме  $Q_+$  подведенных теплот к газу за весь цикл.

$$\eta = \frac{A}{Q_+}$$

(Закон сохранения энергии:  $A = A_\Sigma = Q_\Sigma = Q_+ + Q_- =$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_-|}{Q_+} = \frac{Q_+ - |Q_-|}{Q_+}$$



13) Преобразования Лоренца для координат и времени (вывод из постулатов СТО)

$$K' \rightarrow K$$

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$K \rightarrow K'$$

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$\beta = \frac{V}{c}$  — отношение скорости системы отсчета к скорости света.



Дано: (найти  $q$  и  $T$ , для  $h_0$  и  $h_1$  и  $h_2$ ).  
Билет 7

~~$V$  и  $h$  из  $p$  и  $q$ .~~

$$\frac{p}{p_0} = ?$$

Дано

Билет 7:  
 $Q = \text{const}$   
 $V_0, p_0,$

$CO_2$

$$V = \frac{V_0}{8}$$

$$\frac{p}{p_0} = ?$$

Билет 9.

$Q = \text{const}$   
 $V_0, p_0, T_0$

$O_2$

$$T = \frac{T_0}{4}$$

$$\frac{V}{V_0} = ?$$

Билет 8:

$p = \alpha V^3$   
 $\alpha = \text{const}$

$$V = 2V_0$$

$$A = ?$$

$$\frac{U}{U_0} = ?$$

Билет 10:

$A = 157 \text{ Дж}$   
 $p = \text{const}$

двухатомный газ,

$$Q = ?$$

$$\Delta U = ?$$



Билет 7.

задача 3: ~~U~~

При адиабатном:

$$Q = \Delta U + A ; Q = 0 \Rightarrow \Delta U = -A.$$

$$\Delta U = p V^\gamma = \text{const} \quad \text{— уравнение адиабаты.}$$

$\text{CO}_2$ :

$$\gamma = \frac{i+2}{i} = \frac{6+2}{6} = \frac{4}{3}$$

$$\Rightarrow p_0 V_0^\gamma = p \cdot \left(\frac{V_0}{8}\right)^\gamma$$

$$\Rightarrow \frac{p}{p_0} = \left(\frac{V_0}{\frac{V_0}{8}}\right)^\gamma = 8^\gamma$$

$$\Rightarrow p = p_0 \cdot 8^{\frac{4}{3}} = p_0 \cdot 16.$$

$\Rightarrow$  давление  $\text{CO}_2$  увеличится 16 раз.



## Bilet 8

15) Вывод из преобразований Лоренца выражений для измерения промежутка времени между событиями в СТО и Лоренцева сокращения длины.

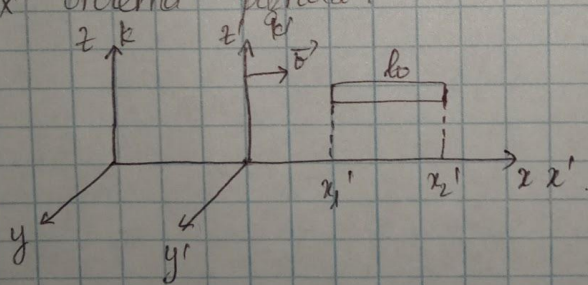
— Замедление времени (длительность событий в разных системах отсчета отличается)

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Собственное время — минимально (движущиеся часы идут медленнее покоящихся).

$$t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{или} \quad \Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

— Лоренцево сокращение длины (длина тел в разных системах отсчета разная).



$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \text{или} \quad l = l_0 \sqrt{1-\beta^2}.$$

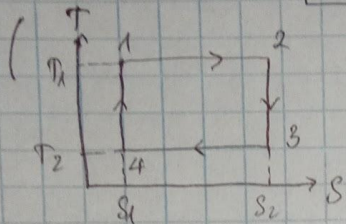
Длина движущегося тела короче, чем покоящегося.



16) Теорема Карно (Лая теорема Карно), без доказательства  
Термодинамическая шкала температур.

Теорема Карно: КПД теплового двигателя, работающего по циклу Карно, не зависит от природы используемого рабочего вещества, определяется только температурами нагревателя и охладителя и не зависит от других параметров цикла.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



В цикле  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ :

$$Q_{12} = \int_{1 \rightarrow 2} T dS = \int_{1 \rightarrow 2} T_1 dS = T_1 \Delta S_1$$

$$Q_{34} = \left| \int_{3 \rightarrow 4} T dS \right| = \int_{4 \rightarrow 3} T dS = T_2 \Delta S_1$$

$$\eta = \frac{Q_{12}}{Q_{12} - Q_{34}} = \frac{T_1 \Delta S_1}{T_1 \Delta S_1 - T_2 \Delta S_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Термодинамическая Температура шкала (Кельвина шкала)  
абсолютная шкала температур, не зависящая от  
свойств ~~термодинамического~~ термометрического вещества  
(начало отсчета - абсолютный ноль температуры)

(Построение термодинамической шкалы температуры  
основано на втором начале термодинамики,  
и на независимости КПД Карно цикла)

$$\text{Ед. К.} \quad 0^\circ\text{C} \sim 273,16 \text{ K}$$



Билет 8:

$$p = \alpha V^3$$

$$\rightarrow p_0 = \alpha V_0^3$$

$$p = \alpha (V_0 \cdot 2)^3 = 8 \cdot p_0$$

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

Билет 8:

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

$$= \int_{V_1}^{V_2} \alpha V^3 dV.$$

$$= \alpha \frac{V^4}{4} \Big|_{V_1}^{V_2}$$

$$= \alpha \frac{V^4}{4} \Big|_{V_0}^{2V_0}$$

$$A = 15 \alpha \frac{V_0^4}{4}$$



$$\begin{aligned}
 U_0 &= \frac{i}{2} n R T \\
 &= \frac{i}{2} p_0 V_0 = \frac{i}{2} \alpha \cdot V_0^4 \\
 U_1 &= \frac{i}{2} \alpha \cdot (2 V_0)^4 \\
 \Rightarrow \frac{U_1}{U_0} &= 2^4 = 16. \\
 \Rightarrow
 \end{aligned}$$

## Bilet 9

Bilet 9:

$$Q_2 = \dots i = 5 \Rightarrow \gamma = \frac{5+2}{5} = \frac{7}{5}$$

При адиабатном:

$$p V^\gamma = \text{const}$$

$$p V = n R T \rightarrow p = \frac{n R T}{V}$$

$$\Rightarrow n R T V^{(\gamma-1)} = \text{const.}$$

$$\Rightarrow T_0 \cdot V^{(\gamma-1)} = \text{const.}$$

$$\Rightarrow T_0 \cdot V_0^{(\gamma-1)} = \frac{T_0}{4} \cdot V^{(\gamma-1)}$$

$$\Rightarrow V^{\gamma-1} = 4 \cdot V_0^{(\gamma-1)}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{2}{5}} = 4 \Rightarrow V = V_0 \cdot \sqrt[5]{4} = 2$$



17) Преобразование компонент скорости при переходе в другую систему отсчета в СТО (вывод из преобразования Лоренца)

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad y' = y \quad t = \frac{t' + Vx'/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{и} \quad t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

по правилу.

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'/dt}{dt'/dt}$$

$$v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy'/dt}{dt'/dt}$$

получаем

$$v'_x = \frac{v_x - V}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

$$v'_y = \frac{v_y \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

$$v'_z = \frac{v_z \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

$$v_x = \frac{v'_x + V}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}$$

$$v_y = \frac{v'_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}$$

$$v_z = \frac{v'_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}$$

$$v' = \sqrt{v'^2_x + v'^2_y}$$

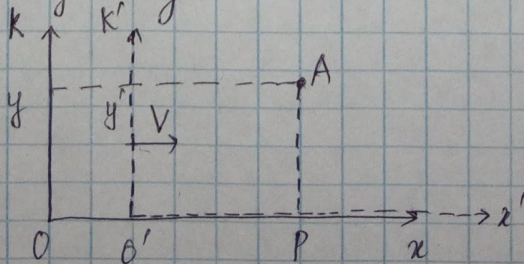
$$v' = \frac{\sqrt{(v_x - V)^2 + v_y^2 (1 - \beta^2)}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

Вывод относительная скорость не может быть больше скорости света.

$$v'_x = v_x - V$$

$$v'_y = v_y$$

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}$$





18) Уравнение Ван-дер-Ваальса (без вывода) и область его применимости.

— Уравнение Ван-дер-Ваальса для произвольного количества вещества  $\nu$  реального газа учитывает конечный объем молекул  $\nu b$  и их взаимодействие между собой  $\frac{\nu^2 a}{V^2}$ :

$$\left( P + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu R T.$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные Ван-дер-Ваальса.

$V$  — объем, занимаемый газом

$P$  — давление газа на стенки сосуда.

(Данное уравнение справедливо при условии:

$$\nu b \ll V \quad \text{и} \quad \frac{\nu^2 a}{V^2} \ll P.$$

$a, b$  зависят от температуры)

— Применение: для выяснения связей между величинами характеризующими свойства вещества, а также получение формулы для внутренней энергии реального газа



(19) Интервал между событиями в СТО. Инвариантность интервала (доказательство на основе преобразований Лоренца).

— Пространственно-временной интервал в СТО является инвариантом

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2 = \text{inv}$$

(инвариантность пространственно-временного интервала в СТО означает, что пространство псевдоевклидово)

— Инвариантность интервала пространственно-временного

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$$

$$\Delta s'^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2$$

Согласно формул

$$\Delta x' = \frac{\Delta x - V \Delta t}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \Delta y' = \Delta y$$

$$\Delta z' = \Delta z, \quad \Delta t' = \frac{\Delta t - \frac{V}{c^2} \Delta x}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\begin{aligned} \Delta s'^2 &= c^2 \frac{[\Delta t - \frac{V}{c^2} \Delta x]^2}{1 - \beta^2} - \frac{(\Delta x - V \Delta t)^2}{1 - \beta^2} - \Delta y^2 - \Delta z^2 = \\ &= c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = \Delta s^2. \end{aligned}$$



20) Понятие политропического процесса. Примеры.

— Политропический процесс: процесс, при котором теплоёмкость газа остаётся постоянной  $C = \text{const}$ .

Политропический процесс - самый общий из всех изопроцессов.

Уравнение :  $PV^n = \text{const}$ ,  $n$  - показатель политропы

— Пример: поместите газ в цилиндр, закрепите поршень, поместите цилиндр в газ с горячей водой. Затем  $T$  увеличивается,  $P$  увеличивается, но  $V$  остаётся неизменным.



Билет 10.

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

$$A = 185 \text{ Дж}$$

$$Q = \Delta U + A.$$

$$\Delta U = \frac{i}{2} p \cdot \Delta V$$

$$A = p \Delta V.$$

$$\Rightarrow \Delta U = \frac{i}{2} A = \frac{5}{2} \cdot 185 =$$

$$Q = \frac{i}{2} A + A = \frac{7}{2} \cdot 185 =$$

Двухатомного газа  $i = 5$



21) Выражение для импульса в СТО (без вывода).  
Основное уравнение релятивистской динамики (без вывода).

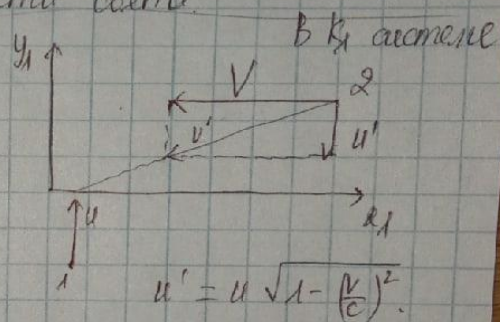
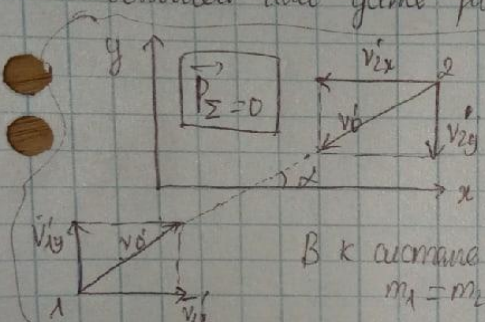
— Выражение для импульса в СТО:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Здесь и далее  $\beta = \frac{v}{c}$ .

→ никакое тело не может двигаться со скоростью большей или даже равной скорости света.



$$m_1 \cdot u = m_2 \cdot u'$$

$$m_2 = m_1 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

— Основное уравнение релятивистской динамики.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right) = F$$

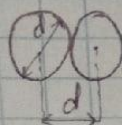
Соответствует общему уравнению  $\frac{dp}{dt} = F$ .



22) Понятие эффективного диаметра молекулы.  
Вывод формулы для длины свободного пробега молекул идеального газа.

— Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, наз. эффективным диаметром.

$$\sigma = \pi d^2$$



— Расстояние, проходимое молекулой в среднем без столкновений, наз. средней длиной свободного пробега.

$$\langle \lambda \rangle = \overline{v \cdot \tau}$$

$\overline{v}$  — средняя скорость теплового движения,  
 $\tau$  — среднее время между двумя столкновениями.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2} n d^2 n}, \quad \nu = \sqrt{2} n d^2 \langle v^* \rangle n$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} n d^2 P} = \frac{kT}{\sqrt{2} \cdot 6 P}$$

$$P = nkT, \quad n = \frac{P}{kT} \quad (P: \text{давление})$$



11, 5

график функции

$$\xi = A \cos(\omega t - kx + \alpha)$$

из график

$$\xi = 1 \cos(5000t - 5x + \alpha)$$

$$\bullet \quad v = \frac{dx}{dt} = \frac{v}{k} = \frac{5000}{5} = 1000 \text{ м/с.}$$

$$v_{\text{частоты}} = \xi' = -5000 \sin(5000t - 5x + \alpha)$$

$$\Rightarrow v_{\text{max частоты}} = 5000 \text{ м/с}$$

→ отношение

$$\frac{v_{\text{раз.}}}{v_{\text{max частоты}}} = \frac{1000}{5000} = \frac{1}{5}.$$



## Bilet 12

23) Кинетическая энергия релятивистской частицы (вывести, считая известным основное уравнение релятивистской динамики). Полная энергия и энергия покоя в СТО.

— Кинетическая энергия релятивистской частицы.

$$T = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$$

$$\left( \begin{aligned} dE_k &= dA, & v \frac{d}{dt} \left( \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) dt &= F ds. \\ dE_k &= v \frac{d}{dt} \left( \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) dt = v d \left( \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \end{aligned} \right)$$

$$= v \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} d(mv) + mv d \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \right] =$$

$$= v \cdot \left( \frac{mdv}{\sqrt{1-\beta^2}} + \frac{v m \beta^2 dv}{(\sqrt{1-\beta^2})^3} \right)$$

$$= \frac{(1-\beta^2) \cdot mdv + \beta^2 \cdot mdv}{(1-\beta^2)^{3/2}} = \frac{mdv}{(1-\beta^2)^{3/2}}$$

$$= d \left( \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \Rightarrow E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} + \text{const.}$$

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - mc^2 = \dots$$

— Полная энергия в СТО

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

при  $v=0$   $E_0 = mc^2$

— Энергия покоя в СТО

$$E_0 = mc^2$$

(при  $v=0$ )

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

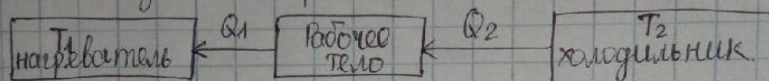
$$\Rightarrow E = c \sqrt{m^2 c^2 + p^2}$$

$$E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4 = \text{inv}$$



24) Холодильная машина (блок-схема) КПД холодильной машины (холодильный коэффициент)

— Холодильная машина: это машина, работающая по обратному циклу Карно.  
(Если пропустить цикл в обратном направлении, тепло будет забираться у холодильника и передаваться нагревателю за счет работы внешних сил).



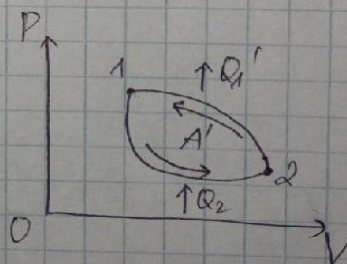
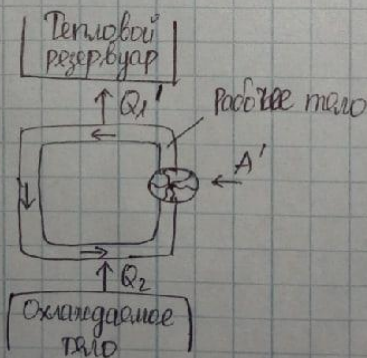
$Q_1 < 0$ ,  $Q_2 > 0$ , работа совершаемая над газом-строуатим  
 $A = (Q_1 + Q_2) < 0$ .

— Коэффициент полезного действия для холодильных машин, работающих по циклу Карно (один взгляд)

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta_{\text{ХМ}} = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1' - Q_2}$$

Схема:





$$\begin{array}{l|l}
 12, \\
 p = \text{const.} \\
 \Delta Q = 2 \text{ kJ} \\
 A = ?
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 \Delta Q = C_p \Delta T. \\
 p = \text{const. : эмехамон...} \\
 \Rightarrow C_p = 4R. \quad R = 8,31.
 \end{array}
 \right.$$

приращение внутренней энергии  
определяется молярностью:

$$C_v = 3R.$$

$$\Delta U = C_v \Delta T.$$

$$\Rightarrow \Delta T = \frac{\Delta U}{C_v}.$$

$$\rightarrow \frac{\Delta U}{C_v} = \frac{\Delta Q}{C_p}$$

$$\rightarrow \Delta U = \frac{\Delta Q}{C_p} \cdot C_v.$$

$$A = Q - \Delta U = Q - \frac{Q}{C_p} \cdot C_v.$$

$$= Q \cdot \left( 1 - \frac{C_v}{C_p} \right)$$

$$= 2 \left( 1 - \frac{3}{4} \right) = 0,5 \text{ (kJ)}$$



⑥ Второе начало термодинамики в формулировках Клаузиуса и Томсона (Кельвина).

— Клаузиус (1850): невозможен произвольный переход тепла от менее к более нагретому телу, или невозможны процессы, единственным результатом которых был бы переход тепла от менее к более нагретому телу.

— Кельвин (1851): невозможны процессы, единственным конечным результатом которых было бы превращение тепла целиком в работу.

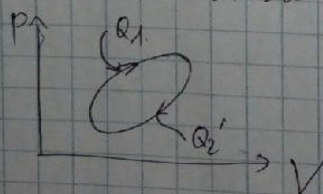
Другая форма формулировки Кельвина

Невозможно создать тепловой двигатель с КПД (коэффициент полезного действия)  $\eta = 1$  или невозможен вечный двигатель 2-го рода.

$$\text{Из опыта: } \eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1};$$

$A$  — произведенная работа  
 $Q_1$  — сообщенное двигателю тепло.

КПД теплового двигателя  $\eta = \frac{A}{Q}$





25) Связь между импульсом и энергией релятивистской частицы (вывод на основе известных выражений для полной энергии и релятивистского импульса)

$$\boxed{E = c \sqrt{m^2 c^2 + p^2}}$$

$$E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4 = \text{const.}$$

$$\left( E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} ; \quad \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right), \quad \beta = \frac{v}{c}$$

никакое тело не может двигаться со скоростью большей или даже равной скорости света ( $v \rightarrow c, p \rightarrow \infty$ )

$E, p, m$  - полная энергия, импульс и масса частицы  
 $c$  - скорость света в вакууме

( Можно выделить 2 предельных случая.

1. Ультрарелятивистский. Кинетическая энергия частицы много ~~меньше~~ <sup>больше</sup> ее энергии покоя.

$$T \gg mc^2$$

$$p = \frac{T}{c} \quad \text{или} \quad T = cp$$

2. Классический. Кинетическая энергия частицы много меньше ее энергии покоя

$$T \ll mc^2$$

$$p = \sqrt{2Tm} \quad \text{или} \quad T = \frac{p^2}{2m}$$



13,

$$T_1 = 300 \text{ K}$$

$$P \cdot V_1 = \nu \cdot R \cdot T_1$$

$$T_2 = 400 \text{ K}$$

$$P \cdot V_2 = \nu \cdot R \cdot T_2$$

$$\Rightarrow P \cdot (V_2 - V_1) = \nu \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow A = P \cdot \Delta V &= \nu \cdot R \cdot (T_2 - T_1) \\ &= 2,831 \cdot 100 = 1662 \text{ (J)} \end{aligned}$$

$$Q = \Delta U + A$$

$$\rightarrow \Delta U = Q - A = 300 - 1662 = -1362 \text{ (J)}$$

# Bilet 14

17) Преобразование компонент скорости при переходе в другую систему отсчета в СТО (вывод из преобразований Лоренца)

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad y' = y \quad t = \frac{t' + Vx'/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{и} \quad t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

по правилу.

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'/dt}{dt'/dt} \quad v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy'/dt}{dt'/dt}$$

получаем

$$v'_x = \frac{v_x - V}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

$$v'_y = \frac{v_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

$$v'_z = \frac{v_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

$$v_x = \frac{v'_x + V}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}$$

$$v_y = \frac{v'_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}$$

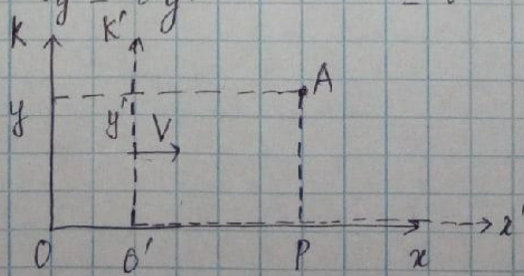
$$v_z = \frac{v'_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}$$

$$v' = \sqrt{v'^2_x + v'^2_y}$$

$$v' = \frac{\sqrt{(v_x - V)^2 + v_y^2 (1 - \beta^2)}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

Вывод относительная скорость не может быть больше скорости света.

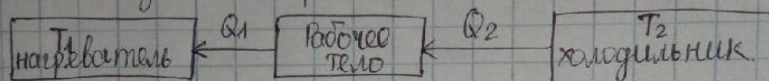
$$v'_x = v_x - V; \quad v'_y = v_y; \quad \vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}$$





24) Холодильная машина (блок-схема) КПД холодильной машины (холодильный коэффициент)

— Холодильная машина: это машина, работающая по обратному циклу Карно.  
(Если пропустить цикл в обратном направлении, тепло будет забираться у холодильника и передаваться нагревателю за счет работы внешних сил).



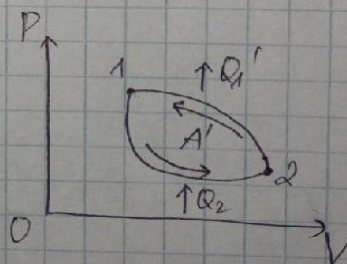
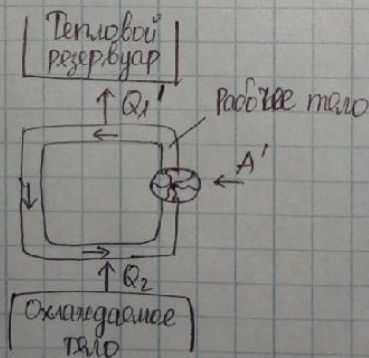
$Q_1 < 0$ ,  $Q_2 > 0$ , работа совершаемая над газом-строуаём  
 $A = (Q_1 + Q_2) < 0$ .

— Коэффициент полезного действия для холодильных машин, работающих по циклу Карно (один взгляд)

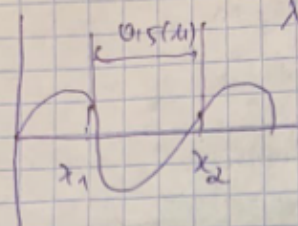
$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta_{\text{ХМ}} = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1' - Q_2}$$

Схема:



14,  $\lambda = 1(\text{м})$



$$\lambda = 1(\text{м}) \quad k = \frac{+2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{1(\text{м})} = 2\pi (\text{м}^{-1})$$

$$\text{разность } \varphi_{x_1} - \varphi_{x_2} = -k\Delta x = -k \cdot 0.5 = -2\pi \cdot 0.5 = -\pi$$

в точке  $x_1$ :

$$\xi_1 = A \cdot \cos(\omega t - kx_1 + \alpha)$$

в точке  $x_2$ :

$$\xi_2 = A \cdot \cos(\omega t - k(x_1 + \Delta x) + \alpha)$$

$$= A \cos(\omega t - kx_1 + k\Delta x + \alpha)$$

$$\langle v_1 = \xi_1' = -A\omega \sin(\omega t - kx_1 + \alpha)$$

$$v_2 = \xi_2' = -A\omega \sin(\omega t - kx_1 - k\Delta x + \alpha)$$

$$= -A\omega \sin(\omega t - kx_1 - \pi + \alpha)$$

$$= A\omega \sin(\pi - (\omega t - kx_1 + \alpha))$$

$$= A\omega \sin(\omega t - kx_1 + \alpha)$$

$$= -v_1$$

$\Rightarrow v_2 \uparrow \downarrow v_1$   
 берем  $\vec{v}$   $\vec{J} = \rho \cdot \vec{v}$

в точке 1:  $\vec{J}_1' = \rho \cdot \vec{v}_1'$

в точке 2:  $\vec{J}_2' = \rho \cdot \vec{v}_2'$

$\Rightarrow \vec{J}_1' \uparrow \downarrow \vec{J}_2' \quad |\vec{J}_1'| = |\vec{J}_2'|$



⑦ Объёмная плотность энергии упругой волны (вывод на примере плоской продольной волны). Вектор Умова (вектор плотности потока энергии).

— Объёмная плотность энергии упругой волны:

Работа по растяжению стержня идёт на увеличение внутренней энергии.

$$A = \int_0^x F(x) dx = \kappa \int_0^x x dx = \frac{\kappa x^2}{2} \quad U = \frac{\kappa x^2}{2}$$

Плотность энергии:  $u_n = \frac{U}{Sl}$

$$\kappa x = F = \sigma F, \quad \sigma = E \varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{x}{l}$$

$$U = \frac{Fx}{2} = \frac{\sigma F \cdot \varepsilon l}{2} = \frac{E \varepsilon^2 Sl}{2}, \quad u_n = \frac{E \varepsilon^2}{2}$$

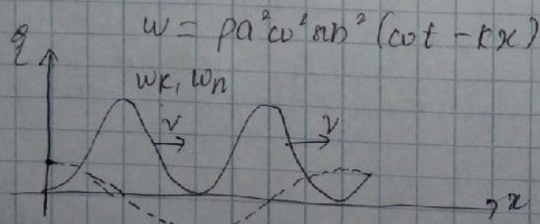
Плотность полной энергии:

$$\omega = u_k + u_n = \rho \frac{\dot{\xi}^2}{2} + \frac{E \varepsilon^2}{2}$$

Для твёрдого стержня  $E = \rho v^2$ ,

$$\omega = \frac{\rho}{2} \left[ \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} \right)^2 + v^2 \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \right]; \quad \omega = \rho \dot{\xi}^2$$

Для гармонической волны  $\xi = a \cos(\omega t - kx)$



Парадокс!

Изменения объёмных плотностей энергии синфазны.



## Примеры

продольной волны  
колебания в направлении  
распространения волны

Пример  $\vec{v}$   
звук в воздухе  
волна давления

## Волны

поперечной волны  
колебания в направ.  
перпендикулярном напр.  
распространения волны

$\updownarrow \updownarrow \updownarrow \rightarrow$   
электромагнитная волна  
волны на шнуре  
волны на поверхности  
жидкости.

— Вектор Умова

$$\vec{S} = w \cdot \vec{v}$$

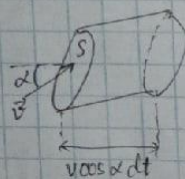
Поток энергии :  $\Phi = \frac{dw}{dt}$

$$j = \frac{d\Phi}{dS \perp}, \quad dw = w \cdot v \cdot dt \cdot dS \cos \alpha = w \cdot v \cdot dt \cdot dS_{\perp}$$

$$\frac{dw}{dt} = j \cdot S \cos \alpha, \quad \vec{S} = \vec{n} \cdot S$$

$(\vec{S}, \vec{S})$  — мощность переноса  
энергии через площадь определяется  
поток вектора Умова  
через эту площадь  $\frac{dw}{dt} = (\vec{S}, \vec{S})$

$\vec{v}$  — скорость, с которой энергия переносится  
 $\alpha$  — угол направления с нормалью некоторой  
малой площади  $S$

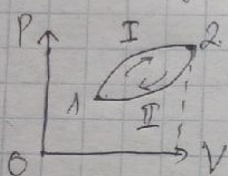




26) Термодинамическая энтропия (определение и обоснование того, что она является функцией состояния). Закон возрастания энтропии в замкнутой системе (с допущением).

Примечание: в ходе рассуждений, неравенство Клаузиуса можно считать известным.

Величина  $S$  является функцией, зависящей только от равновесного состояния термодинамической системы. Она не зависит от конкретного вида термодинамического процесса, приведшего систему в указанное состояние. Эта функция наз. термодинамической энтропией.



$$dS = \frac{\delta'Q}{T} \quad \text{или} \quad S_2 - S_1 = \int_{1 \rightarrow 2}^{\text{обратимый}} \frac{\delta Q}{T}$$

- Закон возрастания энтропии:

В адиабатически изолированной термодинамической системе энтропия не может убывать: она или сохраняется, если в системе происходят только обратимые процессы, или возрастает, если в системе протекает хотя бы один необратимый процесс.

$$\Delta S \geq 0$$

- Доказательство:

~~Запустим машину Карно по холодильному циклу и при этом она, например, забирает от холодильника 5 Дж и отдает нагревателю 10 Дж.~~

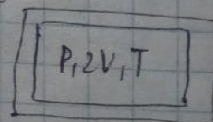
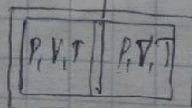
+ Возрастание энтропии при смешении газов.

$$\Delta S_1 = R \ln \left( \frac{2V}{V} \right) = R \ln 2$$

$$\Delta S_2 = R \ln \frac{2V}{V} = R \ln 2$$

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 2R \ln 2 > 0 \Rightarrow \text{процесс смешения необратимый.}$$

$\Delta S > 0$ , если газы одинаковые



18,

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = \text{const}$$

$$\gamma = \frac{i+2}{i} = \frac{6+2}{6} = \frac{4}{3} \quad (\text{CH}_4 \rightarrow i=6)$$

$$P_1 V_1^{\frac{4}{3}} = P_2 V_2^{\frac{4}{3}}$$

$$P_2 = 16 P_1$$

$$\rightarrow V_1^{\frac{4}{3}} = 16 V_2^{\frac{4}{3}}$$

$$V_1^4 = 16^3 V_2^4$$

$$V_1 = \sqrt[4]{16^3} V_2 = 2^3 V_2 = 8 V_2$$

нпу  $P = \text{const}$

$$C_P = C_V + R = \frac{i}{2} R + R = \frac{6}{2} R + R = 4R$$
$$= 4 \cdot 8,31 = 33,2$$



# Bilet 16

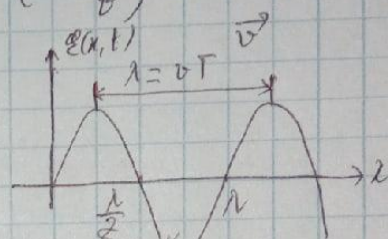
1) Уравнение плоской гармонической волны. Характеристики волны: период, частота, длина волны, волновое число и волновой вектор. Единицы измерения этих величин в СИ.

- Уравнение плоской гармонической волны:  
+ В начале координат  $x=0$   $\xi = \xi(0, t) = A \cos \omega t$   
+ Путь  $x$ , время  $t = \frac{x}{v}$

$$\xi(x, t) = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

$$\text{или } \xi = A \cos \omega \left[ \left( t - \frac{r}{v} \right) + \varphi \right]$$

$$\xi = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$



- Период  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  - время одного полного колебания  
-  $\omega$  - угловая циклическая частота по времени  
-  $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число.

- Длина волны:  $\lambda = \frac{2\pi}{k} = v \cdot T$  - расстояние, проходимое волной за время, равное периоду колебаний.  
 $\vec{k} = \frac{\omega}{v} \cdot \vec{n} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \vec{n}$  - волновой вектор.

$\frac{\omega}{k}$  - фазовая скорость; частота ( $\nu$ ) - число колебаний за единицу времени.

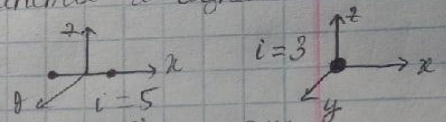
- Ед. измерения:

- + Период  $T$  (с)
- + Частота  $\nu$ : Гц (Герц)
- +  $\omega$ : рад/с
- +  $\lambda$ : м
- +  $k$ : м<sup>-1</sup>



(27) Определить число степеней свободы механической системы (число степеней свободы молекулы идеального газа. Равномерное распределение энергии по степеням свободы (ср. вывод) внутренняя энергия идеального газа (вывод по основе формулы для средней кинетической энергии поступательного движения молекулы).

2. Число степеней свободы нук. число независимых переменных, определяющих положение тела в пространстве и обозначается  $i$



• Положение материальной точки задаёт тремя координатами.

1. Число независимых между собой перемещений механической системы нук. число степеней свободы.

— Равномерное рас. энергии по степеням свободы:

$\langle \epsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$  — это и есть закон Бойльмана о равномерном распределении средней кинетической энергии по степеням свободы.

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращательного}} + 2i_{\text{колеб.}}$$

— Внутренняя энергия идеального газа представляет собой только кинетическую энергию движения его молекул.

$$U = E_k \cdot N, E_{k1} = \frac{mv^2}{2}$$

$$E_{ki} = \frac{i}{2} \frac{mv^2}{N}, U = \frac{i}{2} \cdot N \cdot \frac{m \cdot v^2}{N} = \frac{i}{2} \cdot kT, N = N_A \cdot \frac{m}{M}, v = \frac{m}{M}, v = \frac{N}{N_A}, R = N_A \cdot k.$$

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot RT = \frac{i}{2} \cdot PV.$$

$N$  — число молекул  
 $E_k$  — кинет. энергия  
 $U$  — внут.



16.

$$E = \gamma B_0$$

$$B = mc^2$$

$$B_0 = mc^2$$

$$u = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\rightarrow \begin{cases} E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4 \\ E = \gamma B_0 = \gamma m_0 c^2 \end{cases}$$

$$-1) \quad 5 m_0^2 c^4 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

$$-1) \quad p^2 c^2 = 4 m_0^2 c^4$$

$$(-) \quad p = 2 m_0 c$$

$$= 2.9,10 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8$$

$$= ?$$

## Bilet 17

⑩ Теплоёмкость идеального газа в изохорическом и изобарическом процессах (вывод с использованием формулы для внутренней энергии идеального газа) Уравнение Майера.

— Теплоёмкость газа при изохорном процессе ( $C_V$ ).

Для изохорного процесса первое начало термодинамики:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad dQ = dU \text{ т.к. } dA = 0$$

$$(U_\mu = C_V T) \quad C_V \cdot \nu \cdot \Delta T = \nu \cdot \frac{i}{2} R \Delta T \Rightarrow \boxed{C_V = \frac{i}{2} R}$$

$$\boxed{C_V = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU_\mu}{dT}}$$

— Молярная теплоёмкость газа при изобарическом процессе ( $C_P$ )

Для изобарного процесса первое начало термодинамики:

$$Q = \Delta U + p \Delta V, \quad p \Delta V = \nu R \Delta T.$$

$$\text{т. } C_P \cdot \nu \cdot \Delta T = \nu \cdot \frac{i}{2} R \Delta T + \nu R \Delta T.$$

$$\text{откуда } C_P = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R.$$

— Уравнение Майера:  $C_P = C_V + R$  (для одного моля газа)

Для произвольного количества газов:  $C_V = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} R$

$$C_P = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{(i+2)}{2} R$$

$R$  — универсальная газовая постоянная.



(19) Интервал между событиями в СТО. Инвариантность интервала (доказательство на основе преобразований Лоренца).

— Пространственно-временной интервал в СТО является инвариантом

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta l'^2 = \text{inv}$$

(инвариантность пространственно-временного интервала в СТО означает, что пространство псевдоевклидово)

— Инвариантность пространственно-временного интервала

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$$

$$\Delta s'^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2$$

Согласно формул

$$\Delta x' = \frac{\Delta x - V \Delta t}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \Delta y' = \Delta y$$

$$\Delta z' = \Delta z, \quad \Delta t' = \frac{\Delta t - \frac{V}{c^2} \Delta x}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\begin{aligned} \Delta s'^2 &= c^2 \frac{[\Delta t - \frac{V}{c^2} \Delta x]^2}{1 - \beta^2} - \frac{(\Delta x - V \Delta t)^2}{1 - \beta^2} - \Delta y^2 - \Delta z^2 = \\ &= c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = \Delta s^2 \end{aligned}$$

$$A = \int_{V_0}^{V_1} P \, dV = \int_{V_0}^{V_1} B \sqrt{V} \, dV$$

$$V_1 = 4V_0$$

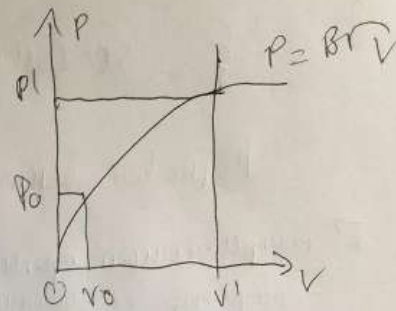
$$A = \int_{V_0}^{4V_0} B \sqrt{V} \, dV$$

$$= \frac{2}{3} B \sqrt{V} \Big|_{V_0}^{4V_0} = \frac{2}{3} B (8V_0\sqrt{V_0} - V_0\sqrt{V_0})$$

$$= \frac{14}{3} B V_0\sqrt{V_0}$$

$$P_0 = B\sqrt{V_0} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{V_0} = \frac{P_0}{B}$$

$$\Rightarrow A = \frac{14}{3} B \cdot \left(\frac{P_0}{B}\right)^3 = \frac{14}{3} \frac{P_0^3}{B^2}$$





# Bilet 18

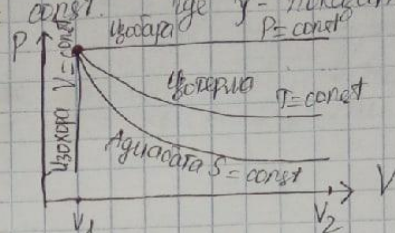
12) Адиабатический процесс. Вывод уравнения Пуассона для идеального газа на основе известных формул для  $C_p$  и  $C_v$ .

Адиабатический процесс: - процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

Адиабатический по началу изотропный процесс ( $\Delta S = 0$ ,  $S = \text{const}$ )

Уравнение адиабаты:  $P V^\gamma = \text{const}$ , где  $\gamma$  - показатель адиабаты.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$



- Вывод уравнение Пуассона.

$$P V^\gamma = \text{const}$$

,  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  - постоянная адиабаты (коэффициент Пуассона)

Из первого начала терм. термодинамики:

$$u = \frac{\nu \cdot RT}{\gamma - 1} = \frac{PV}{\gamma - 1}; \quad \left[ \delta Q = d\left(\frac{PV}{\gamma - 1}\right) + P dV \right]$$

$$d(PV) + (\gamma - 1)P dV = V dP + P dV + \gamma P dV - P dV = 0$$

$$V dP + \gamma P dV = 0 \quad | : PV$$

$$\frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0 \rightarrow \gamma d(\ln V) + d(\ln P) = 0$$

$$\rightarrow \ln V^\gamma + \ln P = \text{const} \quad [P V^\gamma = \text{const}]$$

$$P V^\gamma = \frac{\nu RT}{V} \cdot V^\gamma \sim [T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}]$$

$$P V^\gamma = T \cdot V^{\gamma-1} = T \cdot \left(\frac{\nu RT}{P}\right)^{\gamma-1} \sim [P^{1-\gamma} \cdot T^\gamma = T P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const}]$$

21) Выражение для импульса в СТО (без вывода).  
Основное уравнение релятивистской динамики (без вывода).

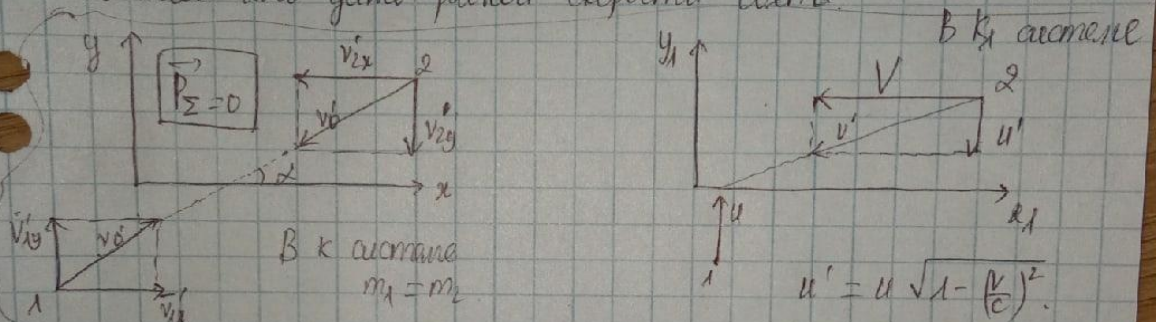
— Выражение для импульса в СТО:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Здесь и далее  $\beta = \frac{v}{c}$ .

→ никакое тело не может двигаться со скоростью большей или даже равной скорости света.



$$m_1 \cdot u = m_2 \cdot u'$$

$$m_2 = m_1 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

— Основное уравнение релятивистской динамики.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right) = F$$

Соответствует общему уравнению  $\frac{dp}{dt} = F$ .



18

$$\xi = 50 \cos(1800t - 10,6y - \pi/12)$$

полный вектор:  $\vec{k}$  :  $\vec{k}$

$\vec{k}$  направлен перпендикулярно фазовой поверхности волны в сторону её фронта.

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} = 10,6$$

длина волны:  $\lambda = \frac{2\pi}{|\vec{k}|} = \frac{2\pi}{10,6}$

Уравнение скорости колебаний частицы среды

$$\frac{d\xi}{dt} = -1800 \cdot 50 \cdot \sin(1800t - 10,6y - \pi/12)$$

$$\rightarrow V_{\max} = 1800 \cdot 50$$

Уравнение плотности энергии

$$\langle w = \frac{\rho \omega^2 A^2}{2} (1 - \cos(2[\omega t - kx + \alpha])) \rangle$$

$$w = \frac{1 \cdot 1800^2 \cdot 50^2}{2} (1 - \cos(2(1800t - 10,6y + \frac{\pi}{12})))$$

$$\rightarrow w_{\max} = \rho \omega^2 A^2$$

$$= 1 \cdot 1800^2 \cdot 50^2 = ?$$

## Bilet 19

20) Понятие политропического процесса. Примеры.

— Политропический процесс: процесс, при котором теплоёмкость газа остаётся постоянной  $C = \text{const}$ .

Политропический процесс - самый общий из всех изопроцессов.

Уравнение :  $PV^n = \text{const}$ ,  $n$  - показатель политропы

— Пример: поместите газ в цилиндр, закрепите поршень, поместите цилиндр в газ с горячей водой. Затем  $T$  увеличивается,  $P$  увеличивается, но  $V$  остаётся неизменным.



25) Связь между импульсом и энергией релятивистской частицы (вывод на основе известных выражений для полной энергии и релятивистского импульса)

$$\boxed{E = c \sqrt{m^2 c^2 + p^2}} \\ E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4 = \hbar \omega$$

$$\left( E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} ; \quad \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right), \quad \beta = \frac{v}{c}$$

никакое тело не может двигаться со скоростью большей или даже равной скорости света ( $v \rightarrow c, p \rightarrow \infty$ )

$E, p, m$  - полная энергия, импульс и масса частицы  
 $c$  - скорость света в вакууме

( Можно выделить 2 предельных случая.

1. Ультрарелятивистский. Кинетическая энергия частицы много ~~меньше~~ <sup>больше</sup> ее энергии покоя.

$$T \gg mc^2$$

$$p = \frac{T}{c} \text{ или } T = cp$$

2. Классический. Кинетическая энергия частицы много меньше ее энергии покоя

$$T \ll mc^2$$

$$p = \sqrt{2Tm} \text{ или } T = \frac{p^2}{2m}$$

19)

Зот  $i = 5$  — степень свободы

$\Rightarrow \gamma$  показатель адиабаты равно

$$\gamma = \frac{i+2}{i} = 1,4.$$

$$\Rightarrow T V^{\gamma-1} = \text{const}$$

$$\text{то } T_1 V_1^{0,4} = T_2 V_2^{0,4}$$

$$\Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{0,4} = \left( \frac{1}{32} \right)^{2/5}$$

$$\Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{4}$$

$$\text{откуда } T_2 = \frac{T_1}{4}$$



## Bilet 20

15) Вывод из преобразований Лоренца выражений для измерения промежутка времени между событиями в СТО и Лоренцева сокращения длины.

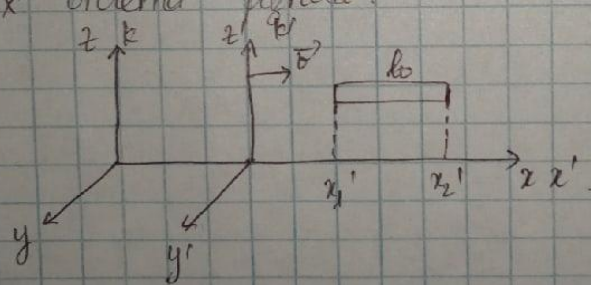
— Замедление времени (длительность событий в разных системах отсчета отличается)

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

(собственное время — минимально (движущиеся часы идут медленнее покоящихся))

$$t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{или} \quad \Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

— Лоренцево сокращение длины (длина тела в разных системах отсчета разная)



$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \text{или} \quad l = l_0 \sqrt{1-\beta^2}.$$

Длина движущегося тела короче, чем покоящегося.

3а) Неравенство Клаузиуса. Равенство Клаузиуса

Нер. Кл:  $\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$  или  $\Delta S_{\text{необратимый цикл}} \geq 0$

При любом необратимом процессе в замкнутой системе энтропия возрастает.

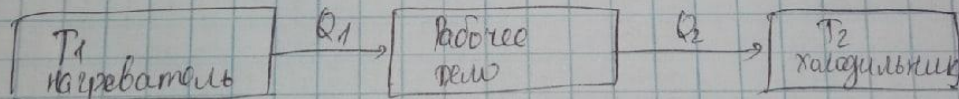
вывод: 1-ой и 2-ой теорема Карно.

$$\begin{aligned} \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1} &\leq \frac{T_1 - T_2}{T_1} \\ \rightarrow \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2'}{T_2} &\leq 0 \quad \rightarrow \frac{Q_1}{T_1} \leq \frac{Q_2'}{T_2} \\ \rightarrow \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2'}{T_2} &\leq 0 \quad (Q_2 = -Q_2') \\ \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} &\leq 0 \end{aligned}$$

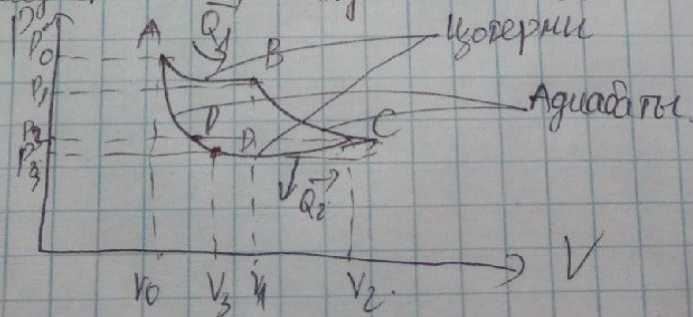
— Равенство Клау.

$$\Delta S_{\text{обр}} = 0, \quad \text{т.к.} \quad \oint \frac{dQ_{\text{обр}}}{T} = 0$$

(Обратимый цикл Карно)



Изменение энтропии газа  $\Delta S_{\text{газа}} = 0$ , т.к. газ возвращается в исходное состояние.





Бюджет 20

$$\xi_1 = \frac{15}{\sqrt{2}} \cos(600t - 15,6^\circ + \frac{\pi}{2}), \quad \xi \text{ в миллиметрах} \quad \text{[МММ]}$$

ур-е сферического волн

$$g = \frac{A_0}{2} \cos(\omega t - kx + \alpha)$$

Yacmona! W-5 det V

$$v = \frac{w}{25} = \frac{600}{25} = 95,49 \text{ PLH}$$

Рабочая сигнатура:  $25 = \left| K = \frac{\omega}{\nu} \right| = \frac{\omega}{K} = \frac{800}{15,6} = 38,46 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Длина волны:  $\lambda = \frac{2\pi}{k} \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{15,6} = 0,40 \text{ м}$

максимальное ускорение:  $v_{\text{ср}} = \frac{d\phi}{dt} = \phi'$

частью средн

you & I

Аср 5  $\xi'$  5  $\nu_{cp}''$

$$6 \frac{1}{5} (15 \cos(600t - 15.6 + \frac{\pi}{2}))'_{\text{S}}$$

$$= -15 \sin(600t - 15.6 + \frac{\pi}{2}) \cdot 600$$

$$\xi'' = -9000 \cos(600t - 15,6 + \frac{\pi}{5}) \cdot 6005$$

$$= -54 \cdot 10^5 \cos(\underbrace{600t - 15,6 + \frac{\pi}{3}}_x)$$

$$-1 \leq \cos x \leq 1$$

Минс. знач. при  $\cos \alpha = 1$ , т.е.

$$a_{cp \text{ max}} = 54 \cdot 10^5 \frac{\text{мкм}}{\text{с}^2}$$

③ Стоячая волна. Уравнение стоячей волны (вывод из уравнения бегущей волны). Узлы и пучности.

— Стоячая волна явление интерференции волн, распространяющихся в противоположных направлениях, при котором перенос энергии ослаблен или отсутствует.

— Уравнение стоячей волны

$$\xi = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos \omega t$$

$$\xi = A^* \cos \omega t, \text{ где } A^* = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

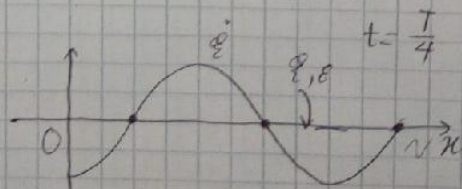
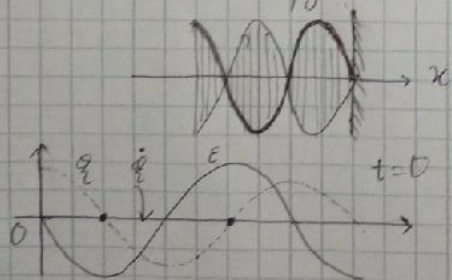
$$\left( \begin{array}{l} \xi_1 = A \cos(\omega t - kx) \\ \xi_2 = A \cos(\omega t + kx) \end{array} \right. \text{ начальная фаза } \varphi = 0.$$

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos\left(\frac{\omega t - kx + \omega t + kx}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega t - kx - \omega t + kx}{2}\right) \\ &= 2A \cos \omega t \cos kx = 2A \cos kx \cos \omega t. \quad \left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right) \end{aligned}$$

— В точках, где координаты удовлетворяют условию  $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $\cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) = 1$ , суммарная амплитуда равна максимальному значению  $A^* = 2A$  — это пучности стоячей волны.

Координаты пучностей:  $x_{\text{пучн}} = \pm n \frac{\lambda}{2}$ .

— В точках, координаты которых удовлетворяют условию  $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ),  $\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = 0$  и суммарная амплитуда колебаний равно нулю  $A^* = 0$  — это узлы стоячей волны. Координаты узлов:  $x_{\text{узел}} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}$ .

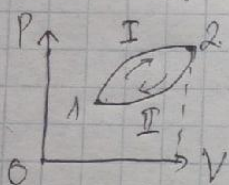




26) Термодинамическая энтропия (определение и обоснование того, что она является функцией состояния) Закон возрастания энтропии в замкнутой системе (с допущением)

Примечание: в ходе рассуждений, неравенство Клаузиуса можно считать известным.

Величина  $S$  является функцией, зависящей только от равновесного состояния термодинамической системы. Она не зависит от конкретного вида термодинамического процесса, приведшего систему в указанное состояние. Эта функция наз. термодинамической энтропией.



$$dS = \frac{d'Q}{T} \quad \text{или} \quad S_2 - S_1 = \int_{1 \rightarrow 2} \frac{\delta Q}{T} \quad \text{обратимый}$$

Закон возрастания энтропии:

В адиабатически изолированной термодинамической системе энтропия не может убывать: она или сохраняется, если в системе происходят только обратимые процессы, или возрастает, если в системе протекает хотя бы один необратимый процесс.

$$\Delta S \geq 0$$

Доказательство:

~~Запустим машину Карно по холодильному циклу и при этом она, например, забирает от холодильника  $5 \text{ Дж}$  и отдает нагревателю  $10 \text{ Дж}$ .~~

Возрастание энтропии при смешении газов.

$$\Delta S_1 = R \ln \left( \frac{2V}{V} \right) = R \ln 2$$

$$\Delta S_2 = R \ln \left( \frac{2V}{V} \right) = R \ln 2$$

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 2R \ln 2 > 0 \Rightarrow \text{процесс смешения необратимый.}$$

$\Delta S > 0$ , если газы одинаковые

|           |           |
|-----------|-----------|
| $P, V, T$ | $P, V, T$ |
|-----------|-----------|

|            |
|------------|
| $P, 2V, T$ |
|------------|

21

3) , показател адиабаты :

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \frac{i+2}{i} \\ i = 3 - \text{для одноатомного газа} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \gamma = 1,67$$

• уравнение Пуассона:

$$P \cdot V^{\gamma} = \text{const}$$

и еще: ~~PV~~ = уравнение Менделеева - Клапейрона

$$P V = \frac{m}{M} R T$$

$$\Rightarrow P \cdot V^{\gamma} = \cancel{\gamma V^{\gamma-1}} \frac{m}{M} R \cdot T \frac{V^{\gamma}}{V}$$

$$\Rightarrow T V^{\gamma-1} = \text{const}$$

$$\Rightarrow T V^{0,67} = \text{const}$$





④ Основное уравнение МКТ идеального газа (с выводом)  
 Средняя кинетическая энергия поступательного  
 движения молекул (с выводом)

— Основное уравнение МКТ идеального газа:  
 (молекулярно-кинетической теории газов)

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

(давление газов определяется средней кинетической  
 энергией поступательного движения молекул и  
 их плотностью).

$p$  - давление (Па = Н/м<sup>2</sup>)

$n$  - концентрация газа (1/м<sup>3</sup>)

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  (Дж/К)

$m_0$  - масса молекулы (кг)

$v$  - средняя скорость молекул (м/с)

$T$  - абсолютная температура газа (°C + 273)  
 (К)

$E_k$  - средняя кинетическая энергия  
 молекул газа. (Дж)

— Средняя кинетическая энергия молекул  
 идеального газа.

$$\overline{E_k} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{i}{2} k T.$$

$i$  - число степеней свободы, для одноатомного  
 газа  $i = 3$ .

в том отношении Лорессона для идеального

⑪ Постулаты специальной теории относительности (СТО)  
Область применимости СТО.

- 1-й Принцип относительности:

Все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой (происходят одинаково во всех инерциальных системах отсчета).

- 2-й принцип относительности:

Скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

- Область применимости СТО: СТО применима для изучения движения тел с любыми скоростями (в том числе близкими или равными скорости света) при условии отсутствия очень сильных гравитационных полей.



22

уравнение:

$$\xi = A \cos(\omega t - kx + \alpha)$$
$$\rightarrow \xi = 2 \cos(1000t - 10x + \alpha)$$

$$\rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{10} = \frac{\pi}{5} \approx 0,63 \text{ m.}$$

• фазовая скорость:

$$v_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{k} = \frac{1000}{10} = 100 \text{ m/s}$$

• что ускорение и амплитуда фазы

$$a = \xi'' = v'_{\text{фаз}}$$

$$\rightarrow \xi' = -2000 \sin(\omega t - kx + \alpha)$$

$$\rightarrow \xi'' = -2 \cdot 10^6 \cos(\omega t - kx + \alpha)$$

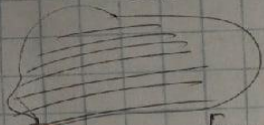
$$\rightarrow a_{\text{max}} \oplus \cos \psi = -1$$

$$\rightarrow a = 2 \cdot 10^6$$

③ Понятия плоских и сферических волн. Уравнение сферической волны (без вывода)

— Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе наз. волновой поверхностью.

Волны, волновые поверхности которых представляют собой плоскости, наз. плоскими.  $\omega t \pm kx = \text{const}$



$$\xi = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

— Если волновая поверхность — сфера, то волна наз. сферической.

$$\xi = \frac{A}{r} \cdot \cos \omega \left( t - \frac{r}{v} \right) = \frac{A}{r} \cos (\omega t - kr)$$

$k$  — скаляр

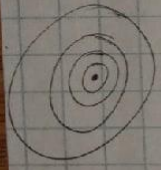
$\frac{A}{r}$  — убывающая амплитуда колебаний

$\omega$  — круговая частота.

$k$  — волновое число

$r$  — радиус

$r \rightarrow 0 \Rightarrow A \rightarrow \frac{1}{r} \cdot (A \rightarrow \infty)$



$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Пример:

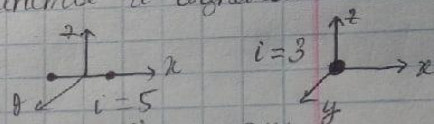
плоская волна: волна, возникающая в цилиндре с газом, при совершении колебаний поршня

сфер. вол. — волны, генерируемые точечным источником в однородной среде



27) Опр. число степеней свободы механической системы (число степеней свободы молекул идеального газа. Равномерное распределение энергии по степеням свободы (бв. выводу) внутренней энергии идеального газа (вывод по основе формул для средней кинетической энергии поступательного движения молекул).

2. Число степеней свободы поз. число независимых переменных, определяющих положение тела в пространстве и обозначается  $i$



• Положение материальной точки (бв.) задаёт тремя координатами.

4. Число независимых между собой перемещений механической системы поз. число степеней свободы.

— Равномерное рас. энергии по степеням свободы:

$\langle \epsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$  — это и есть закон Бойльмана о равномерном распределении средней кинетической энергии по степеням свободы.

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращательного}} + 2i_{\text{колеб.}}$$

— Внутренняя энергия идеального газа представляет собой только кинетическую энергию движения его молекул.

$$U = E_k \cdot N, E_k = \frac{mv^2}{2}$$

$$E_{ki} = \frac{i}{2} mv^2; U = \frac{i}{2} \cdot N \cdot m \cdot v^2, N = N_A \cdot \frac{m}{M}, v = \frac{m}{M}, v = \frac{N}{N_A}$$

$$R = N_A \cdot k.$$

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot RT = \frac{i}{2} \cdot PV.$$

$N$  — число молекул  
 $E_k$  — кинет. энергия  
 $U$  — внут.

23.

Дано

$$i = 5$$

$$T = 293 \text{ K}$$

$$U = 1500 \text{ Дж}$$

Найти

$N$ ?

$$U = \sum_{k=0}^N W_k = N \cdot \frac{i}{2} \cdot K \cdot T$$

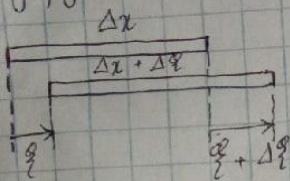
$$\Rightarrow N = \frac{2U}{iKT} = \frac{2 \cdot 1500}{5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293} \approx 1,48 \cdot 10^{23} \text{ молекул}$$

25.



⑤ Одномерное волновое уравнение для продольной упругой волны в твердом теле (с выводом), общий вид волнового уравнения (без вывода)

— Одномерное волновое уравнение для продольной упругой волны в твердом теле.



Относительная продольная деформация:  

$$\varepsilon = \frac{\partial \xi}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta \xi}{\Delta x}$$

$x$  - координата сечения стержня.  
 $\xi$  - смещение сечения  $\xi(x, t)$

Закон Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$\sigma$  - напряжение  
 $E$  - модуль Юнга

Масса и ускорение участка стержня.

$$m = \rho_0 S \Delta x, \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = a$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{1}{v} \frac{\partial \xi}{\partial t}$$

$\frac{\partial \xi}{\partial t} = u_x$  - это проекция скорости частицы среды, движущейся около своего положения равновесия.

— Общее волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\xi'_{\varphi}) = \frac{\partial \xi'_{\varphi}}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \xi''_{\varphi}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = -\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial x} (\xi'_{\varphi}) = -\frac{1}{v} \cdot \frac{\partial \xi'_{\varphi}}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} =$$

$$= -\frac{1}{v} \xi''_{\varphi} \cdot \left( -\frac{1}{v} \right) = \frac{1}{v^2} \cdot \xi''_{\varphi}$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}}$$

$$\xi = f_1 \left( t - \frac{x}{v} \right) + f_2 \left( t + \frac{x}{v} \right)$$



(29)

## Принцип Ле Шателье - Брауна

~~Если на систему, находящуюся в состоянии~~

"Внешние воздействия, выводящие термодинамическую систему из состояния устойчивого равновесия, вызывают в ней протекание процессов, которые уменьшают влияние этих внешних возмущений."

(— Значение принцип. состоит в том, что он позволяет представлять направление, в котором под влиянием внешнего воздействия, изменится термодинамический процесс.

Напр: если смесь воды и льда, находящаяся в равновесии при  $0^{\circ}\text{C}$ , отвести теплоту, то лёд начнет таять с поглощением этой теплоты.

если наоборот, отдаст теплоту, то вода начнет замерзать с выделением теплоты.)



# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

## ЗАДАЧА №40

Найти удельную теплоемкость с кислорода для: а)  $V = \text{const}$ ; б)  $p = \text{const}$

Дано:

$$\mu = 0,032 \text{ кг/моль}$$

$$i = 5$$

$$c_V = ? \quad c_p = ?$$

Решение:

Удельная теплоемкость газа при постоянном давлении

$$c_p = \frac{C_p}{\mu} = \frac{i+2}{2 \cdot \mu} R = \frac{5+2}{2 \cdot 0,032} \cdot 8,31 = 908,91 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Удельная теплоемкость газа при постоянном объеме

$$c_V = \frac{C_V}{\mu} = \frac{i}{2 \cdot \mu} R = \frac{5}{2 \cdot 0,032} \cdot 8,31 = 649,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$\text{Ответ: } c_p = 908,91 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad c_V = 649,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

23) Кинетическая энергия релятивистской частицы (выведите, считая известным основное уравнение релятивистской динамики). Полная энергия и энергия покоя в СТО.

— Кинетическая энергия релятивистской частицы.

$$T = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$$

$$\left( dE_k = dA, \quad v \frac{d}{dt} \left( \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) dt = F ds \right.$$

$$dE_k = v \frac{d}{dt} \left( \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) dt = v \cdot d \left( \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$$

$$= v \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} d(mv) + mv d \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \right] =$$

$$= v \cdot \left( \frac{m dv}{\sqrt{1-\beta^2}} + \frac{v \cdot m \beta^2 dv}{(\sqrt{1-\beta^2})^3} \right)$$

$$= \frac{(1-\beta^2) \cdot m dv + \beta^2 \cdot m dv}{(1-\beta^2)^{3/2}} = \frac{m dv}{(1-\beta^2)^{3/2}}$$

$$= d \left( \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \Rightarrow E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} + \text{const.}$$

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - mc^2 = \dots$$

— Полная энергия в СТО

$$\left[ E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right]$$

при  $v=0$   $E_0 = mc^2$

— Энергия покоя в СТО

$$\boxed{E_0 = mc^2}$$

(при  $v=0$ )

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\Rightarrow E = c \sqrt{m^2 c^2 + p^2}$$

$$E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4 = \text{inv}$$



28) Третье начало термодинамики (только формулировка).

— При приближении температуры к абсолютному нулю энтропия макросистемы также стремится к нулю.

$$S \rightarrow 0 \text{ при } T \rightarrow 0$$

$$S(P, T) = \int_0^T \frac{C_p(T') dT'}{T'}$$

$$\left( ds = \frac{\delta Q}{T}, \quad \delta Q = dU + \delta A = \frac{M}{\mu} \cdot C_v dT + \frac{M}{\mu} \cdot RT \frac{dV}{V} \right)$$

$$\rightarrow S = \frac{M}{\mu} \cdot C_v \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \frac{M}{\mu} \cdot RT \cdot \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow T \rightarrow 0 \rightarrow S \rightarrow 0$$

25.

Dano

$$T_1 = 300 \text{ K}$$

$$V = 1 \text{ mol}$$

$$O_2$$

$$V_2/V_1 = 2, \quad V = \text{const}$$

Найти

$$Q = ?$$

~~и работа~~

$$\Delta U = \nu \frac{5}{2} \cdot R \Delta T = \nu \frac{5}{2} R (T_2 - T_1)$$

$$v = \sqrt{\frac{3RT}{M_0}} = \sqrt{\frac{3R\bar{M}}{M}}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{3RT_1}{M}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \cdot 300}{32 \cdot 10^{-3}}} = 483 \text{ (м/с)}$$

$$v_2 = 2v_1 = 966$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{3RT_2}{M}} \Rightarrow T_2 = \frac{v_2^2 \cdot M}{3R} = 4 \cdot \frac{3RT_1 \cdot M}{M \cdot 3R} = 4T_1$$

$$Q = \sum_2 \nu \cdot R (4T_1 - T_1) = \sum_2 \cdot 1 \cdot 8,31 \cdot 3 \cdot 300 = 6232,5 \text{ Дж}$$



⑧ Понятия квазистатических, обратимых и необратимых проц.

— Квазистатический процесс. В термодинамике - относительно медленный процесс (то есть переход термодинамической системы из одного состояния в другое), длительность протекания которого намного превышает характерное время релаксации системы.

— Процесс наз. обратимым, если он протекает таким образом, что после окончания процесса он может быть проведен в обратном направлении через все те же промежуточные состояния, что и прямой процесс.

— Процесс наз. необратимым, если он протекает так, что после его окончания систему нельзя вернуть в начальное состояние через прежние промежуточные состояния.

(например: обратимый: процесс адиабатического расширения или сжатия газа)



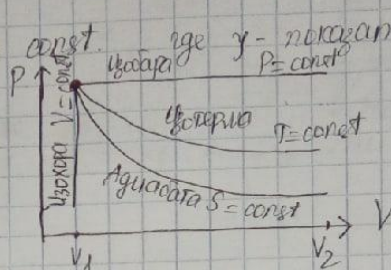
12) Адиабатический процесс. Вывод уравнения Пуассона для идеального газа на основе известных формул для  $C_p$  и  $C_v$ .

Адиабатический процесс: - процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

Адиабатический по закону изэнтропийный процесс ( $\Delta S = 0$ ,  $S = \text{const}$ )

Уравнение адиабаты:  $P V^\gamma = \text{const}$ , где  $\gamma$  - показатель адиабаты.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$



Вывод уравнения Пуассона:

$$P V^\gamma = \text{const}$$

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  - постоянная адиабаты (коэффициент Пуассона)

Из первого начала терм. термодинамики:

$$\mu = \frac{\nu \cdot RT}{\gamma - 1} = \frac{PV}{\gamma - 1}; \quad \left[ \delta Q = d\left(\frac{PV}{\gamma - 1}\right) + PdV \right]$$

$$d(PV) + (\gamma - 1)PdV = VdP + PdV + \gamma PdV - PdV = 0$$

$$VdP + \gamma PdV = 0 \quad | : PV$$

$$\frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0 \rightarrow \gamma d(\ln V) + d(\ln P) = 0$$

$$\rightarrow \ln V^\gamma + \ln P = \text{const} \quad \boxed{PV^\gamma = \text{const}}$$

$$PV^\gamma = \frac{\nu RT}{V} \cdot V^\gamma \sim \boxed{T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}}$$

$$PV^\gamma = T \cdot V^{\gamma-1} = T \cdot \left(\frac{\nu RT}{P}\right)^{\gamma-1} \sim \boxed{P^{1-\gamma} \cdot T^\gamma = T P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const}}$$



2b.

|      |                          |
|------|--------------------------|
| Дано | $m_1, m_2$<br>$v_1, v_2$ |
|------|--------------------------|

|       |         |
|-------|---------|
| Найти | $M = ?$ |
|-------|---------|

$$Mc^2 = \frac{m_1 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} + \frac{m_2 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}}$$

$$\Rightarrow M = \frac{m_1}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} + \frac{m_2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}}$$

21) Выражение для импульса в СТО (без вывода).  
Основное уравнение релятивистской динамики (без вывода).

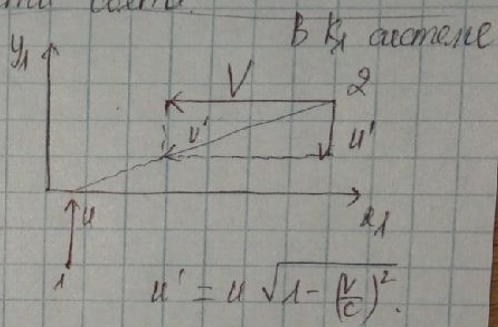
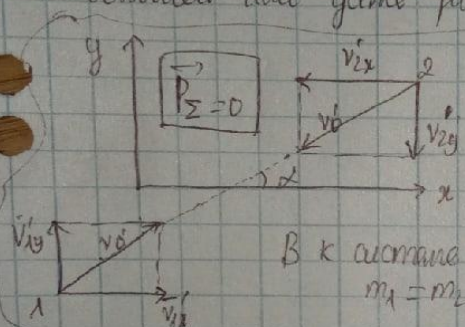
Выражение для импульса в СТО:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Здесь и далее  $\beta = \frac{v}{c}$ .

→ никакое тело не может двигаться со скоростью большей или даже равной скорости света.



$$m_1 \cdot u = m_2 \cdot u'$$

$$m_2 = m_1 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Основное уравнение релятивистской динамики.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right) = F$$

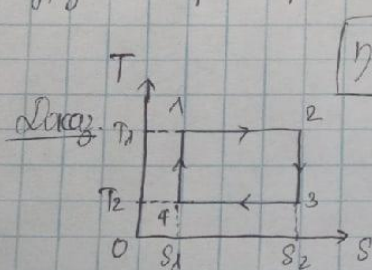
Соответствует общему уравнению  $\frac{dp}{dt} = F$ .



(30) Идеальная тепловая машина Теорема Карно (Аналог теоремы Карно), с доказательством. КПД цикла Карно (вывод выражения для КПД и обоснование справедливости полученного выражения для рабочего тела любой природы).

Идеальная тепловая машина - машина в которой произведенная работа и разность между количеством подведенного и отведенного тепла равны.

Теорема Карно: (коэффициент полезного действия) КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно, не зависит от природы используемого рабочего вещества, определяется только температурами нагревателя и охладителя и не зависит от других параметров цикла



$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Процесс 1-2 - это изотермическое расширение при температуре  $T_1$  нагревателя (энтропия при расширении возрастает)  
 3-4 - изотермическое сжатие при тем.  $T_2$  охладителя (энтропия уменьшается)  
 2-3 - адиабатическое расширение (тем. при этом понижается)  
 4-1 - адиабатическое сжатие (тем. повышается)

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

$Q_1$  - количество теплоты, полученной рабочим телом от нагревателя  
 $Q_2$  - количество теплоты, отданной рабочим телом охладителю

$$Q_1 = T_1 (S_2 - S_1), \quad Q_2 = T_2 (S_2 - S_1), \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

КПД цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и определяется только температурами нагревателя и охладителя.

$$\eta_{\text{Карно}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \left( = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \right)$$

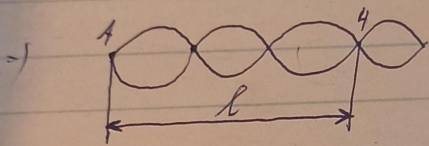
Билет 207

Дано:  $l = 18 \text{ см}$ .

$\lambda = ?$

Реш:

расстояние между двумя сосед. узлами:  $\frac{\lambda}{2}$



$$l = \frac{3\lambda}{2} = 18 \text{ см}$$

$$\rightarrow \lambda = \frac{2 \cdot 18}{3} = 12 \text{ см}$$

ответ: 12 см



# Bilet 28

③ Понятия плоских и сферических волн. Уравнение сферической волны (без вывода)

Геометрическое место точек, колеблющихся одинаково в одинаковой фазе наз. волновой поверхностью.

Волны, волновые поверхности которых представляют собой плоскости, наз. плоскими.  $\omega t \pm kx = \text{const}$

$$\xi = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

Если волновая поверхность - сфера, то волна наз. сферической.

$$\xi = \frac{A}{r} \cdot \cos \omega \left( t - \frac{r}{v} \right) = \frac{A}{r} \cos (\omega t - kr)$$

$k$  - скаляр

$\frac{A}{r}$  - убывающая амплитуда колебаний

$\omega$  - круговая частота.

$k$  - волновое число

$r$  - радиус

$$r \rightarrow 0 \Rightarrow A \rightarrow \frac{1}{r} \cdot (A \rightarrow \infty)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Пример:

плоская волна: волна, возникающая в цилиндре с газом, при совершении колебаний поршня

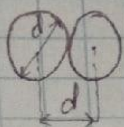
сфер. во. - волны, генерируемые точечным источником в однородной среде



22) Понятие эффективного диаметра молекулы.  
Вывод формулы для длины свободного пробега молекул идеального газа.

— Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, наз. эффективным диаметром.

$$\sigma = \pi d^2$$



— Расстояние, проходимое молекулой в среднем без столкновений, наз. средней длиной свободного пробега.

$$\langle \lambda \rangle = \lambda_{\text{ср.}} = \frac{1}{\nu}$$

$\nu$  — средняя скорость теплового движения,  
 $\tau$  — среднее время между двумя столкновениями.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2} n d^2 n} \quad ; \quad \nu = \sqrt{2} n d^2 \langle v^* \rangle n$$

$$\boxed{\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} n d^2 P} = \frac{kT}{\sqrt{2} 6 P}}$$

$$P = nkT \quad n = \frac{P}{kT} \quad (P: \text{давление})$$



Вариант 28.

Дано:  $V = 2 \text{ л}$  ( $\text{CO}_2$ ,  $i = 5$ ),  $\rho = 1,6 \text{ кг/м}^3 = 1,6 \text{ г/л}$

$\mu = 44 \text{ г/моль}$ ,  $\Delta t = 100^\circ \text{C} = 100^\circ \text{K}$

$Q = ?$

Реш:

масса нагреваемого газа:  $m = \rho \cdot V$

количество  $Q$ , сообщенное газу:

$$Q = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} \cdot R (T_2 - T_1) = \frac{\rho \cdot V}{\mu} \cdot \frac{i}{2} \cdot R \Delta t$$

$$= \frac{1,6 \cdot 2}{44} \cdot \frac{6}{2} \cdot 8,314 \cdot 100 = 181,4 \text{ Дж}$$

$i$  — степени свободы газа.

$\text{CO}_2$ :  $i = 6$

ответ:  $Q = 181,4 \text{ Дж}$

13) Преобразования Лоренца для координат и времени (выбег из постулатов СТО)

$$K' \rightarrow K$$

$$x = \frac{x' + V \cdot t'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$K \rightarrow K'$$

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$\beta = \frac{V}{c}$  - отношение скорости движущейся системы отсчета к скорости света.



## 29) Принцип Ле Шателье - Брауна

Если на систему, находящуюся в состоянии

равновесия, оказываются внешние воздействия, выводящие термодинамическую систему из состояния устойчивого равновесия, вызываются в ней процессы, которые уменьшают влияние этих внешних воздействий."

(Значение принцип: состоит в том, что он позволяет предсказывать направление, в котором под влиянием внешнего воздействия изменится термодинамический процесс.

Напр: если смесь воды и льда, находящаяся в равновесии при  $0^{\circ}\text{C}$ , сообщить теплоту, то лёд начнет таять с поглощением этой теплоты.

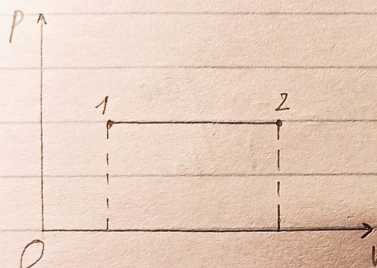
Если наоборот, от неё отвести теплоту, то вода начнет замерзать с выделением теплоты.)

Вариант 29

Дано:  $\text{CO}_2$ ,  $i = 6$ ,  $m = 8 \text{ г}$ ,  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 44 \text{ г/моль}$ .  
 $= 20^\circ\text{K}$

$A = ?$ ,  $\Delta U = ?$

Реш:



Работа в изобарическом процессе

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

Из уравнения Менделеев-Клапейрона

$$p \Delta V = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot \Delta t$$

$$\Rightarrow A = p \cdot \Delta V = \frac{m}{\mu} \cdot R \Delta t = \frac{8}{44} \cdot 8,314 \cdot 20 = 30,2 \text{ (Дж)}$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} \cdot R \Delta t = \frac{8}{44} \cdot \frac{6}{2} \cdot 8,314 \cdot 20 = 90,7 \text{ (Дж)}$$



# Bilet 30

17) Преобразование компонент скорости при переходе в другую систему отсчета в СТО (вывод из преобразования Лоренца)

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad y' = y \quad t = \frac{t' + Vx'/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{и} \quad t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

по правилу.

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'/dt}{dt'/dt} \quad v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy'/dt}{dt'/dt}$$

получаем

$$v'_x = \frac{v_x - V}{1 - \frac{v_x V}{c^2}} \quad v'_y = \frac{v_y \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

$$v'_z = \frac{v_z \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

$$v_x = \frac{v'_x + V}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}$$

$$v_y = \frac{v'_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}$$

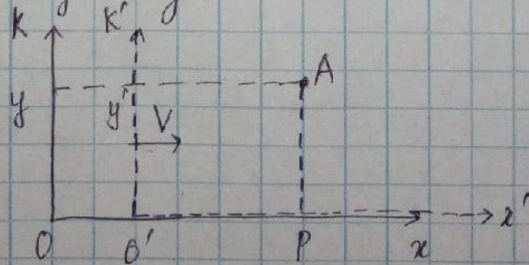
$$v_z = \frac{v'_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}$$

$$v' = \sqrt{v'^2_x + v'^2_y}$$

$$v' = \frac{\sqrt{(v_x - V)^2 + v_y^2 (1 - \beta^2)}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}}$$

Вывод относительная скорость не может быть больше скорости света.

$$v'_x = v_x - V; \quad v'_y = v_y \cdot \sqrt{1 - \beta^2} \quad \vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}$$



28) Третье начало термодинамики (только формулировка).

— При приближении температуры к абсолютному нулю энтропия макросистемы также стремится к нулю.

$$S \rightarrow 0 \text{ при } T \rightarrow 0$$

$$S(P, T) = \int_0^T \frac{C_p(T)}{T} dT$$

$$\left( ds = \frac{\delta Q}{T}, \quad \delta Q = du + \delta A = \frac{M}{\mu} \cdot C_v dT + \frac{M}{\mu} \cdot RT \frac{dV}{V} \right)$$

$$\rightarrow S = \frac{M}{\mu} \cdot C_v \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + \frac{M}{\mu} \cdot RT \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow T \rightarrow 0 \rightarrow S \rightarrow 0$$



Билет 30

Дано:  $i = 6$  (резистивный),  $p = \frac{\alpha}{V^2}$ ,  $V_1 = V_0$ ,  $V_2 = 3V_0$

$A = ?$

Реш:

Работа, совершаемая газом:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_0}^{3V_0} \frac{\alpha}{V^2} dV = \frac{-\alpha}{V} \Big|_{V_0}^{3V_0}$$

$$= \frac{-\alpha}{3V_0} + \frac{\alpha}{V_0}$$

$$= \frac{2\alpha}{3V_0} \text{ (д.р.)}$$

Ответ:  $A = \frac{2\alpha}{3V_0} \text{ (д.р.)}$