

1. ФОТОННАЯ РАКЕТА (5 б) — *Jaan Kalda, Oskar Vallhagen*. Рассмотрим гипотетическое межзвездное путешествие на космическом корабле с фотонным двигателем. Начальная масса покоя корабля равна $M = 1 \times 10^5$ кг. Находясь на борту топлива (антивещество) аннигилирует с веществом, при этом образуются фотоны, и в результате появляется реактивная сила. Вещество, необходимое для аннигиляции, берется из разреженной плазмы, находящейся в межзвездном пространстве (считайте, что скорость плазмы равна нулю в системе отсчета связанной с Землей). Скорость света равна $c = 3 \times 10^8$ м/с.

i) (1 б) Каким должен быть начальный расход топлива (скорость с которой нужно сжигать антивещество) μ (кг/с), чтобы придать кораблю ускорение равное ускорению свободного падения на Земле ($g = 9,81$ м/с²)?

ii) (3 б) Двигатели корабля выключают, когда его масса покоя уменьшилась до $m_f = M/10$. Чему равна его конечная скорость?

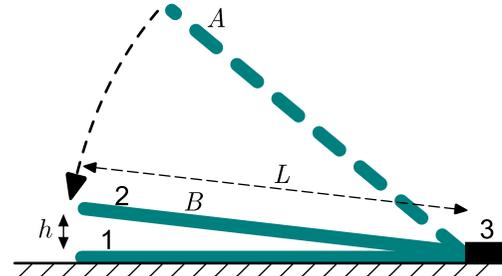
iii) (1 б) Наблюдатель на Земле измеряет частоту испущенных кораблем фотонов. Какую частоту он измерит для последних испущенных фотонов (непосредственно перед выключением двигателей)? Частота фотонов в системе отсчета корабля постоянна и равна f_0 .

2. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА И ЖИДКОСТИ (10 б) — *Jaan Kalda, Pärtel Simson*.

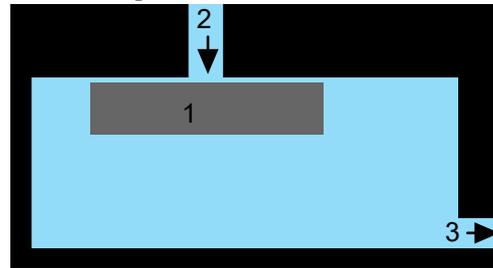
i) (1 б) Если уронить одну стеклянную пластину на другую, то может быть так, что она не разобьется, а мягко остановится. На рисунке изображен этот случай: первая пластина («1» на рисунке) лежит на столе, вторая пластина («2») падает и, упираясь в небольшой выступ («3»), не скользит. Падающая пластина в начальный момент находилась в положении **A**, а в данный момент находится в положении **B** — на небольшом расстоянии $h = h_0$ от покоящейся пластины. Угловая скорость падения пластины в данный момент равна ω_0 . Чему равна скорость воздуха между пла-

стинами возле их левых ребер?

ii) (2,5 б) У стеклянной пластины известны следующие параметры: ширина $L \gg h_0$, толщина $t \ll L$, плотность ρ_g . Длина стеклянной пластины (размер в глубину рисунка) много больше L . Как будет зависеть от h угловая скорость пластины при ее дальнейшем движении? Плотность воздуха равна ρ_a . Силой тяжести, вязкостью и сжимаемостью воздуха можно пренебречь. Также считайте, что поток воздуха везде ламинарный.



iii) (3 б) Цилиндрический каменный диск («1» на рисунке) радиуса R , высоты h и плотности ρ_s удерживается у крышки резервуара с водой (плотность воды ρ_w). Из-за неровностей поверхности крышки между диском и крышкой остается небольшой зазор шириной $t \ll R$. В крышке сделано круглое отверстие («2») радиуса $r \ll R$, диск и отверстие расположили соосно (см. рис). Радиус отверстия много больше ширины зазора, $r \gg t$. В резервуар через отверстие («2») заливают воду, вытекает вода через отверстие («3»), которое находится далеко. Каким должен быть массовый расход μ (кг/с) втекающей жидкости, чтобы диск не падал? Ускорение свободного падения g .



iv) (0,5 б) Паровые турбины широко используются в электрогенерации. Рассмотрите

упрощенную модель: вода кипит при температуре $t_t = 180^\circ\text{C}$ и давлении $p_t = 1 \times 10^6$ Па (в реальности давления могут быть намного больше), а затем получившийся пар вылетает через цилиндрический канал сечением $A = 1$ см². Давление в окружающем пространстве $p_0 = 1 \times 10^5$ Па. Найдите измерение энтропии ΔS одного моля пара и одного моля жидкости в вылетающей струе. Молярная масса воды $M = 18$ г/моль, удельная теплота парообразования при 100°C : $L = 2,3$ МДж/кг.

v) (3 б) Найдите массовый расход μ получившейся струи. Найдите также долю r воды, находящейся в струе в жидкой фазе. Считайте, что при движении к каналу и в канале, расширение паров воды обратимо (т.е. теплопроводностью можно пренебречь, и жидкая и газообразная фаза всегда находятся в равновесии). Показатель адиабаты водяного пара $\gamma = 4/3$.

3. ВРАЩАЮЩАЯСЯ КОСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ (13 б) — *Jaan Kalda, Pärtel Simson*. Космическая станция, расположенная на геостационарной орбите, имеет форму цилиндра длины $L = 100$ км и радиуса $R = 1$ км. Станция заполнена воздухом (его молярная масса $M = 29$ г/моль) при атмосферном давлении и температуре $T = 295$ К. Цилиндрическая поверхность служит «полом» для обитателей станции. Станция вращается вокруг своей оси, и создает привычное ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с² на «полу».

i) (0,5 б) Чему равен период вращения τ ?

ii) (2 б) Мяч бросают из некоторой точки на «полу», а затем, спустя $t = \tau/2$, ловят его в той же самой точке. С какой скоростью бросали мяч? Соппротивлением воздуха пренебречь.

iii) (2 б) Воздушный шарик радиуса $r = 3$ м наполнили гелием (молярная масса гелия $M' = 4$ г/моль). Шарик используют чтобы поднять груз неизвестной массы m . Груз прикрепили к шарика легкой веревкой длины $L = 20$ м. Эта конструкция поднимается и в конце концов останавливается на высоте $H = 500$ м от «пола». Определите значение массы m .

Веревка (ее линейная плотность $\lambda = 1$ кг/м) прикреплена к «полу» в двух диаметрально противоположных точках цилиндра (так, что расстояние между ее концами равно $2R$). Пусть точки **A**, **B**, и **C** — это два конца веревки и ее середина соответственно.

iv) (1,5 б) Пусть точка **C** расположена на высоте h над «полом». Найдите $T_A - T_C$, разность сил натяжения веревки в точках **A** и **C**.

v) (1,5 б) Пусть в точке **A** угол, который составляет веревка с «полом» равен α . Найдите отношение сил натяжения T_A/T_C .

vi) (1,5 б) Аппроксимируя форму веревки параболой, найдите T_C , если $h = 495$ м.

vii) (2 б) Металлические стены станции заряжены. Их полный заряд равен Q . Внутри станции над «полом» неподвижно парит заряженный шарик. Найдите отношение заряда к массе q/m шарика. Зарядами, индуцированными шариком на «полу», можно пренебречь.

viii) (2 б) Теорема Гаусса утверждает, что $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 0$, где интеграл берется по замкнутой поверхности, окружающей объем V , в котором нет зарядов. Как нужно изменить это выражение с точки зрения обитателя станции, если никаких других зарядов (кроме Q , распределенного по периметру станции) нет.

4. РАСТЯГИВАНИЕ ПЕРЧАТОК (8 б) — *Eero Uustalu*.

Оборудование Три пары медицинских латексных перчаток, скотч, ножницы, три линейки, портновский метр, маркер, миллиметровка. Перчатки можно разрезать на части, которые можно прикрепить к столу скотчем и/или линейкой (чтобы крепление было прочнее).

Латекс — эластичный материал, который очень хорошо тянется. Можно считать, что при растяжении его объем остается постоянным вплоть до разрыва материала.

В каждом из заданий схематично зарисуйте свою экспериментальную установку.

ку и объясните, какие действия вы предпринимаете, чтобы добиться более высокой точности. Результаты прямых измерений обязательно занесите в таблицу.

i) (1 б) Определите значение макси-

мальной деформации ε_m полоски латекса (т.е. деформацию, при которой полоска рвется). Деформация (или относительное удлинение) – это $\varepsilon = (l - l_0)/l_0$, где l и l_0 – длины полоски в растянутом и нерастя-

нутом состояниях соответственно.

ii) (7 б) Определите и постройте график зависимости напряжения от деформации для полосок латекса. Напряжение – это сила натяжения, деленная на поперечное

сечение. Выразите напряжение σ в относительных единицах, нормируйте на максимальное напряжение, которое достигается, когда полоска рвется.