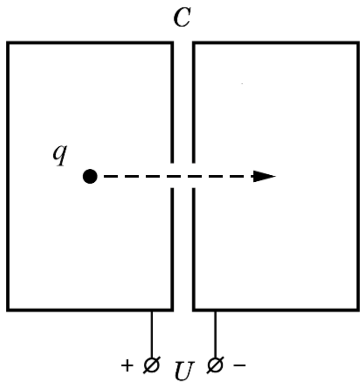
Задача 2.11.1. Разгон при отключённом источнике (12 баллов). Две одинаковые проводящие оболочки в форме цилиндров с малыми отверстиями на общей оси образуют конденсатор ёмкостью C. В центре левой оболочки удерживают шарик с зарядом q. Суммарный заряд всей системы, включая заряд шарика, равен нулю. Конденсатор заряжают, подключив к источнику с напряжением U, затем отключают от источника и отпускают шарик. Шарик начинает двигаться вдоль оси и, пролетев через отверстия, попадает внутрь правой оболочки.



Какую кинетическую энергию будет иметь шарик в центре правой оболочки?

При каком заряде шарика эта энергия максимальна и чему она равна?

Выделением тепла из-за тока в оболочках можно пренебречь. Поле тяжести не учитывайте.

Возможное решение. (И. Воробьев).

1. Вначале на внутренней поверхности левой полости имеется экранирующий заряд $-q$, что даёт нуль в сумме с зарядом шарика. На внутренней поверхности правой полости заряда нет.

2. После подключения источника, полный заряд системы остается равным нулю. Заряды на внешних поверхностях оболочек противоположные по знаку, а так как оболочки образуют конденсатор ёмкостью C, то эти заряды равны $Q_о = CU$ и $-Q_о$.

3. После перемещения шарика в центр правой оболочки к заряду $Q_о = CU$ левой оболочки добавится заряд $-q$ с её внутренней поверхности, а к заряду $-Q_о$ правой оболочки добавится заряд q из-за ухода заряда $-q$ на поверхность полости правой оболочки (для экранировки заряда шарика). Таким образом, заряды на внешних поверхностях станут равными Q и $-Q$, где $Q = CU - q$. Напряжение на конденсаторе при этом станет равным $V = U - q/C$.

4. Ввиду такого же, как в левом цилиндре, расположения заряда q справа, энергия его взаимодействия с «экранирующими» зарядами на внутренней поверхности цилиндра не изменится.

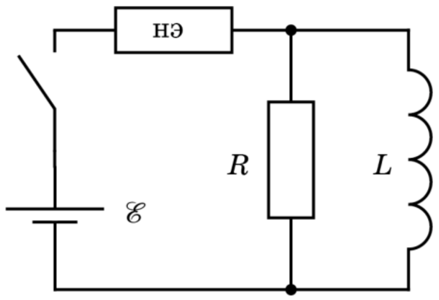
5. Изменяется только кинетическая энергия шарика и энергия конденсатора. Тогда при отсутствии потерь энергии $CU^2/2 = CV^2/2 + K$, где K - кинетическая энергия шарика в центре правой оболочки. $K = qU - q^2/2C$.

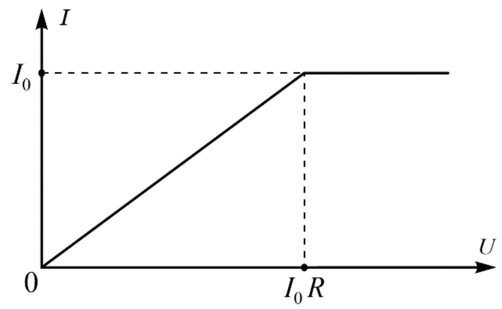
6. Наибольшая кинетическая энергия отвечает случаю $V = U - q/C = 0$, тогда $q = CU$, а $K = CU^2/2$.

Примечание: При q, много меньшем CU, $K \cong qU$. В общем случае нужно учесть наведённые заряды и связанное с этим изменение напряжения между электродами. Важно понять, что потенциальная энергия системы складывается из энергии взаимодействия заряда с «экранирующими» зарядами на внутренней поверхности цилиндра и энергии конденсатора.

№	**Задача 2.11.1. Критерий (12 баллов)**	**Баллы**
1	Указание на экранирующий заряд – q	1
2	Указано (либо используется в решении), что разность потенциалов между оболочками зависит только от зарядов на их внешних поверхностях	1
3	Противоположный знак зарядов на внешней поверхности оболочек и их связь с напряжением $Q_o = CU$ и – Q_o.	2
4	Правильно определены заряды оболочек после перемещения шарика	2
5	Определено напряжение на конденсаторе после перемещения шарика	1
6	Неизменность энергии взаимодействия шарика с экранирующим зарядом	1
7	Нахождение кинетической энергии	2
8	Найден заряд шарика q, при котором кинетическая энергия максимальна	1
9	Нахождение максимальной величины кинетической энергии	1

Задача 2.11.2. Нелинейная цепь (12 баллов). Электрическая цепь состоит из идеального источника с ЭДС $\mathcal{E} = 20$ В, резистора с сопротивлением $R = 5$ Ом, катушки с индуктивностью $L = 20$ мГн и нулевым сопротивлением и нелинейного элемента, вольтамперная характеристика которого представлена на рисунке ($I_0 = 3$ А). Изначально ключ разомкнут, тока в цепи нет. Какое количество теплоты выделится на резисторе через большой промежуток времени после замыкания ключа?





Возможное решение (А. Уймин). Для малого промежутка времени dt количество тепла dQ, выделяющегося на резисторе с сопротивлением R

$$dQ = U_R I_R dt = U_R dq. \qquad (1)$$

Здесь U_R и I_R – напряжение на резисторе и сила тока, протекающего через него, dq – заряд, прошедший через резистор.

Установим связь $U_R(q)$ в нашем случае. Будем использовать известное соотношение для параллельно соединенных резистора R и индуктивности L:

$$RI_R = L\frac{dI_L}{dt}; \quad RI_R dt = Rdq = LdI_L; \quad \frac{R}{L}q = I_L. \qquad (2)$$

Сразу после замыкания ключа, нелинейный элемент ведет себя как резистор сопротивлением R (режим «постоянного сопротивления»). Затем он переходит в режим «постоянного тока». Такой переход реализуется, так как в установившемся режиме напряжение на индуктивности и сила тока через резистор будут равны нулю, а напряжение, при котором нелинейный элемент переходит в режим «постоянного тока», меньше ЭДС источника ($I_0R = 15$ В$<$Е$= 20$ В). Определим связь $U_R(q)$ для этих режимов.

а) Режим «постоянного сопротивления». Для силы тока I через нелинейный элемент

$$I = I_L + I_R.$$

По второму правилу Кирхгофа

$$\mathrm{E} = IR + I_R R = 2I_R R + I_L R.$$

Подставляя I_L из (2), получим

$$\mathrm{E} = 2U_R + \frac{R^2}{L}q.$$

Отсюда для режима «постоянного сопротивления»

$$U_R = \frac{1}{2}\left(\mathrm{E} - \frac{R^2}{L}q\right). \qquad (3)$$

Нелинейный элемент остается в этом режиме до тех пор, пока выполняется условие

$$U_R \geq \text{E} - I_0 R,$$

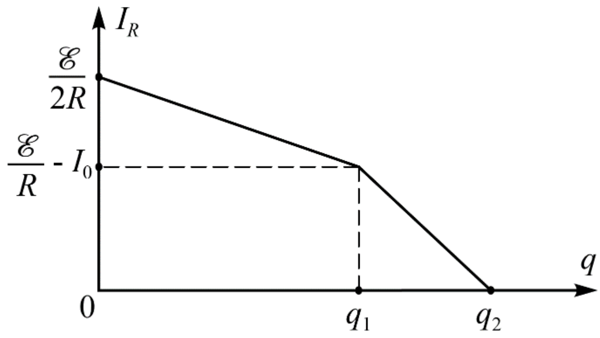
или, с учетом (3), пока величина прошедшего через резистор заряда

$$q < q_1 = \frac{L}{R}\left(2I_0 - \frac{\text{E}}{R}\right).$$

Согласно выражению (1) количество теплоты будет пропорционально площади под графиком $U_R(q)$ на участке $0 < q < q_1$. Поскольку зависимость (3) является линейной, получаем для количества теплоты Q_1 в этом режиме

$$Q_1 = \frac{\text{E}/2 + \text{E} - I_0 R}{2} q_1 = \left(\frac{3\text{E}}{2R} - I_0\right)\frac{L}{2}\left(2I_0 - \frac{\text{E}}{R}\right) = 0,06 \text{ Дж}.$$

б) Режим «постоянного тока».



$$I_R = I_0 - I_L = I_0 - \frac{R}{L}q;$$

$$U_R = RI_R = RI_0 - \frac{R^2}{L}q.$$

Этот режим реализуется до момента, пока U_R не станет равным нулю, т. е. пока q не станет равным $q_2 = \frac{LI_0}{R}$. Заряд, прошедший через резистор в этом режиме

$$q_2 - q_1 = \frac{I_0 L}{R} - \frac{L}{R}\left(2I_0 - \frac{\text{E}}{R}\right) = \frac{L}{R}\left(\frac{\text{E}}{R} - I_0\right).$$

Количество теплоты Q_2, выделившееся в этом режиме, с учетом того, что $U_R(q)$ изменяется линейно от $U_R = \text{E} - RI_0$ до нуля

$$Q_2 = \frac{(q_2 - q_1)(\text{E} - I_0 R)}{2} = \frac{\frac{L}{R}\left(\frac{\text{E}}{R} - I_0\right)(\text{E} - I_0 R)}{2} = \frac{L\left(\frac{\text{E}}{R} - I_0\right)^2}{2} = 0,01 \text{ Дж}.$$

Общее количество теплоты, выделившееся на резисторе,

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{L\text{E}I_0}{R} - \frac{LI_0^2}{2} - \frac{L\text{E}^2}{4R^2} = 0,07 \text{ Дж}.$$

№	**Задача 2.11.2. Критерий (12 баллов)**	**Баллы**
1	Записано и использовано при решении выражение (1) для связи выделившегося тепла с величиной заряда	1
2	Получено выражение (2) для связи изменения силы тока через индуктивность с величиной заряда, прошедшего через резистор	1
3	Для режима “постоянного сопротивления” использовано уравнение второго правила Кирхгофа $\mathrm{E} = 2I_R R + I_L R$.	0,5
4	Получено выражение для связи напряжения на резисторе с прошедшим зарядом для режима “постоянного сопротивления” $U_R = \frac{1}{2}\left(\mathrm{E} - \frac{R^2}{L}q\right)$.	2
5	Получено условие для величины заряда, прошедшего через резистор, на момент перехода между режимами $q_1 = \frac{L}{R}\left(2I_0 - \frac{\mathrm{E}}{R}\right)$.	1,5
6	При интегрировании (графическом или аналитическом) получено выражение для Q_1	1,5
7	Получен верный численный ответ для Q_1	0,5
8	Получено выражение для связи напряжения на резисторе с прошедшим зарядом для режима “постоянного тока” $U_R = RI_R = RI_0 - \frac{R^2}{L}q$	1
9	Получено выражение для величины заряда, прошедшего через резистор за все время $q_2 = \frac{LI_0}{R}$	0,5
10	При использовании интегрирования (графического или аналитического) получено выражение для Q_2	2
11	Получен верный численный ответ для Q_2	0,5

Примечание. Возможно решение, при котором аналитическое выражение для Q_1 и Q_2 не получено, однако определены численные значения точек ”излома” на графике $U_R(q)$ и получен верный численный ответ. Такое решение должно оцениваться полным баллом.

Решение с использованием дифференциальных уравнений.

Пока сила тока, протекающего через нелинейный элемент, не достигла I_0, токи в цепи удовлетворяют уравнениям

$$\mathrm{E} = \left(I_R + I_L\right)R + I_R R; \quad I_R R = L\frac{dI_L}{dt}.$$

Исключим I_R:

$$\mathrm{E} = 2L\frac{dI_L}{dt} + RI_L.$$

Применим подстановку $I_L = \frac{\mathrm{E}}{R} - x$: $\qquad \frac{dx}{dt} = -\frac{R}{2L}x.$

Отсюда с учетом того, что $x(0) = \frac{\mathrm{E}}{R}$ получаем $x = \frac{\mathrm{E}}{R}\left(e^{-\frac{Rt}{2L}}\right)$;

$$I_L = \frac{\mathrm{E}}{R}\left(1 - e^{-\frac{Rt}{2L}}\right); \quad I_R = \frac{\mathrm{E}}{2R}e^{-\frac{Rt}{2L}}.$$

Этот режим прекратится к моменту времени t_1, когда

$$I_R + I_L = I_0; \qquad e^{-\frac{Rt_1}{2L}} = 2\left(1 - \frac{RI_0}{\mathrm{E}}\right).$$

К этому моменту времени сила ток, протекающего через катушку будет

$$I_{L1} = 2I_0 - \frac{\mathrm{E}}{R}.$$

Мощность, выделяющаяся на резисторе,

$$P_R = \frac{\mathrm{E}^2}{4R}e^{-\frac{Rt}{L}}.$$

К моменту t_1 выделившаяся теплота составит

$$Q_1 = \int_0^{t_1} P_R dt = \frac{L\mathrm{E}^2}{4R^2}\left(1 - e^{-\frac{Rt_1}{L}}\right) = \frac{L\mathrm{E}^2}{4R^2} - L\left(\frac{\mathrm{E}}{R} - I_0\right)^2.$$

После того, как сила тока, протекающего через нелинейный элемент, установится на значении I_0, токи в цепи можно описать уравнениями

$$I_R + I_L = I_0; \quad RI_R = L\frac{dI_L}{dt}.$$

Исключим I_R:

$$L\frac{dI_L}{dt} + RI_L = RI_0.$$

Применим подстановку $I_L = I_0 - y$:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{R}{L}y.$$

Отсюда с учетом $y(t_1) = I_0 - I_{L1} = \frac{\mathrm{E}}{R} - I_0$, $\quad$ получим: $\; y = \left(\frac{\mathrm{E}}{R} - I_0\right)e^{-\frac{R(t-t_1)}{L}}$;

$$I_R = \left(\frac{\mathrm{E}}{R} - I_0\right) e^{-\frac{R(t-t_1)}{L}}.$$

Мощность, выделяющаяся на резисторе, $P_R = R\left(\frac{\mathrm{E}}{R} - I_0\right)^2 e^{-\frac{2R(t-t_1)}{L}}$.

Количество теплоты, выделившееся после истечения времени t_1:

$$Q_2 = \int_{t_1}^{\infty} P_R dt = \frac{L\left(\frac{\mathrm{E}}{R} - I_0\right)^2}{2} = 0,01\ \text{Дж}.$$

Общее количество теплоты

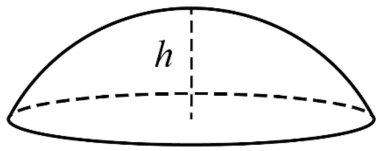
$$Q = \frac{L\mathrm{E}^2}{4R^2} - \frac{L}{2}\left(\frac{\mathrm{E}}{R} - I_0\right)^2 - = 0,07\ \text{Дж}.$$

№	**Задача 2.11.2. Критерий (12 баллов)**	**Баллы**
1	При решении для режима “постоянного сопротивления” используется уравнение второго правила Кирхгофа: $\mathrm{E} = 2RI_R + RI_L$	0,5
2	Получено выражение для силы тока через резистор для режима “постоянного сопротивления” $I_R = \frac{\mathrm{E}}{2R} e^{-\frac{Rt}{2L}}$	2,5
3	Получено условие для силы тока на момент перехода между режимами $I_{L1} = 2I_0 - \frac{\mathrm{E}}{R}$ или $I_{L1} = I_{R1} = \frac{\mathrm{E}}{R} - I_0$.	1,5
4	Получено выражение для Q_1	3
5	Получен верный численный ответ для Q_1	0,5
6	Получено выражение для силы тока через резистор для режима “постоянного тока” $I_R = \left(\frac{\mathrm{E}}{R} - I_0\right) e^{-\frac{R(t-t_1)}{L}}$.	1,5
7	Получено выражение для Q_2	2
8	Получен верный численный ответ для Q_2	0,5

Задача 2.11.3. Вспышка в кубе (12 баллов). В кубе из вещества с показателем преломления $n = 2$ точечный источник испустил кратковременную вспышку, свет от которой расходится однородно во всех направлениях. Свет веществом куба не поглощается. Какие значения может принимать доля η энергии вспышки, вышедшей наружу, в зависимости от положения источника внутри куба? Укажите, при каких положениях источника эта доля минимальна, при каких максимальна и чему она равна?

При падении света на границу раздела часть его энергии, зависящая от угла падения, отражается, а часть проходит через границу раздела.

Примечание: при решении Вам может понадобиться формула площади поверхности сферического сегмента (см. рисунок): $S = 2\pi Rh$, где R – радиус сферы, h – высота сегмента.



Возможное решение (А. Аполонский).

1. Направим оси координат перпендикулярно граням куба. Пусть $\vec{c} = \left(c_x, c_y, c_z\right)$ вектор скорости некоторого луча света. При отражении от граней, перпендикулярных оси *OX*, у скорости отражённого луча меняет знак проекция на ось *OX*, а две остальные проекции остаются неизменными. Аналогично и при отражении от двух других пар граней.

2. Полное отражение происходит, когда угол между падающим на грань лучом и нормалью к грани превосходит угол φ_0, где $\sin\varphi_0 = 1/n = 1/2$. Тогда свет через грань не проходит совсем. Если этот угол меньше $\varphi_0 = 30^\circ$, то происходит частичное отражение света, а ненулевая часть выходит из куба наружу.

3. Рассмотрим луч, падающий на перпендикулярную *OX* грань, при котором нет полного отражения, а часть света выходит наружу. Условие этому $|c_x|/c > \sqrt{3}/2$. При этом модули проекций на две остальные оси обязательно меньше *c*/2.

4. Если скорость луча удовлетворяет условию $|c_x|/c > \sqrt{3}/2$, но он попадает сначала на грани, перпендикулярные *OY* и *OZ*, то для соответствующих проекций имеем $|c_y|/c < 1/2$ и $|c_z|/c < 1/2$, т.е. на этих гранях происходит полные отражения, в результате которых свет попадёт на грани, перпендикулярные *OX*.

5. Итак, при выполнении условия $|c_x|/c > \sqrt{3}/2$ какими бы отражения не были свет будет выходить только через перпендикулярные *OX* грани и в конечном счёте (поскольку поглощение отсутствует) весь такой свет покинет куб независимо от того, где находится источник. Аналогично и для других двух пар граней.

6. Итак, куб покинет свет, выходящий из точечного источника в шесть конусов, оси которых перпендикулярны граням куба, а угол раствора конуса составляет 60º. Остальной свет будет испытывать только полное отражение, и никогда куб не покинет.

7. Искомая доля вышедшего света равна отношению суммарного телесного угла этих шести конусов к полному телесному углу 4π. Из указанной в условии формулы телесный угол при вершине одного такого конуса

$$\Omega = \frac{2\pi Rh}{R^2} = \frac{2\pi R \cdot R\left(1-\cos\varphi_0\right)}{R^2} = 2\pi\left(1-\frac{\sqrt{3}}{2}\right).$$

Таких конусов шесть, поэтому доля энергии света, покидающего куб при **любых** положениях источника внутри куба одинакова и равна

$$\eta = \frac{6\Omega}{\Omega_{\text{полн}}} = \frac{12\pi}{4\pi}\left(1-\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 3\left(\frac{2-\sqrt{3}}{2}\right) \approx 0,4 = 40\%.$$

№	**Задача 2.11.3. Критерий (12 баллов)**	**Баллы**
1	Утверждение о сохранении модуля проекции луча света на оси параллельные (перпендикулярные) ребрам куба или эквивалентный им анализ связи углов падения	1
2	Указано, что при значении углах падения на грань, превосходящих $\varphi_0 = \arcsin\left(1/n\right) = 30^\circ$, свет полностью отражается	1
3	Показано, что свет, испытывающий частичное отражение на одной из граней куба, в дальнейшем полностью отражается от перпендикулярных ей граней	2
4	Указано, что свет, испытывающий частичное отражение на одной из граней куба, после отражения от перпендикулярной ей грани вновь испытывает частичное отражение на параллельной ей грани	1
5	Обоснованный (на основании п.4 и отсутствия поглощения) вывод о полном выходе из куба света, частично отражающегося от двух параллельных граней, в результате многократных отражений	1
6	Вывод о независимости η от положения источника	2
7	Утверждение, что наружу из куба выходит свет, распространяющийся внутри шести конусов с углом раствора равным 60°	2
8	Определена величина телесного угла для таких конусов	1
9	Окончательный верный ответ для η	1

Задача 2.11.4. Определение удельной теплоты испарения жидкого азота (14 баллов).

Цель эксперимента – определение удельной теплоты испарения жидкого азота при атмосферном давлении.

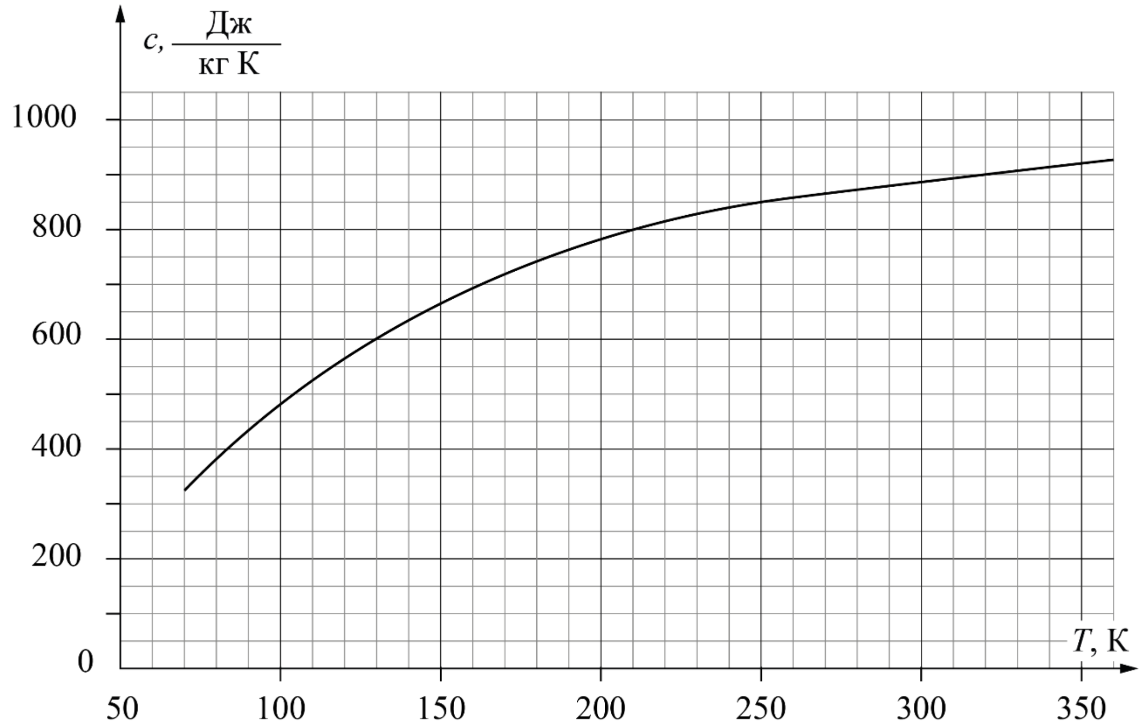
Масса цилиндра $m_{Al} = 69$ г, начальная масса контейнера с азотом $M = 250$ г, температура помещения $+23\,°C$. Температура кипения жидкого азота – минус $196\,°C$.

Описание эксперимента. Жидкий азот, налитый в пенопластовый контейнер, из-за теплообмена с окружающей средой испаряется, и его масса уменьшается. При погружении в жидкий азот алюминиевого цилиндра, имевшего температуру помещения, азот начинает активно кипеть и интенсивность его испарения увеличивается. Масса M контейнера с жидким азотом фиксируется с помощью электронных весов. Показания весов в зависимости от времени приведены в таблице.

t, мин : с	0:00	0:49	1:32	2:05	2:41	3:22	4:06	4:50	5:23	5:52	6:07	6:30
M, г	250	246	242	238	234	230	226	222	218	274	264	254

t, мин : с	6:54	7:25	7:48	8:20	8:49	9:33	10:15	10:55	11:37	12:20	13:05
M, г	244	232	229	224	219	215	211	207	203	199	195

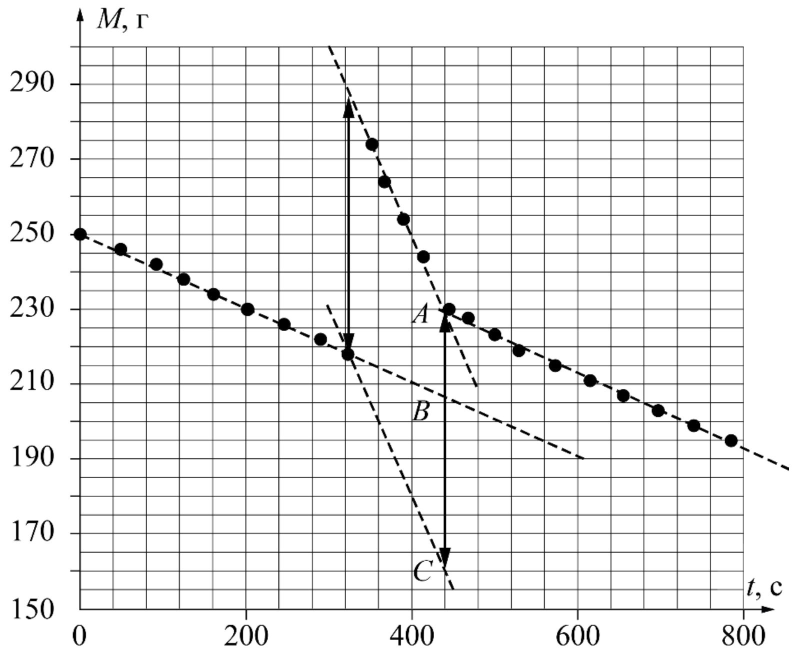
Примечание. Удельная теплоемкость алюминия зависит от температуры. График этой зависимости представлен на рисунке.



Задание. Используя результаты измерения зависимости массы азота от времени и график зависимости удельной теплоемкости алюминия от температуры, определите удельную теплоту испарения азота λ.

Из-за ограниченного времени выполнения задания погрешность определения λ оценивать не требуется, однако точность полученных вами промежуточных и конечных результатов будет учитываться при выставлении баллов.

Возможное решение (А. Аполонский). Способ 1. График зависимости массы M контейнера с жидким азотом от времени t представлен на рисунке. При определении массы испарившегося азота учитывалось изменение показаний весов при погружении в него цилиндра. Видно, что на начальном участке (до момента времени $t_1 \approx 320\,\text{с}$) скорость испарения определялась теплообменом с окружающей средой. С момента t_1 до момента времени $t_2 \approx 440\,\text{с}$ испарение определялось теплообменом с цилиндром и окружающей средой (бурное кипение). Начиная с момента времени t_2 вновь пошёл только теплообмен с окружающей средой (цилиндр охладился до температуры кипения азота).



Далее возможны несколько способов определения массы азота испарившегося в результате охлаждения цилиндра. Один из вариантов следует из графических построений. Скачок массы на 69 г в момент t = 320 с обусловлен погружением цилиндра в жидкий азот. Отрезок AC – также соответствует массе цилиндра. Отрезок BC соответствует массе азота ($m_N \approx 48\,\text{г.}$), испарившегося из-за теплообмена с цилиндром.

Теплота Q, которую отдал алюминиевый цилиндр при охлаждении с учетом зависимости его теплоемкости от температуры, пропорциональна площади под графиком $c_{Al}\left(T\right)$ в интервале температур от $-196\,°C$ до $+23\,°C$.

Численное значение Q можно подсчитать по клеткам на графике. Получается

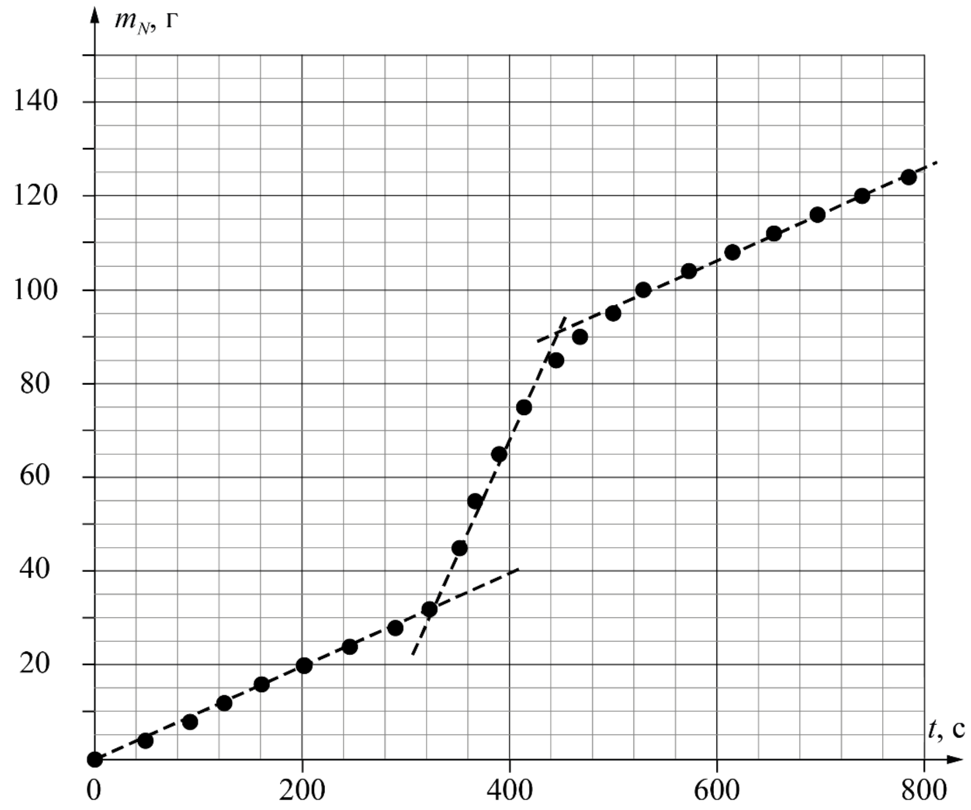
$$Q = m_{Al} \Sigma c_i \Delta T_i \approx 69\,\text{г} \cdot 155\,\frac{\text{кДж}}{\text{г}} = 10{,}7\,\text{кДж}.$$

Значение удельной теплоты парообразования азота найдем из уравнения теплового баланса $Q = \lambda m_N$. Отсюда

$$\lambda = \frac{Q}{m_N} = \frac{10{,}7}{48 \cdot 10^{-3}}\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right) = 223\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right).$$

№	**Задача 2.11.4. Критерии оценивания (14 баллов)**	**Баллы**
1	Построен график зависимости массы азота (или массы испарившегося азота) от времени. При этом график хорошо читается, подписаны координатные оси, выбран удобный масштаб и т.д.	3
	Подписаны оси и указаны единицы измерения 0,5 балла	
	Выбран разумный масштаб координатных осей 0,5 балла	
	Нанесены все экспериментальные точки 0,5 балла	
	Через экспериментальные точки проведены соответствующие линии 1,5 балла	
2	Записано уравнения теплового баланса, получена формула $\lambda = \frac{Q}{m_N^{Al}}$.	2
3	Учтено изменение показаний весов, связанное с погружением цилиндра (1 балл) и теплообмена азота с окружающей средой (1 балл)	2
4	Определена масса азота, выкипевшая из-за теплообмена с цилиндром $m_N \in (46 \div 50)$ г	3
	$m_N \in (44 \div 46)$ г или $m_N \in (50 \div 52)$ г (2 балла)	
	$m_N \in (42 \div 44)$ г или $m_N \in (52 \div 54)$ г (1 балл)	
	$m_N \in (38 \div 42)$ г или $m_N \in (54 \div 58)$ г (0,5 балла)	
5	Определено количество теплоты, отданное при охлаждении цилиндра $Q \in (10,5 \div 10,9)$ кДж	3
	Если $Q \in (10,3 \div 10,5)$ кДж или $Q \in (10,9 \div 11,1)$ кДж (2 балла)	
	Если $Q \in (10,1 \div 10,3)$ кДж или $Q \in (11,1 \div 11,3)$ кДж (1 балл)	
	Если $Q \in (9,7 \div 10,1)$ кДж или $Q \in (11,3 \div 11,7)$ кДж (0,5 балла)	
6	Получен ответ для $\lambda \in (200 \div 245)$ кДж/кг	1

Способ 2. График зависимости массы испарившегося азота $m_N(t)$ от времени t представлен на рисунке. При определении массы испарившегося азота учитывалось изменение показаний весов при погружении цилиндра.



Видно, что на начальном участке до момента времени $t_1 \approx 323$ с скорость испарения азота определяется теплообменом с окружающей средой, с момента t_1 до момента времени $t_2 \approx 529$ с – теплообменом с цилиндром и окружающей средой (бурное кипение). Начиная с момента t_2 остаётся только теплообмен с окружающей средой (цилиндр охладился до температуры кипения азота).

При использовании графической обработки или метода наименьших квадратов, определяем скорости испарения азота k_1 - до погружения цилиндра и k_2 - после завершения бурного кипения, которое соответствует установлению температуры цилиндра, равной температуре кипения. Скорость испарения азота перед погружением цилиндра составляет $k_1 \approx 0{,}099$ г/с. Скорость испарения после завершения бурного кипения $k_2 \approx 0{,}094$ г/с. Таким образом, скорость испарения до и после погружения цилиндра немного отличаются. Поэтому скорость испарения азота во время бурного кипения из-за теплообмена с окружающей средой оценим, как среднее значение k_1 и k_2

$$k = \frac{k_1 + k_2}{2} \approx 0{,}0965\ \frac{\text{г}}{\text{с}}.$$

Масса азота, испарившегося из-за теплообмена с алюминиевым цилиндром равна

$$m_N^{Al} = \big(m_N(t_2) - m_N(t_1)\big) - k(t_2 - t_1) \approx 48{,}1 \text{ г}.$$

Количество теплоты, которое отдает алюминиевый цилиндр при охлаждении с учетом зависимости его теплоемкости от температуры, определяется интегралом

$$Q = m\int_{T_N}^{T_0} c_{Al}(T)dT$$

Значение интеграла, пропорционально площади под графиком $c_{Al}(T)$ и равно приблизительно $155\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Количество теплоты, отданное алюминием, $Q = 69 \cdot 155 = 10{,}7$ кДж.

Значение удельной теплоты парообразования азота найдем из уравнения теплового баланса

$$\lambda = \frac{Q}{m_N} = \frac{10{,}7}{48\cdot 10^{-3}}\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right) = 223\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

№	**Задача 2.11.4. Критерии оценивания (14 баллов)**	**Баллы**
1	Построен график зависимости массы азота (или массы испарившегося азота) от времени. При этом график хорошо читается, подписаны координатные оси, выбран удобный масштаб и т.д.	3
	Подписаны оси и указаны единицы измерения 0,5 балла	
	Выбран разумный масштаб координатных осей 0,5 балла	
	Нанесены все экспериментальные точки 0,5 балла	
	Через экспериментальные точки проведены соответствующие линии 1,5 балла	
2	Записано уравнения теплового баланса, получена формула $\lambda = Q/m_N$	2
3	Учтено изменение показаний весов, связанное с погружением цилиндра в азот (1 балл) и теплообмена азота с окружающей средой (1 балл)	2
	Если скорость испарения определена по данным таблицы без использования графика, за весь пункт оценка не должна превосходит 0,5 балла	
4	Определена масса азота, выкипевшая из-за теплообмена с цилиндром $m_N \in (46 \div 50)$ г	3
	$m_N \in (44 \div 46)$ г или $m_N \in (50 \div 52)$ г (2 балла)	
	$m_N \in (42 \div 44)$ г или $m_N \in (52 \div 54)$ г (1 балл)	
	$m_N \in (38 \div 42)$ г или $m_N \in (54 \div 58)$ г (0,5 балла)	
5	Определено количество теплоты, отданное при охлаждении цилиндра $Q \in (10{,}5 \div 10{,}9)$ кДж	3
	Если $Q \in (10{,}3 \div 10{,}5)$ кДж или $Q \in (10{,}9 \div 11{,}1)$ кДж (2 балла)	
	Если $Q \in (10{,}1 \div 10{,}3)$ кДж или $Q \in (11{,}1 \div 11{,}3)$ кДж (1 балл)	
	Если $Q \in (9{,}7 \div 10{,}1)$ кДж или $Q \in (11{,}3 \div 11{,}7)$ кДж (0,5 балла)	
6	Получен ответ для $\lambda \in (200 \div 245)$ кДж/кг	1