Инженерная олимпиада школьников-2015/2016

Оформление см. в № 11/2015

Представлены задания отборочного тура IVинженерной олимпиады школьников, проведённой силами пяти ведущих российских вузов. Проведён подробный разбор решений.

Ключевые слова: абитуриент, инженерная олимпиада, динамика, термодинамика, МКТ, НГТУ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», НИЯУ МИФИ, МГУПС (МИИТ), СГАУ

М.Е. БУШУЕВА
(НГТУ, Нижний Новгород),
Е.А. ИЗЖЕУРОВ
(СГАУ, г Самара)
А,А. МИНИНА
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург),
С.Е. МУРАВЬЁВ
semuraviev@mail.ru
(НИЯУ МИ ФИ, г. М осква),
А.П. ПРУНЦЕВ
(МГУПС (МИИТ), г. Москва),
В.И. СКРЫТНЫЙ
viskrytnyj@mephi.ru
(НИЯУ МИФИ, г. Москва),
И.В. ЧОСТКОВСКАЯ
(СГАУ, г Самара)

В 2012 г. «на карте» олимпиадного движения страны появилась необычная – Инженерная олимпиада школьников, которую проводят пять ведущих технических университетов нашей страны: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Самарский государственный аэрокосмический университет (НИУ) и Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ». Эта олимпиада по физике в технике, по физике вокруг нас, по физике в жизни человеческой цивилизации.

Все задания инженерной олимпиады носят не «разговорный», а вполне конкретный – расчётный или оценочный характер. Это и прикладная механика, и статика с простейшими расчётами статических инженерных конструкций, и техническая термодинамика, и электротехника, и электроника, и техническая оптика. За несколько лет в заданиях олимпиады рассматривались: трение в жизни человека (автомобиль, прокатный стан, лыжные мази), работа ряда технических устройств (дифференциал, шарнир Липкина–Посселье, пылесос, винглеты), диодные ключи и вообще элементы цепей с нелинейными вольтамперными характеристиками, статические конструкции (кронштейны, мостовые фермы, цепи подвесных мостов), различные модели теплопередачи и теплоизоляции, модели формирования автомобильных пробок, оценки ряда «окружающих» нас величин – объёма своего тела, силы сопротивления, действующей на машину, деформации колонн, давления пороховых газов и ряд других. Уже этот далеко не полный перечень показывает, какими значимыми, интересными и необычными для школьников являются задания инженерной олимпиады. При этом важно подчеркнуть, что задания не выходят за рамки школьной программы и доступны хорошим школьникам. Но они совсем непримитивны, необычны и, мы надеемся, интересны.

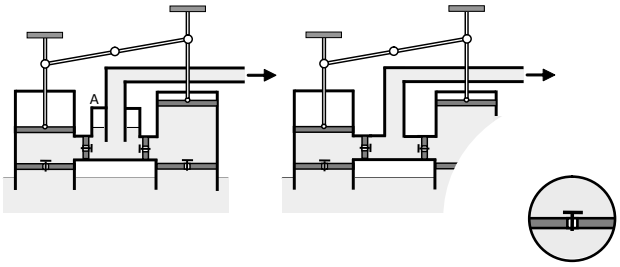
И ещё. Как показали первые олимпиады, побеждают частники, обладающие большей «широтой» знаний. Чем больше вы знаете о технике, тем легче вам участвовать (и тем болбше шансов победить) в инженерной олимпиаде. А поскольку школьники «в среднем» такой широтой знаний похвастаться не могут, на сайте олимпиады размещается много самой разной информации для подготовки к ней. Это и задания олимпиады прошлых лет с подробными решениями, и видеоуроки, и учебные пособия. Используйте эти материалы!

Мы продолжим проведение Инженерной олимпиады школьников и приглашаем всех желающих принять в ней участие. Следите за сайтами вузов-организаторов.

Задания отборочного тура

9–10 классы

1. На рисунке (см. с. ??) приведены схемы двух пожарных насосов, которые опускают на воду и при возвратно-поступательном движении поршней в цилиндрах обеспечивают движение воды. Объясните, как работают насосы. Левый насос отличается от правого наличием камеры *A*, в которой есть небольшое количество воздуха. В чём функция этой камеры? В чём проявляется разница в работе насосов? Клапаны пропускают воду только в одном направлении (внизу справа клапан показан более крупно).



Решение. При движении левого поршня вниз, а правого – вверх увеличивается давление в левой камере насоса и уменьшается в правой. Поэтому нижний левый клапан закрывается, левый боковой – открывается, пропуская воду из левой камеры в центральную. Одновременно правый боковой поршень закрывается, не пропуская воду из центральной камеры в правую, давление в правой камере уменьшается, правый нижний поршень открывается, и вода засасывается из водоёма в правую камеру. Затем процесс повторяется.

Разница между насосами заключается в следующем. Правый насос даёт напор воды только при движении поршней. Около «мёртвой точки» их движения поршни не давят на воду, давление в воде падает, вода не течёт. То есть правый насос работает прерывисто – в момент движения поршней вода течёт, около мёртвой точки хода поршней напор падает.

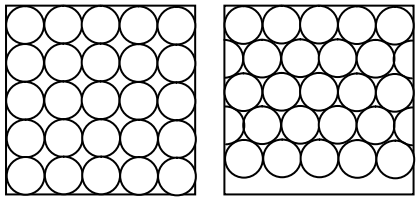
В левом насосе за счёт сжатия воздуха в камере *A* создаётся повышенное давление, которое обеспечивает напор даже около мёртвой точки хода поршней. В результате левый насос обеспечивает непрерывное откачивание воды, в то время как правый работает прерывисто.

2 (2 балла). Песок является важнейшим природным сыпучим материалом, применяемым в строительстве. Параметрами, определяющими свойства сыпучего материала, являются его *истинная плотность* (плотность частиц материала) и *насыпная плотность* (средняя плотность сыпучего материала в неуплотнённом состоянии). Оцените насыпную плотность песка, считая, что все песчинки имеют одинаковый размер, если его истинная плотность $\rho = 2600$ кг/м^3. Как насыпная плотность зависит от размера песчинок? Все необходимые для расчёта величины выберите исходя из здравого смысла.

Решение. Песчинки представляют собой маленькие кусочки диокисида кремния неправильной формы. Поэтому насыпная плотность песка зависит от степени его «уплотнения»: когда «неправильности» песчинок входят друг в друга, и насыпная плотность песка может приближаться к истинной. Если же никаких специальных усилий по уплотнению песка не предпринимается, между песчинками остаются пустоты, и его насыпная плотность может быть значительно меньше истинной. Оценим насыпную плотность. Будем для оценки считать, что песчинки представляют собой шарики одинакового радиуса r (согласно условию считаем, что все песчинки имеют одинаковые размеры). Конечно, это предположение является приближённым, однако промежутки между песчинками неправильной формы без специальных усилий по уплотнению песка в каких-то случаях являются бОльшими, в каких-то – меньшими, чем пустоты между шариками, и предположение о круглой форме песчинок для вычисления объёма пустот является разумным. Пусть песок заполняет куб с ребром a. Тогда в кубе содержатся $N \sim (a/2r)^3$ песчинок, имеющих суммарный объём $V = N\frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{1}{6}\pi a^3$. Поэтому масса песка в объёме куба равна $m = \rho V = \frac{1}{6}\pi\rho a^3$, где ρ – истинная плотность песка. Отсюда находим насыпную плотность песка, как отношение массы песка в объёме куба к его объёму:

$$\rho_0 = \frac{m}{a^3} = \frac{1}{6}\pi\rho \approx \frac{1}{2}\rho = 1300 \text{ кг/м}^3.$$

Как следует из этой формулы, насыпная плотность приблизительно вдвое меньше истинной и не зависит от размера песчинок (при условии, что все они имеют одинаковый размер).



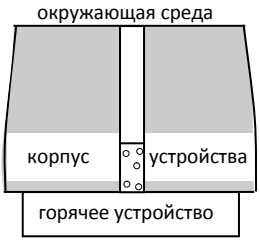
Можно предложить и модель более плотной «упаковки» песчинок. Модель, которая была рассмотрена выше, отвечала ситуации, изображённой на левом рисунке. Но если каждый последующий ряд сдвинуть относительно предыдущего на величину радиуса песчинки, то расстояние между двумя слоями уменьшится в $2/\sqrt{3} \approx 1{,}15$ раза, и плотность песка возрастёт в такой же пропорции (в пренебрежении размером песчинок по сравнению с размером ёмкости), то есть в $2/\sqrt{3} \approx 1{,}15$ раза. Именно такой должна быть разность между плотностью песка в уплотнённом и неуплотнённом состояниях.

В случае разброса размеров песчинок насыпная плотность снижается по сравнению с вышеприведённой оценкой. Это связано с тем, что песчинки большого размера дают «матрицу», которая запол-

*Ссылка на К.Д. Краевича и на обзор по пожарным насосам. (Первый пожарный обоз Самары http://www.kraeved-samara.ru/archives/481)

няется песчинками меньшего размера. В результате в среднем увеличиваются промежутки между песчинками, и насыпная плотность песка уменьшается.

3. Для охлаждения устройств, температура которых не сильно превышает температуру окружающей среды (как например, «материнская» плата компьютера) используют тепловые трубки – запаянные с двух концов трубки, содержащие жидкость с низкой температурой кипения. Теплообмен осуществляется между нижним концом трубки и охлаждаемым устройством, а также её верхним концом и окружающей средой. Объясните принцип работы трубки. Оцените, какое количество воды необходимо пропускать в единицу времени по обычной системе охлаждения, чтобы обеспечить ту же теплопередачу от устройства к окружающей среде. Температура устройства $T_0 = 50$ °C, температура окружающей среды $T_0 = 20$ °C. Для оценки примите удельную теплоёмкость воды $c = 4 \cdot 10^3$ Дж/(кг · °C), удельную теплоту парообразования жидкости в трубке $\lambda = 2 \cdot 10^6$ Дж/кг. Предложите конструкцию тепловой трубки, которая могла бы работать в горизонтальном положении.



Решение. Тепловая трубка работает следующим образом. Если температура кипения жидкости подобрана так, что она имеет промежуточное значение между температурой устройства и температурой окружающей среды, то между устройством и кипящей жидкостью происходит теплообмен. Благодаря поступлению количества теплоты жидкость выкипает, пар поднимается вверх, контактирует с окружающей средой, отдаёт ей энергию и конденсируется в верхней части трубки. Затем под действием силы тяжести сконденсировавшаяся жидкость, имеющая температуру окружающей среды, опускается вниз, снова нагревается за счёт теплообмена с горячим устройством, выкипает и так далее. Таким образом за один цикл жидкость переносит количества теплоты, необходимое для её испарения, $Q = \Delta m\lambda$, где Δm – масса жидкости в трубке, λ – удельная теплота парообразования для данной жидкости.

Эффективность охлаждения с помощью тепловых трубок связана с тем, что количество теплоты, необходимое для нагревания теплоносителя на небольшой интервал температур ΔT, гораздо меньше количество теплоты, необходимой для его испарения. Например, для воды $c\Delta T < \lambda$, если $\Delta T < 500$ °C. Поэтому при малых ΔT (а при охлаждении материнской платы компьютера эта величина порядка 30–50 °C) нужно обеспечить большой поток теплоносителя.

Оценить этот поток можно так. Если трубка в единицу времени переносит количество теплоты $\Delta m\lambda$ (где Δm – масса жидкости, выкипающей в единицу времени), то такое же количество теплоты можно передать с помощью обычного теплопереноса с помощью теплоносителя массой ΔM:

$$c\,\Delta M\,\Delta T = \Delta m\lambda,$$

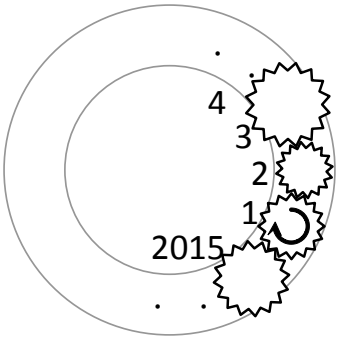
где ΔT –разность температур между устройством и теплоносителем, которая по порядку величины близка к разности температур между устройством и окружающей средой. Отсюда получаем:

$$\frac{\Delta M}{\Delta m} = \frac{\lambda}{c\Delta T} \sim 20\ .$$

То есть для осуществления такой же теплопередачи, как в тепловой трубке, необходимо пропускать около охлаждаемого устройства в 20 раз больше теплоносителя, чем его выкипает в трубке.

Для работы горизонтальной трубки (и даже с наклоном вниз) необходимо предложить механизм возврата жидкости назад (испарившийся горячий пар будет «уходить» в любом направлении благодаря давлению). Такой механизм могут обеспечить капиллярные силы. Внутренние поверхности трубок горизонтальной ориентации покрывают гигроскопическим материалом (органической тканью или пористой керамикой). Жидкость, сконденсировавшись на холодном конце трубки, перемещается в сторону горячего конца благодаря капиллярным силам.

4. В плоскости расположено 2015 зубчатых колёс (отличающихся размеров) с зацепляющимися зубцами . Колёса расположены по кругу, как показано на рисунке, и 2015-е кольцо зацепляется за первое. Первое кольцо вращается по часовой стрелке (см. рисунок). Может ли вращаться такая система? Ответ обосновать.



Решение. Рассмотрим два зацепляющихся зубчатых колеса, вообще говоря, разных радиусов. При вращении одного из них второе будет вращаться так, что линейные скорости точек колёс в точке их соприкосновения будут совпадать (поскольку зубцы

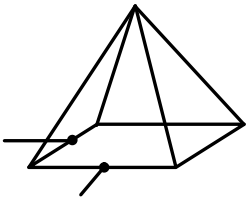
бронзовой мемориальной доски в честь ПОПОва в Петербурге

усовершенствования в передаче электри-

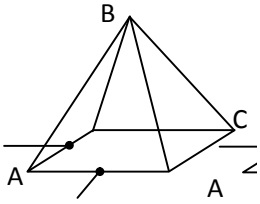
http://p-i-f.livejournal.com/3661449.

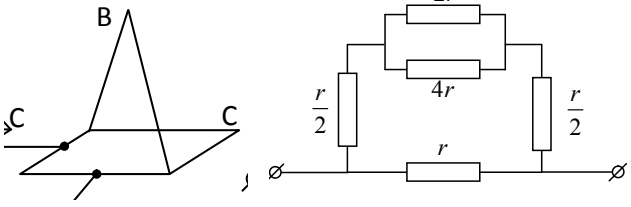
шестерёнок не проскальзывают друг относительно друга, а движутся вместе). Поэтому зацепляющиеся зубчатые колеса вращаются в разные стороны – одно по часовой стрелки, а второе против. Если есть третье зубчатое колесо, связанное с одним из первых двух, то оно будет вращаться в противоположном направлении по сравнению с колесом, с которым оно зацеплено, и линейная скорость его поверхности будет такая же, как у первых двух. И так далее. Поэтому, чтобы система колёс, связанных друг с другом «по кругу», могла вращаться, нужно, чтобы первое и последнее колёса вращались в разных направлениях, а линейные скорости точек поверхности совпадали. Второе условие выполняется всегда независимо от размеров колёс, первое же условие выполняется только в том случае, если число колёс «в круге» – чётное. Поскольку у нас оно нечётное, такая система колёс вращаться не может.

5. Из проволоки спаяли четырёхугольную пирамиду. Все рёбра основания имеют сопротивление r, боковые ребра – сопротивление $2r$. К серединам двух соседних ребер основания подводят электрическое напряжение. Найти сопротивление пирамиды.



Решение. Очевидно, что данная цепь симметрична относительно вертикальной плоскости ABC. Поэтому потенциалы т. A, B и C одинаковы, то есть по проводникам AB и BC ток не течёт, и их можно удалить. После удаления этих проводниеов цепь упрощается – её эквивалентная цепь изображена на рисунке.

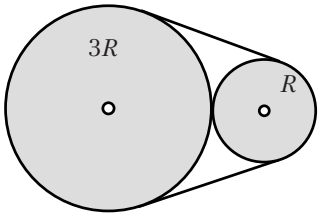




Общее сопротивление легко вычисляется:

$$R = \frac{7r}{10}.$$

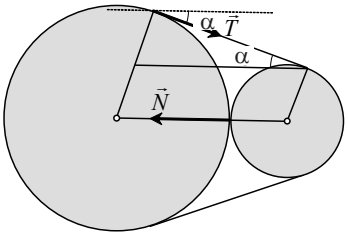
6. На два шкива с радиусами R и $3R$, лежащих в одной плоскости, надели стягивающее их резиновое кольцо. Известно, что нерастянутое кольцо плотно (но без усилия) надевается на большой шкив. Найти силы, с которыми шкивы действуют друг на друга. Коэффициент жёсткости резины, из которой сделано кольцо, равен k. Считать, что закон Гука работает при любых удлинениях резины кольца



Решение. Пусть сила натяжения кольца равна $\vec{T}$. Тогда условие равновесия каждого шкива даёт:

$$2T\cos\alpha = N,$$

где $\vec{N}$ – сила нормальной реакции, действующая на один шкив со стороны другого, α – угол между участком кольца между шкивами и отрезком, соединяющем центры шкивов. Геометрически очевидно, что



$$\sin\alpha = \frac{3R - R}{3R + R} = \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad \alpha = 30°.$$

Отсюда находим длину растянутого кольца, которая равна удвоенной длине участка кольца между шкивами, длине участка кольца, охватывающего большой шкив и опирающегося на угол 240° и длине участка кольца, охватывающего малый шкив и опирающегося на угол 120°. Таким образом, длина растянутого кольца есть

$$L = 3R\frac{2}{3}2\pi + R\frac{1}{3}2\pi + 4R\sqrt{3} = 2R\left(\frac{7\pi}{3} + 2\sqrt{3}\right).$$

Это значит, что кольцо удлинилось на величину

$$\Delta L = L - 6\pi R = 4R\left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{3}\right)$$

и, следовательно, сила натяжения кольца есть

$$T = k\Delta L = 4kR\left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{3}\right).$$

Отсюда находим

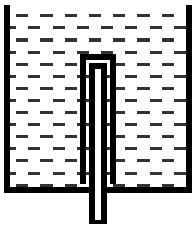
$$N = 2T\cos 30° = \sqrt{3}T = 4kR\left(3 - \frac{\sqrt{3}\pi}{3}\right).$$

11 класс

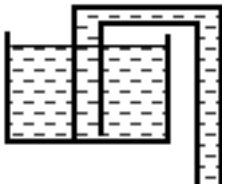
1. Древнегреческий механик Герон Александрийский считается одним из первых инженеров в истории человечества. Он изобрёл (I век нашей эры!) автомат для продажи воды, прообраз парового двигателя, одометр (прибор для измерения скоро-

сти вращения колеса) и другие устройства . Одно из изобретений Герона – сифон: изогнутая трубка, позволяющая жидкости перетекать из одного сосуда в другой (кстати, слово *сифон* в переводе с греческого означает *насос*).

На рисунке показан двойной сифон Герона. В дне стакана сделано отверстие, в которое плотно вставлена открытая с обоих концов трубка. На трубку надета вторая трубка, диаметром чуть больше первой и закрытая сверху. Контакт между второй трубкой и дном стакана неплотный, так что жидкость подтекает в зазор. В стакан до краёв быстро наливают воду так, что за время наливания вода не успевает вылиться через трубку. Что будет происходить потом? Ответ обоснуйте.



Решение. Основная идея работы сифона заключается в следующем. Пусть имеется изогнутая трубка с коленами разной длины, одно из которых (короткое) помещено в сосуд с водой, а второе находится снаружи. Пусть трубку каким-то образом заполнили водой без разрывов (см. рисунок). Что будет дальше? Очевидно, атмосферное давление не даст «разорваться» воде в трубке (другими словами, образоваться в ней пустоте). Это значит, что вода в трубке будет вести себя, как единое целое. А поскольку вода в длинном колене трубки создаёт большее давление, чем в коротком, вода в трубке начнёт двигаться в направлении длинного колена. Таким образом, вода в сосуде будет «засасываться» в трубку и вытекать через длинное колено. Очевидно, этот процесс закончится только тогда, когда вся вода вытечет из сосуда (или, точнее, когда уровень воды в сосуде опустится ниже короткого конца трубки).



Похожий процесс протекает и в двойном сифоне Герона, о котором говорится в условии задачи. Когда мы наливаем в сосуд воду, она, подтекая под край внешней трубки, заполняет её полностью, выталкивая воздух через внутреннюю трубку, а потом начинает вытекать через неё сама, заполняя длинное колено трубки. И мы получаем сифон, длинным коленом которого является внутренняя трубка, а коротким – пространство между трубками в сосуде. А это значит, что ВСЯ вода вытечет через трубку из сосуда.

2–4. Задачи 2, 3, 5 соответственно из задания для 9–10 классов.

5. Мяч бросают вертикально вверх со скоростью v_0 = 10 м/с. Учитывая силу сопротивления воздуха, определите, что больше: время подъёма или время спуска. Оцените отношение времён подъёма и спуска, если известно, что установившаяся скорость падения этого мяча в воздухе равна $10v_0$. Считайте, что сила сопротивления воздуха, действующая на мяч, пропорциональна его скорости.

Решение. Если бы сила сопротивления воздуха не действовала, то время подъёма мяча было бы равно времени спуска. При действии силы сопротивления воздуха механическая энергия мяча уменьшается, и, следовательно, на одной и той же высоте на подъёме мяч имеет бОльшую скорость, чем на спуске. Поэтому время подъёма меньше времени спуска.

Поскольку установившаяся скорость падения мяча гораздо больше начальной, движение мяча является «почти равноускоренным». Поэтому для оценки используем законы равноускоренного движения.

Сначала найдём силу сопротивления воздуха. По условию, сила сопротивления пропорциональна скорости мяча: $F_c = kv$ (где k – коэффициент пропорциональности) и при $v = 10v_0$ совпадает с весом мяча. Поэтому можем записать:

$$mg = 10kv_0 \Rightarrow k = \frac{mg}{10v_0}.$$

Теперь найдём параметры движения:

– высота подъёма практически равна $h = \frac{v_0^2}{2g}$,

– время подъёма $t_{под} = \frac{v_0}{g}$.

Средняя сила сопротивления воздуха, действующая на тело на этом пути, определяется соотношением $F_{ср} = kv_{ср} = k\frac{v_0}{2} = \frac{mg}{20}$, где $v_{ср} = v_0/2$ – средняя скорость тела на подъёме.

Во время подъёма сила сопротивления совершила работу $A_{сопр} \approx -F_{ср}h = \frac{1}{20}\cdot\frac{mv_0^2}{2}$

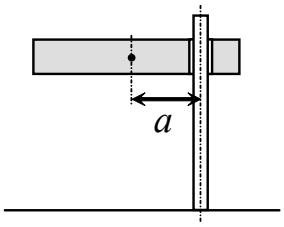
Это значит, что механическая энергия мяча уменьшилась на 1/20. Поэтому средняя скорость мяча на спуске определяется соотношением:

$$v_{ср} = \frac{v_0}{2}\sqrt{1-\frac{1}{20}}.$$

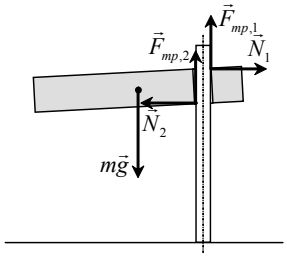
Оценка отношения времени подъёма ко времени спуска имеет вид:

$$\frac{t_{под}}{t_{спус}} = \frac{1}{\sqrt{1-1/20}} = \sqrt{\frac{20}{19}} \approx 1+\frac{1}{40}.$$

6. На вертикальный стержень круглого сечения радиуса r = 0,5 см надевают пластину с вырезанным в ней круглым отверстием, диаметр которого немного больше диаметра стержня. Толщина пластины d = 1 см, расстояние от её центра тяжести до центра стержня a = 10 см. При каком значении коэффициента трения между пластиной и стержнем пластина не будет скользить по стержню?



Решение. В результате действия силы тяжести пластину чуть-чуть «перекосит» относительно стержня, и возникнут силы реакции и силы трения. В результате на пластину будут действовать (см. рисунок): сила тяжести $m\vec{g}$ (в геометрическом центре пластины – сдвигом центра тяжести пластины из-за вырезания отверстия пренебрегаем), силы нормальной реакции $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$ со стороны стержня и силы трения $\vec{F}_{тр1}$ и $\vec{F}_{тр2}$. Условие моментов относительно точки приложения силы $\vec{N}_2$ даёт:



$$mga = N_1 d \Rightarrow N_1 = \frac{mga}{d}$$

(считаем, что толщина стержня очень мала, и перекос пластины очень мал и приводит только к возникновению сил реакции и трения, но практически не меняет её расположения в пространстве).

Аналогично, $N_2 = \frac{mga}{d}$.

Таким образом, и силы реакции $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$, и, следовательно, силы трения $\vec{F}_{тр1}$ и $\vec{F}_{тр2}$ одинаковы.

Чтобы пластина была в равновесии, силы трения должны компенсировать силу тяжести: $2F_{тр} = mg$. При этом пластина будет в покое, если силы трения не превысят своих максимальных значений kN, где k – коэффициент трения. Отсюда получаем, что пластина будет в покое, если

$$\frac{mg}{2} \le \frac{kmga}{d} \Rightarrow k \ge \frac{d}{2a}.$$

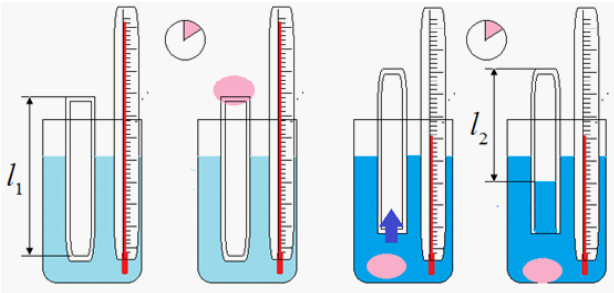
Проверка закона Гей-Люссака

Предложена усовершенствованная фронтальная лабораторная работа, исключающая обычную методическую ошибку, которая препятствует в рамках оценённой погрешности подтвердить справедливость закона Гей-Люссака. Дополнительные уточнения и оценки влияния различных физических факторов, которые полезно разобрать в профильных физматклассах, даны в личном кабинете подписчика.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: газовые законы, закон Гей-Люссака, 10 класс, фронтальная лабораторная работа, мини-установки.

Е.Н. БАБИНЦЕВА elenampt@yandex.ru,
МАОУ Гимназия г.Троицка, г. Москва

При изучении курса по УМК Г.Я. Мякишева в 10-м классе проводят фронтальную работу по проверке закона Гей-Люссака [1]. Из года в год закон часто не подтверждается (в рамках оценённой погрешности), что может говорить о наличии методической ошибки. В ходе эксперимента предлагается взять стеклянную трубку, закрытую с одного конца, опустить её в горячую воду известной температуры (открытый конец трубки должен находиться над водой), запечатать верхний конец пластилином, и, перевернув трубку, погрузить её частично в сосуд с холодной водой известной температуры. При этом нужно под водой освободить открытый конец трубки от пластилина и наблюдать, как по мере остывания воздуха, вода всасывается в трубку.



Рекомендуется держать трубку так, чтобы поверхности воды в трубке и сосуде совпадали, – тогда давление газа в трубке равно атмосферному. Отношение длин воздушного столба, находящегося в трубке при разных температурах, равно отношению объёмов и, по закону Гей-Люссака должно, с точностью погрешности эксперимента, быть равным отношению абсолютных температур: $\frac{l_1}{l_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$.

Проблемы возникают при прогревании трубки. Насколько далеко от поверхности воды должен располагаться открытый конец трубки? Если он слишком близок к поверхности, то в трубке окажется воздух с насыщенным паром. А если вспомнить, что