

1. ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ВОДЫ (6 points) — *Johan Runeson*. В этой задаче анализируется фазовая диаграмма воды (графики на отдельной странице, (s) — твердое, (l) — жидкое, (g) — газообразное состояние, соответственно).

На первом графике показана область вблизи тройной точки, на втором — кривая плавления (области в увеличенном масштабе отмечены на графиках). Если две фазы α и β находятся в равновесии, параметры системы описываются уравнением Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{1}{T} \frac{H_\beta - H_\alpha}{V_\beta - V_\alpha},$$

где H_α — удельная энтальпия (на единицу массы) фазы α , а V_α — удельный объем (на единицу массы).

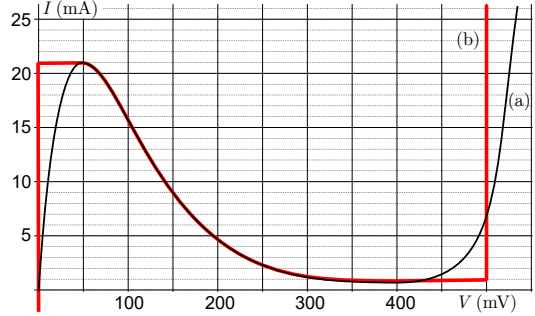
i) (1,5 points) Считая, что $V_g \gg V_l$, найдите уравнение кривой фазового перехода «жидкость-газ» $p(T)$. Ответ выразите через удельную теплоту парообразования $\Delta H_{lg} \equiv H_l - H_g$, давление p_0 в некоторой (реперной) точке на кривой, универсальную газовую постоянную R и молярную массу μ .

ii) (1,5 points) Примем следующую модель: атмосфера Земли однородна; состоит из воздуха и водяного пара; пар находится в равновесии с океаном жидкой воды. На сколько процентов увеличится давление паров воды, если температура атмосферы возрастет на 3°C ? Температура в настоящее время равна 15°C . Числовые значения постоянных: $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \text{ К}^{-1}$ и $\mu = 18,015 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$.

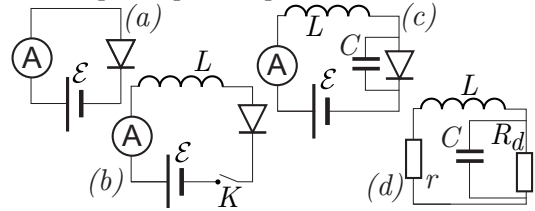
iii) (3 points) Используя разумные приближения рассчитайте $V_l - V_s$, разность удельных объемов воды и льда, при атмосферном давлении.

2. ТУННЕЛЬНЫЙ ДИОД (10 points) — *Jaan Kalda*.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) туннельного диода изображена на рисунке ниже, кривая «а». В некоторых пунктах задачи мы будем использовать идеализированную модельную кривую «б».



i) (1 point) Чтобы построить ВАХ диода, его последовательно подключают к источнику напряжения, \mathcal{E} которого можно менять от 0В до 1В (схема «а»). Внутреннее сопротивление амперметра $r = 2\text{Ом}$; напряжение на источнике $\mathcal{E} = 50\text{мВ}$. Чему равно напряжение V_i на диоде и сила тока I_i через него? Определите эти параметры по реальной ВАХ диода.



ii) (1 point) Рассмотрим влияние индуктивности проводов. Эквивалентная схема будет выглядеть как показано на схеме «б», $L = 500 \text{ нГн}$. При разомкнутом ключе K напряжение источника устанавливают равным $\mathcal{E} = 250 \text{ мВ}$. Затем ключ замыкают. За какое время сила тока достигнет $I_1 = 20 \text{ мА}$? Здесь и далее (если не сказано иное) можно пренебречь внутренним сопротивлением источника и амперметра ($r = 0$), также используйте идеализированную ВАХ диода.

зированную ВАХ диода.

iii) (1 point) В условиях пункта ii) за какое время после замыкания ключа напряжение на диоде достигнет $V_2 = 500 \text{ мВ}$?

iv) (2 points) В условиях пункта ii) постройте график зависимости силы тока через диод от времени и найдите период колебаний силы тока.

v) (2 points) Схему «б» используют для построения ВАХ диода: для каждой снимаемой точки при разомкнутом ключе выставляется желаемое напряжение, затем ключ замыкают. Когда ток через амперметр осциллирует с высокой частотой, амперметр показывает **среднюю силу тока**. Постройте ожидаемые результаты измерений, т.е. зависимость средней силы тока через амперметр от напряжения на источнике $V = \mathcal{E}$.

vi) (1 point) До сих пор диод считался идеальным, но на самом деле он обладает небольшой паразитной емкостью $C = 30 \text{ пФ}$. Если учесть это, то эквивалентная схема преобразуется в схему «с». Здесь нужно учесть, что у амперметра есть внутреннее сопротивление $r = 2 \text{ Ом}$. Пусть после замыкания ключа напряжение медленно увеличили с $\mathcal{E} = 0 \text{ мВ}$ до $\mathcal{E} = 150 \text{ мВ}$, так, что достигнут стационарный режим (без колебаний) $V(t) \equiv V_0$ и $I(t) \equiv I_0$. Допустим, возникла небольшая флуктуация в силе тока через диод и напряжении на нем: $I = I_0 + \delta I(t)$ и $V = V_0 + \delta V(t)$, где I_0 и V_0 — сила тока и напряжение в стационарном режиме. Для флуктуаций небольших амплитуд, ВАХ диода может быть линеаризована, что приводит к справедливости выражения $\delta V = R_d \delta I$, где R_d — «дифференциальное сопротивление» диода. Определите значение R_d .

vii) (2 points) Продолжая предыдущий пункт, рассмотрим устойчивость системы. Небольшая возникшая флуктуация силы тока $\delta I(t)$ может экспоненциально

расти, а может не расти. Это определяется параметрами системы. Можно показать, что анализ устойчивости схемы «с» эквивалентен анализу схемы «d» (убран источник напряжения, а диод заменен на дифференциальное сопротивление, найденное в предыдущем пункте). Какой может быть наибольшая индуктивность L проводов, при которой система устойчива?

3. Коническая комната (3 points) — *Maté Vigh*. Интерьер комнаты современного музея представляет собой прямой конус, половина угла раствора равна 60° (т.е. угол между стенами и вертикалью — 60°). Снаряд запускают из центра основания конуса. Минимальная скорость, необходимая для достижения вершины (т.е. высшей точки стен), равна v_0 . Найдите минимальную скорость снаряда, необходимую для достижения стен конуса.

4. Дрон (9 points) — *Lasse Franti & Jaan Kalda*. Дрон тянет брусок за нить, как показано на рисунке на отдельном листе; брусок скользит с постоянной скоростью по горизонтальной поверхности. Брусок изготовлен из однородного материала. Можно проводить измерения на рисунке (на отдельном листе), считая, что размеры тел и расстояния соответствуют действительности с некоторым неизвестным масштабным коэффициентом. Если вы читаете условие с экрана, для вашего удобства на рисунке нанесены вспомогательные пунктирные линии (они могут быть полезны).

i) (2 points) Найдите коэффициент трения между бруском и поверхностью.

ii) (2 points) Определите массу бруска, если масса дрона $m = 1 \text{ кг}$.

iii) (2 points) Теперь рассмотрим полет дрона в адиабатической атмосфере. В адиабатической атмосфере при смещении порции воздуха по вертикали измене-

ние ее параметров происходит по адиабатическому закону. Можно показать, что в такой атмосфере температура является линейной функцией высоты z :

$T = T_0 - zg/c_p$, где $T_0 = 293\text{ К}$ — температура у поверхности, $c_p = 1,00\text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}\text{К}^{-1}$ — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, и $g = 9,81\text{ м/с}^2$. Найдите зависимость плотности воздуха ρ от высоты. Ответ выразите через плотность ρ_0 у поверхности (на высоте $z = 0$), удельную теплоемкость воздуха при постоянном объеме $c_v = 0,718\text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}\text{К}^{-1}$, и определенные ранее величины.

iv) (3 points) Считая, что максимальная вы-

сота полета дрона без нагрузки z_{\max} ограничивается мощностью его двигателей, найдите z_{\max} . Известно, что мощности двигателей хватает лишь для того, чтобы приподнять от поверхности нагрузку равную 50% массы дрона. Влиянием турбулентных эффектов на тягу двигателя можно пренебречь.

5. Звук бутылки (8 points) — *Jaan Kalda & Eero Uustalu*. **Оборудование:** пустая бутылка (1 л), небольшой (около 100 мл) сосуд известного объема или другой инструмент для измерения объема воды, смартфон с установленным приложением “Physics Toolbox Sensor Suite” или “Physics Toolbox

Pro” (укажите в своем решении, какую версию вы использовали).

Если подуть возле бутылочного горлышка, можно услышать свистящий звук: необходимо, чтобы поток воздуха возле бутылочного горлышка был перпендикулярен оси бутылки. Ваша задача исследовать зависимость частоты генерируемого звука f от объема воды V в бутылке.

i) (4 points) Измерьте частоту звука, дунув возле горлышка бутылки. Используйте либо “tone detector”, либо “spectrum analyzer” в меню приложения “Physics Toolbox” (после запуска приложения меню можно найти в левом верхнем углу экрана). Для опре-

деления частоты максимума спектра используйте “tone detector” (если вам удастся получить звук хорошего качества) или “spectrum analyzer” (в противном случае). Полученные данные занесите в таблицу.

ii) (1 point) Предложите функциональную зависимость f от V , используя анализ своих данных или теоретический вывод.

iii) (3 points) С помощью графика проверьте, насколько верна предложенная вами зависимость. Определите параметры вашей зависимости. Оценка погрешностей не требуется.

