

Электронагреватель

Задачи про электронагреватель (в частности, кипятильник) нередко встречаются на олимпиадах, поскольку находятся на стыке электрических и тепловых явлений.

ЗАДАЧА 1. Школьник Вася нагревает стакан воды, окунув в него резистор, подключённый к источнику постоянного тока. Резисторов у Васи два. От первого резистора вода закипает за время t_1 , а от второго — за время t_2 . За какое время закипит вода, если в стакан окунуть оба резистора, подключённых а) последовательно; б) параллельно? Рассеянием тепла пренебречь.

$$\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} = \tau \quad (g : \tau_1 + \tau_2 = \tau \text{ (в)})$$

ЗАДАЧА 2. (*Всеросс., 2014, ШЭ, 9–10*) Кипятильник был подключён к батарее идеальных аккумуляторов с выходным напряжением $U_0 = 200$ В. Он смог прогреть стакан воды до температуры $t_1 = 85^\circ\text{C}$ при температуре в комнате $t_{\text{комн}} = 25^\circ\text{C}$. Потом второй такой же кипятильник подключили последовательно с этим и опустили во второй такой же стакан с водой. Какая температура t_2 установится в нём? Количество теплоты ΔQ , теряемое стаканом за время Δt , пропорционально разности температур воды и воздуха, то есть $\Delta Q/\Delta t = k(t_{\text{воды}} - t_{\text{возд}})$. Сопротивление кипятильника не зависит от его температуры.

$$0.0\tau = \frac{\tau}{\tau + \text{нкоомтг}} = \tau$$

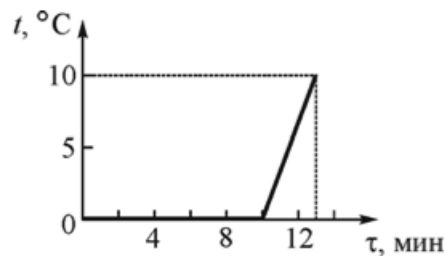
ЗАДАЧА 3. (*Всеросс., 2016, ШЭ, 9*) В кружке находится смесь воды и льда. После того как содержимое кружки 2 минуты нагревали кипятильником, в ней оказалось 300 мл воды при температуре 30°C . Кипятильник работает от сети напряжением 220 В, и его сопротивление равно 95 Ом. Найдите массу льда в кружке до начала нагревания. Плотность воды $1,0$ г/см³, её удельная теплоёмкость $4,2$ кДж/(кг · °C), удельная теплота кристаллизации $0,33$ МДж/кг. Потерями теплоты в окружающую среду и на нагревание кружки можно пренебречь.

$$\tau \text{ g} \tau = w$$

ЗАДАЧА 4. (*Всеросс., 2018, ШЭ, 10*) Тепловыделяющий элемент включают в электрическую сеть с напряжением 100 В, и его температура повышается до $+60^\circ\text{C}$, после чего перестаёт изменяться. Затем этот же элемент включают в сеть с напряжением 200 В, и его температура достигает $+120^\circ\text{C}$. До какой температуры нагреется этот элемент, если его включить в сеть с напряжением 300 В? Температура в помещении, в котором находится тепловой элемент, постоянна, а сопротивление тепловыделяющего элемента не зависит от его температуры. В установившемся режиме мощность тепловых потерь тепловыделяющего элемента пропорциональна разности его температуры и температуры в помещении.

$$220^\circ\text{C}$$

ЗАДАЧА 5. (Всеросс., 2014, МЭ, 9–11) В калориметр с водой и льдом погрузили проволоку сопротивлением $R = 800$ Ом и стали пропускать ток силой $I = 1$ А. На графике приведена зависимость температуры T в калориметре от времени t . Определите начальную массу льда m_1 и начальную массу воды в жидком состоянии m_2 . Удельная теплота плавления льда $\lambda = 336$ кДж/кг, удельная теплоёмкость воды $c = 4200$ Дж/(кг · °С).



$$m_1 \approx m_2 - \frac{c \Delta T}{\lambda} = m_2 - \frac{4200 \cdot 10}{336} = m_2 - 125$$

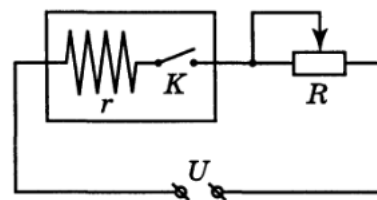
ЗАДАЧА 6. (Всеросс., 2015, МЭ, 9–11) Электрокипятильник, включённый в сеть с напряжением $U = 220$ В, нагревает воду в кастрюле от комнатной температуры до кипения за время $\tau_1 = 1$ мин. Найдите, за какое время τ_2 четыре кипятильника с вдвое большим сопротивлением, соединённые последовательно, нагреют вдвое большую массу воды от той же комнатной температуры до кипения при подключении к сети с напряжением $2U = 440$ В. Потерями теплоты можно пренебречь.

$$\tau_2 = 4 \tau_1 = 4 \text{ мин}$$

ЗАДАЧА 7. (Всеросс., 1993, ОЭ, 9) Крокодил Гена купил в подарок Чебурашке электрический утюг без терморегулятора, рассчитанный на включение в сеть с напряжением 220 В. Собираясь в гости на день рождения, он решил проверить подарок и погладить рубашку. Однако напряжение в сети у него дома равно 127 В, поэтому утюг нагрелся всего до 127 °С, тогда как для глажения рубашки необходима температура утюга в пределах от 200 °С до 300 °С. Сможет ли Гена погладить этим утюгом рубашку дома у Чебурашки, где напряжение сети равно 220 В? Если нет, то почему? Если да, то каким образом? Теплоотдача пропорциональна разности температур, а нагреватель утюга содержит всего одну обмотку, сопротивление которой можно считать постоянным. Температура воздуха в комнате равна 20 °С.

$$Q_{\text{отдана}} = c m (T_{\text{утюг}} - T_{\text{комн}}) = c m (127 - 20) \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 8. (Всеросс., 1998, ОЭ, 9) Фирма «Дивайс» выпускает прибор, используемый как электрический предохранитель. Этот прибор состоит из металлической проволоочки сопротивлением $r = 0,1$ Ом и массой $m = 1$ г (удельная теплоёмкость $c = 500$ Дж/(кг · К)) и термомеханического выключателя K (рис.), размыкающего цепь в тот момент, когда проволоочка нагревается до критической температуры $t_{\text{кр}} = 60$ °С. При испытании прибора его последовательно соединяют с переменным резистором R и подключают к источнику тока с напряжением $U = 1$ В. На начальном этапе испытаний на резисторе устанавливают сопротивление $R_1 = 14$ Ом. Через некоторое время температура проволоочки становится равной $t_1 = 50$ °С и остаётся постоянной. Затем сопротивление резистора начинают медленно уменьшать. Найдите его сопротивление R_x в тот момент, когда испытываемый прибор разомкнёт цепь. Известно, что при подключении прибора непосредственно к источнику тока прибор размыкает цепь спустя $\tau = 1$ с после подключения. Зависимостью сопротивления прибора от температуры пренебречь. Температура среды, окружающей проволоочку, поддерживается постоянной.



$$R_x = \frac{U^2}{I^2} = \frac{U^2}{\left(\frac{I_1}{1 + \frac{r}{R_1}}\right)^2} = \frac{U^2}{I_1^2} \left(1 + \frac{r}{R_1}\right)^2 = 14,9 \text{ Ом}$$

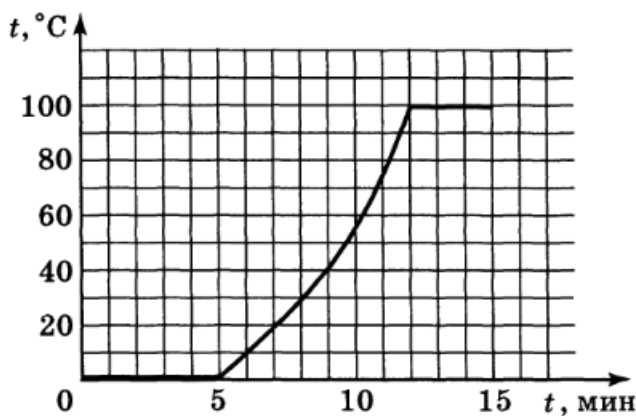
ЗАДАЧА 9. (Всеросс., 2000, ОЭ, 9) На открытой площадке находятся три одинаковые банки со льдом, в которые помещены одинаковые электрические нагревательные элементы. В некоторый момент эти элементы включают в три разные розетки с напряжениями $U_1 = 380$ В, $U_2 = 220$ В и $U_3 = 127$ В. В первой банке весь лёд растаял за $t_1 = 2$ мин, а во второй — за $t_2 = 10$ мин. За какое время t_3 растает весь лёд в третьей банке? Начальная температура льда во всех банках 0°C . Сопротивление нагревательного элемента не зависит от силы протекающего тока. Считайте, что в любой момент времени температура внутри каждой банки одинакова по всему объёму.

$$t_3 = \frac{t_1^2 U_1^2 + t_2^2 U_2^2}{t_1^2 U_3^2} = 20 \text{ мин}$$

ЗАДАЧА 10. (Всеросс., 1994, финал, 9) Лабораторная электроплитка, сопротивление спирали которой $R = 20$ Ом, включена в сеть последовательно с резистором сопротивлением $R_0 = 10$ Ом. При длительном включении плитка нагрелась от комнатной температуры $t_0 = 20^\circ\text{C}$ до максимальной температуры $t_1 = 52^\circ\text{C}$. До какой максимальной температуры t_x нагреется плитка, если параллельно ей включить ещё одну такую же плитку?

$$t_x = t_0 + \frac{t_1 - t_0}{2} = 26^\circ\text{C}$$

ЗАДАЧА 11. (Всеросс., 1995, финал, 9) В дне теплоизолированного сосуда (калориметра) имеется небольшое отверстие, через которое может вытекать вода. В сосуд поместили смесь воды и льда при температуре 0°C вместе с электрическим нагревателем мощностью $P = 600$ Вт, и начали следить за изменением температуры содержимого калориметра в зависимости от времени. Экспериментальный график зависимости температуры t от времени τ представлен на рисунке.

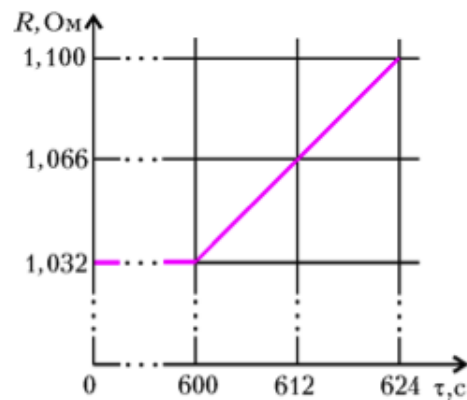


- 1) Определите массу воды, оставшейся в калориметре к моменту окончания таяния льда.
 - 2) Какая средняя масса воды вытекла из отверстия калориметра в течение 1 мин?
 - 3) Сколько льда было в калориметре в начале эксперимента?
 - 4) Сколько воды находилось в калориметре в начале эксперимента?
 - 5) Определите массу воды, оставшейся в калориметре к концу эксперимента ($t = 17$ мин).
- Удельная теплота парообразования воды $L = 2260$ кДж/кг, удельная теплоёмкость воды $c_v = 4,2$ кДж/(кг · К), удельная теплота плавления льда $\lambda = 340$ кДж/кг.

Примечание. Теплоёмкость калориметра можно не учитывать.

$$1) 0,86 \text{ кг}; 2) 0,074 \text{ кг}; 3) 0,53 \text{ кг}; 4) 0,70 \text{ кг}; 5) 0$$

ЗАДАЧА 12. (Всеросс., 2006, финал, 9) На дне калориметра закреплён тонкий плоский нагревательный элемент, а на некотором уровне над ним — терморезистор, сопротивление R которого зависит от температуры t , выраженной в $^{\circ}\text{C}$, по закону $R = R_0(1 + \alpha t)$, где R_0 и α не зависят от температуры (параметр α называется температурным коэффициентом сопротивления). В калориметре находится лёд. Его удельная теплота плавления $\lambda = 340$ кДж/кг. Удельная теплоёмкость воды $c = 4,2$ кДж/(кг \cdot $^{\circ}\text{C}$). Если через нагревательный элемент пустить ток силой I_0 , сопротивление R будет изменяться со временем так, как показано на графике. Найдите α . Изобразите график зависимости $R(\tau)$, если бы через нагревательный элемент пропускали ток силой $I = 1,41I_0$.



$$1 - 0,02170 = \nu$$

ЗАДАЧА 13. (Всеросс., 2007, финал, 9) Дачный домик отапливается с помощью электрических батарей. При температуре батарей $t_{Б1} = 40^{\circ}\text{C}$ и температуре наружного воздуха $t_1 = -10^{\circ}\text{C}$ в домике устанавливается температура $t = 20^{\circ}\text{C}$. Во сколько раз надо увеличить силу тока в батареях, чтобы прежняя температура в комнате поддерживалась в холодные дни при температуре $t_2 = -25^{\circ}\text{C}$? Какова при этом будет температура батарей $t_{Б2}$? Считать электрическое сопротивление нагревательных элементов не зависящим от температуры.

$$0,09 = \frac{t_2 - t}{(t_2 - t)(t_{Б1} - t)} + t = z_{Б1} : z_{Т1} \approx \frac{t_2 - t}{z_{Т2} - t} \wedge = \frac{t_1}{z_{Т1}}$$

ЗАДАЧА 14. (Всеросс., 2010, финал, 9) Электроплитка имеет две спирали (два нагревательных элемента), которые можно включать в сеть либо по отдельности, либо соединяя их последовательно или параллельно. Будем считать, что сопротивления спиралей не зависят от температуры.

Оказалось, что если включить в сеть только первую спираль, то электроплитка нагревается до температуры $t_1 = 180^{\circ}\text{C}$, а если включить только вторую спираль, то плитка нагревается до температуры $t_2 = 220^{\circ}\text{C}$.

До какой температуры нагреется плитка при:

- 1) последовательном включении спиралей;
- 2) параллельном включении спиралей?

Указание. Поток тепла от плитки во внешнюю среду пропорционален разности температур между плиткой и воздухом в комнате. Температуру воздуха считать постоянной и равной $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$.

$$0,088 = 0_1 - z_1 + t_1 = \hat{t}_1 (z : 0,601 \approx \frac{(0_1 - z_1}{1} + \frac{0_2 - t_1}{1}) + 0_1 = x_1 (1$$

ЗАДАЧА 15. (Всеросс., 2017, финал, 9) Сопротивление R спирали зависит от температуры по закону $R = R_0 + \alpha(t - t_0)$, где t — температура спирали, $R_0 = 10$ Ом, $\alpha = 40,0 \cdot 10^{-3}$ Ом/°С, $t_0 = 20$ °С. На спираль подаётся напряжение $U = 220$ В, и за время $\tau_1 = 100$ мкс она нагревается от t_0 до $t_1 = 80$ °С.

- До какой температуры t_2 нагреется спираль за время $\tau_2 = 334$ мкс от момента включения?
- Определите теплоёмкость спирали.

При данных температурах и временах излучением и теплоотдачей можно пренебречь.

$$\boxed{C_0 / \text{жГ} \text{ } \varepsilon - 01 \cdot \tau_2 L = C_0 \text{ } \varepsilon 881 = \tau_1}$$

ЗАДАЧА 16. (МОШ, 2006, 9) Алюминиевая проволока диаметром $d = 2,5$ мм, не слишком гнутая, покрыта льдом. Общий диаметр проволоки со льдом равен $D = 3,5$ мм. Температура льда и проволоки $t = 0$ °С. По проволоке пустили ток силой $I = 15$ А. За какое время лёд растает? Плотность льда $\rho_{\text{л}} = 0,9$ г/см³, а его удельная теплота плавления $\lambda = 340$ кДж/кг. Удельное сопротивление алюминия $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

$$\boxed{\text{ниж } 61 \approx \frac{\tau I^2 \rho_{\text{л}}}{(\tau^2 - \tau_0^2) \varepsilon^2 \rho_{\text{л}} \lambda} = \tau}$$

ЗАДАЧА 17. (МОШ, 2009, 9) Школьницы Марина и Карина проводили опыты по нагреванию двух одинаковых банок с водой массой $m = 0,5$ кг с помощью двух одинаковых кипятильников. Марина подключила свой кипятильник к источнику напряжения $U_1 = 220$ В, Карина — к источнику напряжения $U_2 = 127$ В. Банка Карины через достаточно большое время нагрелась только до температуры $t_0 = 50$ °С. Нагревшись до температуры $t_0 = 50$ °С за гораздо меньшее время, банка Марины продолжала нагреваться со скоростью $v = 0,1$ °С/сек. Какие мощности P_1 и P_2 развивали кипятильники Марины и Карины при работе? Удельная теплоёмкость воды $c = 4200$ Дж/(кг · °С), теплоёмкостями кипятильников и банок можно пренебречь.

$$\boxed{P_1 = \frac{cmvU_1^2}{\varepsilon^2} \approx 315 \text{ Вт}; P_2 = \frac{cmvU_2^2}{\varepsilon^2} \approx 105 \text{ Вт}}$$

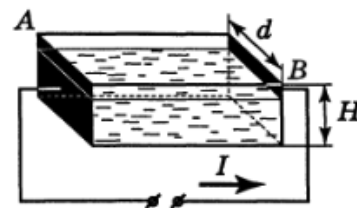
ЗАДАЧА 18. (МОШ, 2012, 9) Школьницы Алиса и Василиса нагревают воду в полных стаканах при помощи кипятильников. Кипятильник Василисы является точной копией кипятильника Алисы, увеличенной в три раза, а стакан Василисы — увеличенной в два раза копией стакана Алисы. Кипятильники включают в розетки с одинаковым напряжением. Вода у Алисы закипает за 3 минуты. За какое время закипит вода у Василисы? Считать, что вся выделяющаяся энергия идёт на нагревание воды. Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

$$\boxed{\text{За } 8 \text{ минут}}$$

Задача 19. (МОШ, 2014, 9) Проточный нагреватель воды состоит из трубы длиной $L = 8$ м, поперечное сечение которой представляет собой прямоугольник размерами $a \times d$. Стенки размерами $L \times a$ сделаны из металла, а размерами $L \times d$ — из диэлектрика. Нагрев воды осуществляется электрическим током, для чего к металлическим стенкам прикладывается постоянное напряжение U . Определите, каким должно быть это напряжение для того, чтобы устройство обеспечивало нагрев $q = 600$ литров воды в час от 10°C до 35°C , если $a = 40$ см, $d = 2$ см. Используемая в нагревателе вода имеет следующие характеристики: плотность $\rho = 1000$ кг/м³, удельная теплоёмкость $c = 4200$ Дж/(кг · °C), удельное сопротивление $\lambda = 10$ Ом · м. Теплоёмкостью трубы и потерями теплоты пренебречь.

$$\text{В } \varepsilon \approx \frac{vT}{4\pi b d c \rho \lambda} \Lambda = \Omega$$

Задача 20. (Всеросс., 1999, ОЭ, 10) В экспериментах по обнаружению нейтрино используют легкоплавкий металл галлий ($t_{\text{пл}} = 29,8^\circ\text{C}$). Прямоугольная теплоизолированная ювета шириной d , открытая сверху, до высоты H заполнена галлием, нагретым до температуры кипения. К противоположным стенкам A и B , изготовленным из хорошо проводящего материала, подведено внешнее электрическое напряжение. Через расплав галлия начинают пропускать постоянный ток I (рис.). Через какое время весь галлий выкипит? Удельную теплоту парообразования λ , плотность ρ и удельное сопротивление σ считать известными.



$$\frac{\sigma I \tau}{\rho H d \lambda} = \tau$$

Задача 21. (МОШ, 2015, 9) Для изготовления нагревательной спирали кипятильника взяли проволоку длиной l_1 . После подключения этого кипятильника к источнику напряжения с малым внутренним сопротивлением на нагревание некоторой массы воды в калориметре на 50°C было затрачено время $\tau_1 = 2$ минуты. Затем проволоку, из которой была сделана спираль кипятильника, расплавили и изготовили из расплава новую проволоку длиной $l_2 = 2l_1$. Из новой проволоки сделали другую спираль для кипятильника, опустили его в другой калориметр с другим количеством воды, и подключили кипятильник к тому же источнику напряжения. На нагревание воды на 50°C во втором калориметре было потрачено время $\tau_2 = 12$ минут. Во сколько раз масса воды во втором калориметре отличается от массы воды в первом калориметре? Считайте, что потерь теплоты при нагревании воды не происходит, теплоёмкости калориметров пренебрежимо малы, а плотность и проводимость металла после переплавки остаются прежними.

$$\frac{\tau}{\varepsilon} = \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right) \frac{l_2}{l_1} = \frac{\tau_{11}}{\tau_{21}}$$

Задача 22. (МОШ, 2014, 9–10) На спирали кипятильника при подключении к сети напряжением 220 В выделяется мощность 1 кВт. Масса спирали кипятильника составляет 100 г. Удельное сопротивление материала кипятильника 10^{-6} Ом · м, плотность материала кипятильника 9 г/см³.

А) Каково сопротивление кипятильника? Ответ представьте в омах и округлите до целых.
 В) Сколько времени потребуется, чтобы нагреть 1 кг воды, взятой из ведра со смесью воды и льда, до кипения? Считайте, что вся выделяемая на кипятильнике мощность идет на нагревание воды, а потерями тепла можно пренебречь. Удельная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг · °С). Ответ представьте в минутах и округлите до целых.

С) Какова длина спирали кипятильника? Ответ представьте в метрах и округлите до второй значащей цифры.

Д) Какова толщина спирали кипятильника? Сечение спирали считайте круглым. Ответ представьте в миллиметрах и округлите до второй значащей цифры.

A) 48; B) 7; C) 23; D) 0,78

Задача 23. (МОШ, 2014, 9–10) Школьник Андрей проводит опыты с медной проволокой. Плотность меди составляет 8,92 г/см³, удельное сопротивление $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, удельная теплоёмкость 380 Дж/(кг · °С).

А) Медную проволоку подсоединили к источнику напряжения 220 В. Какой должна быть длина проволоки, чтобы её температура увеличивалась каждую секунду на один градус Цельсия? Ответ представьте в метрах и округлите до второй значащей цифры.

В) Через медную проволоку круглого сечения пропускают ток 1 А. Каким должен быть диаметр проволоки, чтобы её температура увеличивалась каждую секунду на один градус Цельсия? Ответ представьте в миллиметрах и округлите до второй значащей цифры.

A) 0,3; B) 10; C) 16; D) 1

Задача 24. (МОШ, 2014, 10) В комнате с температурой воздуха $t_k = 25^\circ\text{C}$ находится батарея аккумуляторов с суммарной ЭДС $U = 200$ В и суммарным внутренним сопротивлением $r = 20$ Ом. Выводы батареи подсоединены к электрической розетке. Изначально в эту розетку был включён кипятильник номер 1 с сопротивлением $R = 200$ Ом, опущенный в стакан с холодной водой, которую он смог прогреть только до температуры $t_1 = 50^\circ\text{C}$. Потом кипятильник вынули из розетки и вставили в неё разветвитель питания (так называемый «тройник»). К первым двум его выходам подключили кипятильники номер 1 и номер 2 (такой же, как кипятильник 1), а к третьему — кипятильник номер 3, той же формы, изготовленный из тех же материалов, но все размеры которого в $n = 2$ раза меньше, чем у кипятильника номер 1. Эти кипятильники положили в стаканы с холодной водой: кипятильники 1 и 3 — в такие же, что и изначально, а кипятильник 2 — в стакан, все размеры которого в n раз меньше, чем у исходного стакана. До каких температур t_2 и t_3 соответственно нагреется за длительное время вода в стаканах, в которые помещены кипятильники 2 и 3? Мощность тепловых потерь через единицу площади поверхности считайте пропорциональной разности температур.

$t_2 \approx 100^\circ\text{C}; t_3 \approx 70^\circ\text{C}; t_4 \approx 34,7^\circ\text{C} \approx \frac{2}{3} \left(\frac{t_k + n t_1 + r U}{R + r} \right) + t_k$

ЗАДАЧА 25. («Росатом», 2017, 10) В сосуд с некоторым количеством жидкости опустили работающий нагреватель мощности $P = 1000$ Вт. При этом температура жидкости повысилась на $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ за время $t_1 = 10$ с. Когда в этот же сосуд опустили работающий нагреватель мощности $P/2$, то температура жидкости повысилась на ΔT за время $t_2 = 24$ с. За какое время температура жидкости в сосуде повысится на ту же величину ΔT , если в сосуд опустить работающий нагреватель мощности $2P$?

$$\boxed{c \rho V = \lambda t}$$

ЗАДАЧА 26. («Курчатов», 2017, 9) На электрической плите стоит цилиндрическая кастрюля с кипящей водой. За $t = 10$ мин уровень воды в кастрюле уменьшился на $h = 2$ мм. Найдите КПД электроплиты, если она работает от источника постоянного тока напряжением $U = 220$ В, сопротивление нагревательной спирали $R = 50$ Ом, площадь поперечного сечения кастрюли $S = 350$ см². Полезной работой плиты считайте теплоту, переданную воде в кастрюле. Удельная теплота парообразования воды $L = 2,3$ МДж/кг, плотность воды $\rho = 1,0$ г/см³.

$$\boxed{\eta \approx \frac{U^2 S t}{R \rho V L} = \eta}$$

ЗАДАЧА 27. («Курчатов», 2015, 10) Аккумулятор массой 5 кг, имеющий ЭДС 5 В, опустили полностью в дистиллированную воду на прочной нити, которая оказалась натянутой с силой 5 Н. Если этому аккумулятору (без воды) сообщить количество теплоты 5 кДж, то он нагреется на 5 градусов. Когда же к этому аккумулятору подключили резистор, через него потек ток силой 5 А, напряжение на выводах аккумулятора уменьшилось на 5%, и через 5 минут аккумулятор немного нагрелся. Найдите:

- 1) среднюю плотность ρ аккумулятора;
- 2) среднюю удельную теплоёмкость c аккумулятора;
- 3) сопротивление R резистора;
- 4) изменение температуры Δt аккумулятора после 5 минут работы с нагрузкой, если потерями теплоты можно пренебречь.

Плотность воды $\rho_0 = 1$ г/см³, ускорение свободного падения $g = 10$ м/с².

$$\boxed{c \rho V = \lambda t; \quad \rho = \frac{m}{V}; \quad \Delta T = \frac{Q}{c m}; \quad R = \frac{U}{I}; \quad U = \mathcal{E} - I R; \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{S h}}$$

Задача 28. (Всеросс., 2003, финал, 10) В 1899 году выдающийся американский физик Роберт Вуд оригинально решил сложную техническую проблему, за что институт, в котором он работал, сразу получил премию в 200000 долларов. Придуманное им «электротаяние» широко используют и сейчас.

Однажды во время сильного мороза в проложенной под землёй к дому сенатора железной трубе длиной $l = 100$ метров на участке длиной $l_1 \approx 5$ метров замёрзла вода, и водопровод перестал работать. Вуд предложил подсоединить к концам трубы провода от вторичной обмотки понижающего трансформатора, и через $t = 10$ минут после подключения из крана полилась вода. Какое примерно напряжение было приложено к концам трубы и какая сила тока была в ней? Как изменилось бы время отогрева, если бы длина замёрзшего участка была в два раза больше?

Диаметры трубы: внутренний $D_1 = 20$ мм, наружный $D_2 = 26$ мм. Для железа: плотность $d_{\text{ж}} = 7,8$ г/см³, удельная теплоёмкость $c_{\text{ж}} = 0,45$ кДж/(кг · К), удельное сопротивление $\rho = 0,1$ Ом · мм²/м. Для льда: плотность $d_{\text{л}} = 0,9$ г/см³, удельная теплоёмкость $c_{\text{л}} = 2,1$ кДж/(кг · К), удельная теплота плавления $\lambda = 340$ кДж/кг.

Примечание. Для упрощения решения можно считать, что снаружи трубы также находится замёрзшая вода.

$$U \approx 0,68 \text{ кВ} \approx \frac{U}{U} = I \cdot R \approx \frac{2 \cdot l_1 \cdot \rho \cdot (D_2^2 - D_1^2)}{D_1^2 \cdot D_2^2} \sqrt{\lambda} \cdot l = U$$