

Задания с решениями второго тура отборочного этапа Олимпиады «Ломоносов» по инженерным наукам 10-11 классы

Задача 1 (10 баллов).

Руда доставляется к доменной печи со склада в вагонетках. Чтобы снизить потери времени на простой вагонеток во время погрузки, предлагается засыпать руду в вагонетки на ходу. Считая, что скорость движения вагонеток при загрузке постоянна и равна v , найти дополнительную (по сравнению с перемещением пустых вагонеток) работу A , совершаемую двигателем электровоза, тянущего состав с вагонетками, к моменту времени, когда масса засыпанной руды есть m .

Решение:

Пусть засыпание руды массой m заняло время t . За это время импульс руды увеличился на величину $\Delta P = mv$. Это означает, что дополнительная сила, действующая на состав вагонеток для поддержания неизменной скорости v , равна $F = \Delta P/t = mv/t$. Следовательно, дополнительная мощность двигателя электровоза была равна $N = Fv = mv^2/t$, а совершенная работа $A = Nt = mv^2$. Эта величина в два раза превосходит изменение кинетической энергии руды; излишек работы пошел на увеличение внутренней энергии системы «руда + вагонетки» (т.е. на их нагрев).

Ответ: $A = mv^2$.

Задача 2 (11 баллов).

При аварийном завершении работы химического реактора выделилось большое количество неизвестного газа. Может ли этот газ быть пожароопасным, если известно, что для нагревания 200 г этого газа на 10 К при постоянном объеме требуется 1304 Дж, а при постоянном давлении -- 1824 Дж?

Решение:

Поскольку разность молярных теплоемкостей при постоянном давлении C_p и постоянном объеме C_v равна $C_p - C_v = R$, где $R = 8.314$ Дж/(моль К) --- универсальная газовая постоянная, в указанной массе газа $m = 200$ г содержится $\nu = (Q_p - Q_v)/(R\Delta T) \approx 6.2545$ моля. Поэтому молярная масса газа есть $\mu = m/\nu \approx 31.98$ г/моль. Газ с такой молекулярной массой может быть кислородом, а атмосфера чистого кислорода является очень огнеопасной.

Ответ: Да, может.

Задача 3 (11 баллов).

Нужно сконструировать установку, источником напряжения в которой является цепочка из 50 одинаковых последовательно соединенных конденсаторов. Установка должна работать в жестких условиях, в которых возможно вытекание диэлектрика из конденсатора. Первоначально цепочка конденсаторов заряжена до суммарного напряжения $U = 100$ В. В каждом из конденсаторов диэлектриком является жидкость с диэлектрической проницаемостью ϵ . Жидкости с каким максимальным значением ϵ можно использовать в этих конденсаторах, если требуется, чтобы даже при одновременном вытекании диэлектрика из двух конденсаторов сразу изменение напряжения на цепочке не превышало 20 В?

Решение:

Ясно, что до вытекания жидкости напряжение на каждом из конденсаторов равно $V = U/50 = 2$ В. Поскольку емкость конденсатора пропорциональна ϵ , а заряд на конденсаторах при вытекании

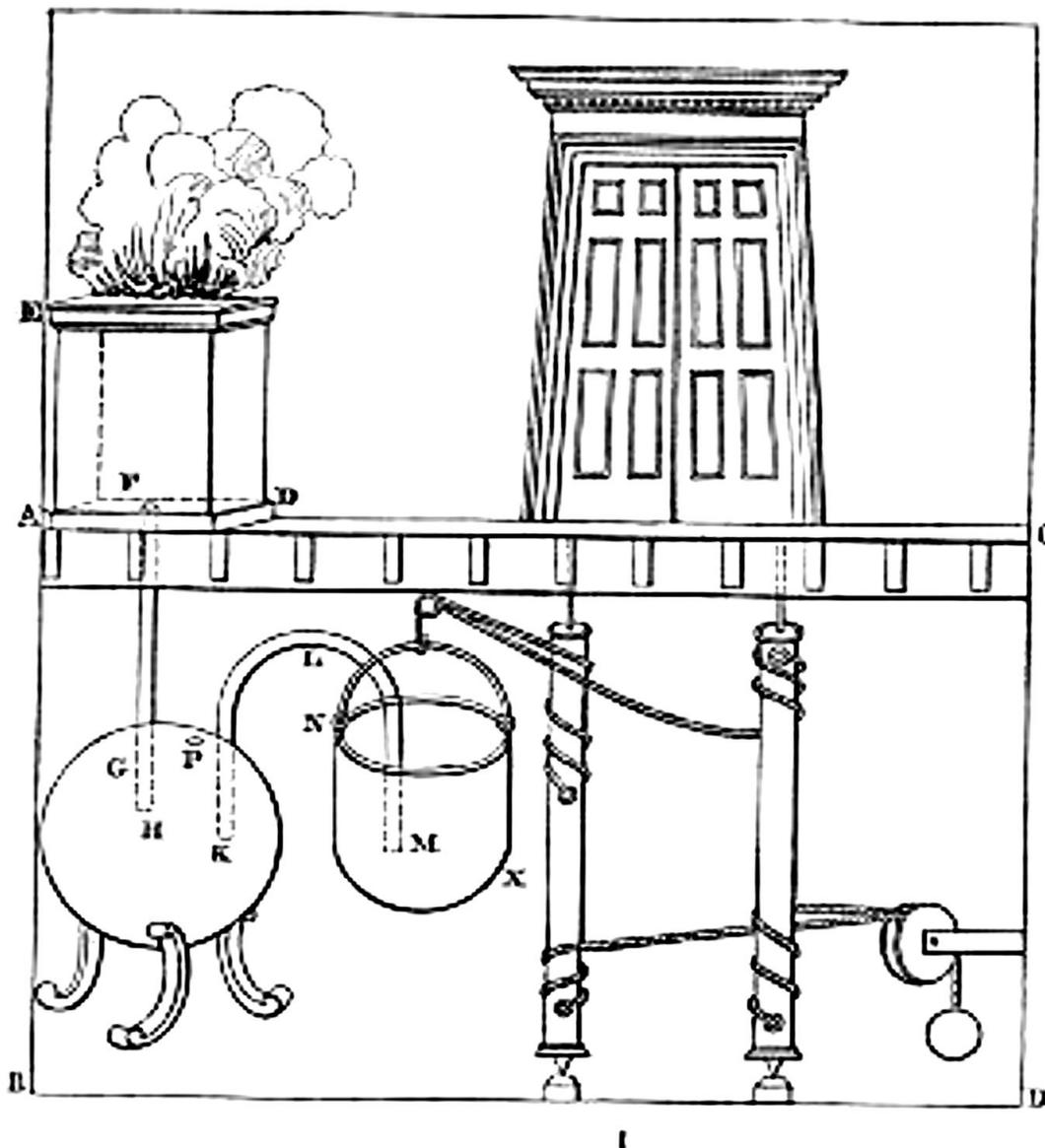
диэлектрика не меняется, после вытекания жидкости напряжение на конденсаторе становится равным ϵV , т.е. повышается на $(\epsilon-1)V$. Следовательно, если жидкость вытечет из двух конденсаторов одновременно, напряжение на всей цепочке увеличится на $\Delta U = 2(\epsilon-1)V$, откуда $\epsilon_{\text{макс}} = \Delta U / (2V) + 1 = 6$.

Ответ: 6.

Задача 4 (15 баллов).

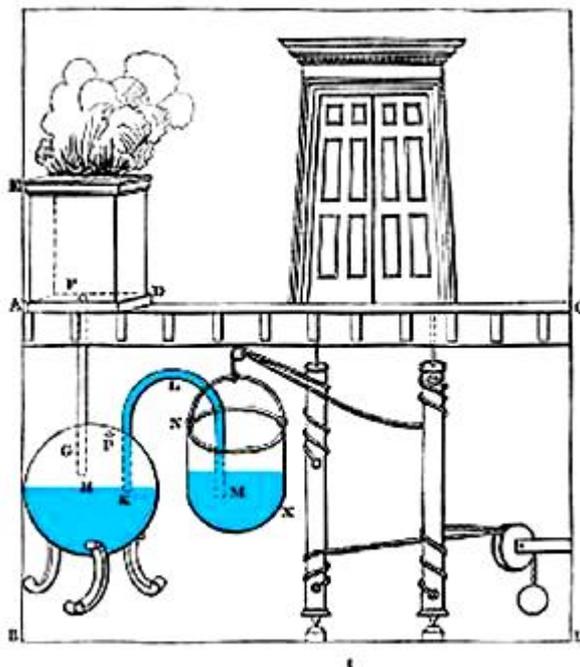
Древнегреческий механик Герон известен изобретением множества механизмов, опередивших свое время. В его книге «Πνευματικά» (Пневматика) описано устройство, названное «Деталь №37». Это механизм автоматических дверей, которые открываются, если на алтаре разжечь пламя. Оцените, какие по массе двери может открывать и закрывать такое устройство. Предложите свои идеи, как можно увеличить эффективность Детали №37, меняя ее конструкцию. Например, чтобы, сжигая одно и то же количество дров, удавалось открыть двери большей массы.

Значения всех необходимых для оценки величин выберите сами, исходя из своих знаний, опыта и здравого смысла. Можно пользоваться справочниками и данными сети Интернет.



Решение:

Для начала обсудим общие принципы, на которых функционирует представленный механизм. Описание этого устройства можно без особого труда найти в сети Интернет.



Для того, чтобы ворота открывались, необходимо, чтобы сосуды были частично заполнены водой, что отмечено синим цветом на рисунке.

Вначале, когда костер еще не разожжен, двери закрыты, поскольку вес подвижного сосуда с водой компенсируется противовесом (справа внизу на рисунке).

Постамент алтаря внутри полый, поэтому, после того как разгорелось пламя, воздух внутри разогревается. С ростом температуры давление воздуха также начинает расти. Шар и «ведро» представляют собой сообщающиеся сосуды, поэтому рост давления газа над шаром приводит к перетеканию воды в правый сосуд. Это приводит к нарушению баланса моментов сил, и, когда момент веса подвижного «ведра» с водой оказывается больше суммы моментов силы тяжести противовеса и силы трения, двери приходят в движение.

А теперь опишем модель, которую мы выбрали для решения задачи, т.е. для оценки значения массы дверей, которые можно будет открыть.

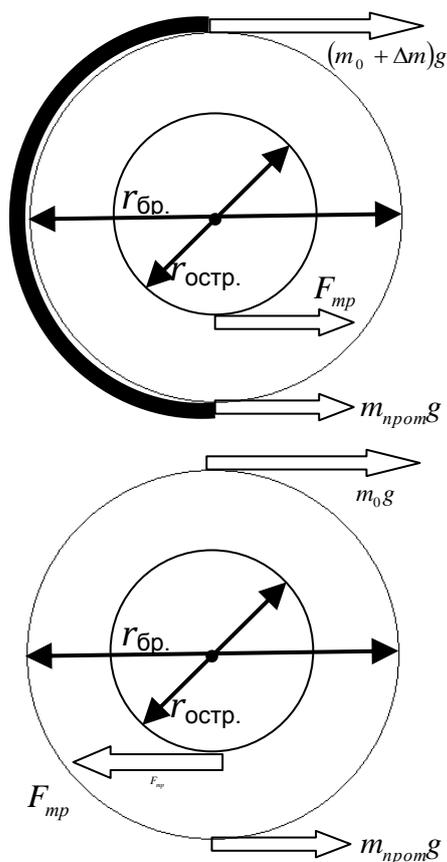
1. Канаты будем считать невесомыми и нерастяжимыми.
2. Воздух будем считать идеальным газом, т.е. его состояние подчиняется уравнению Менделеева - Клапейрона $pV = \nu RT$.
3. Массой «ведра» пренебрегаем по сравнению с массой заполняющей его воды.
4. Считаем, что закрытый сосуд и сообщающееся с атмосферой «ведро» представляют собой цилиндры с одной и той же площадью основания S .
5. Учитываем только силу трения, которая возникает между нижней заостренной частью бревна и основаниями, на которых стоят бревна; остальными силами сопротивления пренебрегаем.

Итак, начнем непосредственно решение.

Пусть Δm - критическая масса перетекшей жидкости, которая приводит к открыванию:

$(m_0 + \Delta m)gr_{\text{оп}} = 2M_{\text{тр}} + M_{\text{прот}}$, где m_0 - масса жидкости, которая была в правом сосуде до того, как разожгли пламя, $r_{\text{оп}}$ - радиус бревна, на котором закреплена дверь, $M_{\text{тр}}$ - момент сил трения

между бревном и опорой, $M_{\text{прот}}$ - момент силы тяжести противовеса. Модуль момента сил трения $M_{\text{тр}}$ можно оценить как произведение модуля силы трения $F_{\text{тр}}$ на радиус нижнего острия бревна $r_{\text{остр}}$.



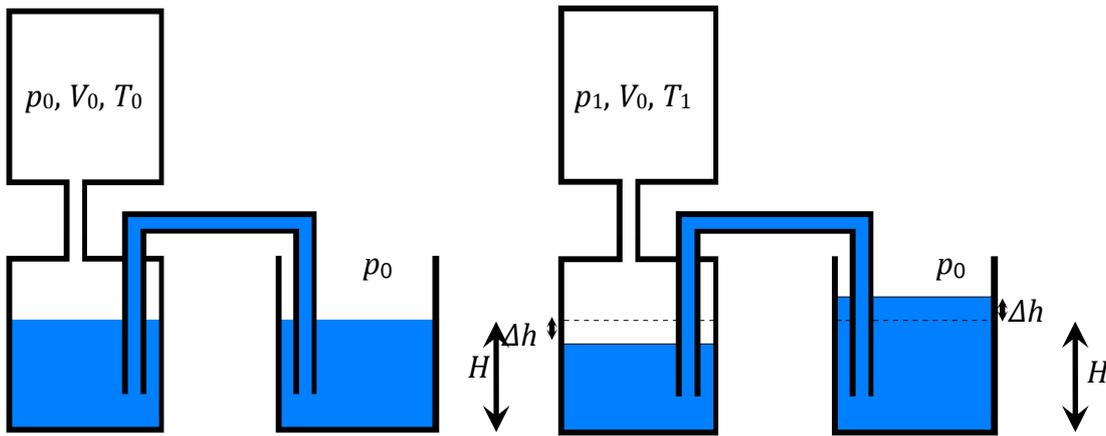
При обратном перетекании жидкости, когда двери закрываются после того, как пламя погасло и воздух остыл, противовес должен быть в состоянии преодолеть $2M_{\text{тр}}$ и $m_0 g r_{\text{бр}}$

$$M_{\text{прот}} = 2M_{\text{тр}} + m_0 g r_{\text{бр}} \Rightarrow \Delta m g r_{\text{бр}} = 4M_{\text{тр}}$$

В любой момент времени до начала открывания (второй сосуд еще не начал опускаться) $\Delta m = \rho S \Delta h$ (см. рисунок).

Пренебрежем изменением объема газа при нагреве (т.е. будем считать $S \Delta h$ много меньше чем V_0).

Тогда состояние газа описывается соотношением $\frac{p_0}{T_0} = \frac{p_1}{T_1}$, где p_0, T_0, p_1, T_1 - давление и температура газа соответственно до и после нагрева.



Из условия гидростатического равновесия:

$$p_1 + \rho g(H - \Delta h) = p_0 + \rho g(H + \Delta h)$$

$$p_1 - p_0 = 2\rho g\Delta h = \frac{2\rho gS\Delta h}{S} = \frac{2\Delta mg}{S}$$

Как мы уже определили ранее, $\Delta mg = \frac{4M_{mp}}{r_{\text{бр}}}$

$$p_1 - p_0 = \frac{8M_{mp}}{r_{\text{бр}}S}$$

$$p_0 \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) = \frac{8M_{mp}}{r_{\text{бр}}S}$$

Модуль момента сил трения можно оценить как $M_{mp} = \mu(m_{\text{бревна}} + m_{\text{двери}})gr_{\text{остр}}$

$$p_0 \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) = \frac{8\mu(m_{\text{бревна}} + m_{\text{двери}})gr_{\text{остр}}}{r_{\text{бр}}S}$$

Отсюда

$$m_{\text{двери}} = \frac{p_0 r_{\text{бр}} S \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right)}{8\mu gr_{\text{остр}}} - m_{\text{бревна}}$$

Теперь подставим численные значения. Для начальной температуры воздуха возьмем $T_0 = 300$ К, а температуру разогретого пламенем воздуха в полости постаменты примем равной $T_1 = 450$ К; температура горящих дров может достигать $800-1000^\circ\text{C}$ (см., например, <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BC%D1%8F>), но с учетом того, что большая часть тепла от пламени будет уходит вверх, а нам необходимо прогреть объем, расположенный под очагом горения, оценка в 450 К кажется нам более реалистической. Для оценки примем, что давление газа до разжигания пламени $p_0 = 10^5$ Па, радиус бревна в той части, где намотан канат, $r_{\text{бр}} = 20$ см = 0.2 м, а в той части, которой оно упирается в основание, $r_{\text{остр}} = 10$ см = 0.1 м, площадь сечения сосудов $S = \pi r^2 = \pi(0.3)^2 \approx 0.28\text{ м}^2$, коэффициент трения между двумя деревянными поверхностями $\mu = 0.6$, ускорение свободного падения $g = 10$ м/с².

Чтобы оценить массу бревна, на котором закреплена дверь, нам понадобится плотность дерева $\rho_{\text{дерева}} \approx 750\text{ кг/м}^3$ и его объем (будем считать бревно цилиндром высотой 4 м)

$$V = Sh_{\text{бревна}} = \pi r_{\text{бр}}^2 h_{\text{бревна}} \approx 0.5\text{ м}^3, \text{ тогда } m_{\text{бревна}} \approx 375\text{ кг}.$$

Подставив все эти значения, получим, что $m_{двери} \approx 210 \text{ кг}$. Соответственно, две створки дверей весят примерно 420 кг.

Возможные улучшения:

1) можно переделать конструкцию так, чтобы объем воздуха располагался над пламенем, а не под ним; это позволит большей части тепла идти на нагрев воздуха;

2) можно увеличить площадь сечения подвижного сосуда по сравнению с неподвижным; тогда для того, чтобы получить нужную высоту столба жидкости, будет переливаться большее количество воды, что в итоге при прочих равных условиях позволит открывать двери большей массы.

Задача 5 (11 баллов).

«Цветная химия»

Юный химик-технолог Анатолий решил наглядно продемонстрировать своему другу Федору «цветную химию». Для этого он взял 20 мл 50%-ного раствора мунирита и добавил в него пару капель 20%-ного раствора купоросного масла. Пока он проверял готовность реагентов, Федор решил сам поэкспериментировать и насыпал в полученный Анатолием раствор немного порошка из стоящего поблизости бюкса. Раствор стал синим (1). Попытавшись исправить положение, он, отлив про запас немного синего раствора в другую колбу, добавил еще растворенного в воде купоросного масла и порошка из бюкса, но раствор стал зеленым (2). Вернувшийся Анатолий добавил к сохраненному Федором синему раствору немного едкого натра и показал своему другу выпавший грязно-зеленый осадок (3). Отложив осадок на просушку, друзья решили продолжить опыты и разлили зеленый раствор по двум колбам. К первой части они добавили порошок из бюкса, в результате чего раствор стал фиолетовым (4). Ко второй части добавили едкий натр, результатом чего стало выпадение зеленого осадка (5). Добавив едкий натр к запасенному фиолетовому раствору, друзья получили коричневый осадок (6).

1. Напишите формулы всех описанных и полученных веществ и их цвет. (4 балла)
2. Напишите уравнения проведенных реакций. (3 балла)
3. Предложите способ использования написанных вами реакций в какой-либо области человеческой деятельности. (4 балла)

Решение:

Мунирит – NaVO_3 (метаванадат натрия, прозрачный практически бесцветный раствор).

Купоросное масло – концентрированная H_2SO_4 (серная кислота, вязкая прозрачная жидкость с коричневатым оттенком).

Едкий натр – NaOH (гидроксид натрия, натриевая щелочь, в сухом виде белые непрозрачные кристаллы).

В бюксе хранился порошок цинка (серый порошок с тусклым металлическим блеском).

Синий цвет раствору (1) придает VO^{2+} (ванадил-ион).

Зеленый цвет раствору (2) придает V^{3+} .

Грязно-зеленый осадок в реакции (3) – $\text{VO}(\text{OH})_2$ (гидроксид ванадила).

Фиолетовый цвет раствору (4) придает V^{2+} .

Зеленый осадок в реакции (5) – $\text{V}(\text{OH})_3$ (гидроксид ванадия (III)).

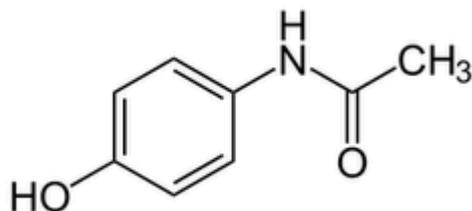
Коричневый осадок в реакции (6) – $\text{V}(\text{OH})_2$ (гидроксид ванадия (II)).

1. $2\text{NaVO}_3 + 4\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Zn} = 2\text{VOSO}_4$ (синий) + $\text{ZnSO}_4 + 4\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SO}_4$
2. $2\text{VOSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Zn} = \text{V}_2(\text{SO}_4)_3$ (зеленый) + $\text{ZnSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
3. $\text{VOSO}_4 + 2\text{NaOH} = \text{VO}(\text{OH})_2 \downarrow$ (грязно-зеленый) + Na_2SO_4
4. $\text{V}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Zn} = 2\text{VSO}_4$ (фиолетовый) + ZnSO_4
5. $\text{V}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{NaOH} = 2\text{V}(\text{OH})_3 \downarrow$ (зеленый) + $3\text{Na}_2\text{SO}_4$
6. $\text{VSO}_4 + \text{NaOH} = \text{V}(\text{OH})_2 \downarrow$ (коричневый) + Na_2SO_4 .

Вопрос о способах использования данных реакций является творческим, поэтому единственно правильного ответа здесь нет. Одной из множества областей, в которых возможно использование данных реакций, является аналитическая химия - раздел химии, занимающийся вопросами изучения химического состава и структуры веществ. Например, можно использовать реакции 3,5, 6 для определения присутствия щелочи в анализируемом растворе.

Задача 6 (13 баллов).

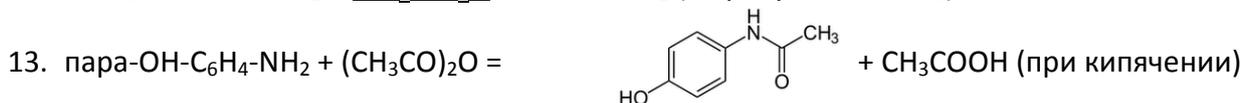
Парацетамол - широко известное лекарственное средство, [анальгетик](#) и [антипиретик](#) из группы [анилидов](#), которое можно найти в любой аптеке под тем или иным торговым названием.



1. Предложите последовательность химических реакций, позволяющих синтезировать данное средство из простых веществ, и укажите условия их проведения. Уравняйте реакции. **(8 баллов)**
2. Проанализируйте написанную Вами последовательность реакций. Как Вы думаете, имеет ли смысл использовать предложенный Вами способ для промышленного синтеза парацетамола и почему? **(5 баллов)**

Решение:

1. $C + 2H_2 = CH_4$ (при повышенном давлении, 400-500 °С и наличии Pt/Ni-катализатора или в пламени электрической дуги при 1200 °С)
2. $2CH_4 = C_2H_2 + 2H_2$ (пиролиз при 1500 °С)
3. $3C_2H_2 = C_6H_6$ (при 600 °С и наличии активированного угля в качестве катализатора)
4. $C_6H_6 + Cl_2 = C_6H_5Cl + HCl$ (при 80-85 °С в присутствии $FeCl_3$)
5. $C_6H_5Cl + HNO_3 = \text{пара-NO}_2\text{-C}_6\text{H}_4\text{-Cl} + H_2O$ (в нитрующей смеси при 40-70 °С)
6. $\text{пара-NO}_2\text{-C}_6\text{H}_4\text{-Cl} + NaOH = \text{пара-NO}_2\text{-C}_6\text{H}_4\text{-ONa} + HCl$ (при 170 °С и 0,8 МПа)
7. $\text{пара-NO}_2\text{-C}_6\text{H}_4\text{-ONa} + 3H_2 = \text{пара-NH}_2\text{-C}_6\text{H}_4\text{-ONa} + 2H_2O$ (в присутствии Fe и HCl)
8. $\text{пара-ONa-C}_6\text{H}_4\text{-NH}_2 + H_2O = \text{пара-OH-C}_6\text{H}_4\text{-NH}_2 + NaOH$ (в кислой среде)
9. $C + 0.5 O_2 = CO$ (сжигание в недостатке кислорода)
10. $CO + 2H_2 = CH_3OH$ (при 250 °С и 7 МПа в присутствии CrO и ZnO)
11. $CH_3OH + CO = CH_3COOH$ (при 250 °С и 20-70 МПа в присутствии CoI_2)
12. $2 CH_3COOH + COCl_2 = (CH_3CO)_2O + 2 HCl + CO_2$ (в присутствии $AlCl_3$)



В настоящий момент использовать разработанный способ в промышленности смысла не имеет, так как еще в 1877 году был известен способ получения парацетамола восстановлением р-нитрофенола оловом в ледяной уксусной кислоте. Такой способ гораздо проще с технической точки зрения, эффективнее и дешевле синтеза из простых веществ, так как не требует использования специфических катализаторов и реагентов, высоких давлений и температур.

Задача 7 (13 баллов).

Углепластик (называемый также карбоном или карбонопластиком) широко применяется в автомобилестроении и производстве спорттоваров. Он представляет собой материал, который состоит из основы в виде углеродных волокон и синтетической смолы, выполняющей роль

связующего. Одним из наиболее распространенных методов производства углепластика является наложение друг на друга слоев, каждый из которых состоит из выстроенных параллельно друг другу углеродных волокон. Слои кладутся таким образом, чтобы нити из близлежащих слоев не были параллельны друг другу. Далее полученная структура пропитывается синтетической смолой, которая затем полимеризуется, фиксируя нити и склеивая слои.

1. Рассчитайте приблизительно, какой процент материала (по объему) составляют углеродные волокна при следующих условиях производства:

используются волокна цилиндрической формы, диаметр волокна составляет 10 мкм;

углеродные нити кладутся строго друг на друга и не прерываются;

площадь одной ячейки, образуемой волокнами, составляет 25 мкм². **(9 баллов)**

2. Какие отсутствующие данные о структуре производимого материала могли бы повысить точность расчетов в предыдущем пункте? **(4 балла)**

Решение:

1. Рассмотрим два соседних слоя. Пусть расстояние между волокнами в первом слое равно x мкм, во втором – y мкм, угол между волокнами из разных слоёв равен α , $d = 10$ мкм – диаметр волокна. Тогда площадь ячейки равна $xy/\sin\alpha = 25$ мкм². В достаточно большом участке (с линейными размерами намного больше x и d) первого слоя объём волокон составляет $(\pi d^2/4)/d(x+d) = \pi d/4(x+d)$ от объёма слоя (делим объём волокна на объём окрестности волокна шириной $x/2$). Аналогично объём волокон второго слоя составляет $\pi d/4(y+d)$ от объёма слоя. Объём волокон двух слоёв составляет $(\pi d/4(x+d) + \pi d/4(y+d))/2 = (1/(x+d) + 1/(y+d))\pi d/8$ от объёма двух слоёв. С уменьшением x и y это значение увеличивается, поэтому максимальный удельный объём волокон равен $\pi/4$ и достигается при очень малых x и y , при этом $\sin\alpha = xy/25$, то есть волокна соседних слоёв почти параллельны друг другу.

С увеличением x и y удельный объём волокон уменьшается, поэтому наименьший удельный объём достигается при $xy = 25$ мкм² (так как $\sin\alpha \leq 1$). Нетрудно понять, что он достигается при $x=y=5$ мкм и равен $\pi d/4(5+d) = \pi/6$, при этом волокна соседних слоёв перпендикулярны друг другу.

Уменьшая x и y от 5 мкм до малых значений, можно получить любой удельный объём волокон от $\pi/6$ до $\pi/4$, при этом угол между волокнами соседних слоёв будет уменьшаться с уменьшением расстояния между волокнами в каждом слое.

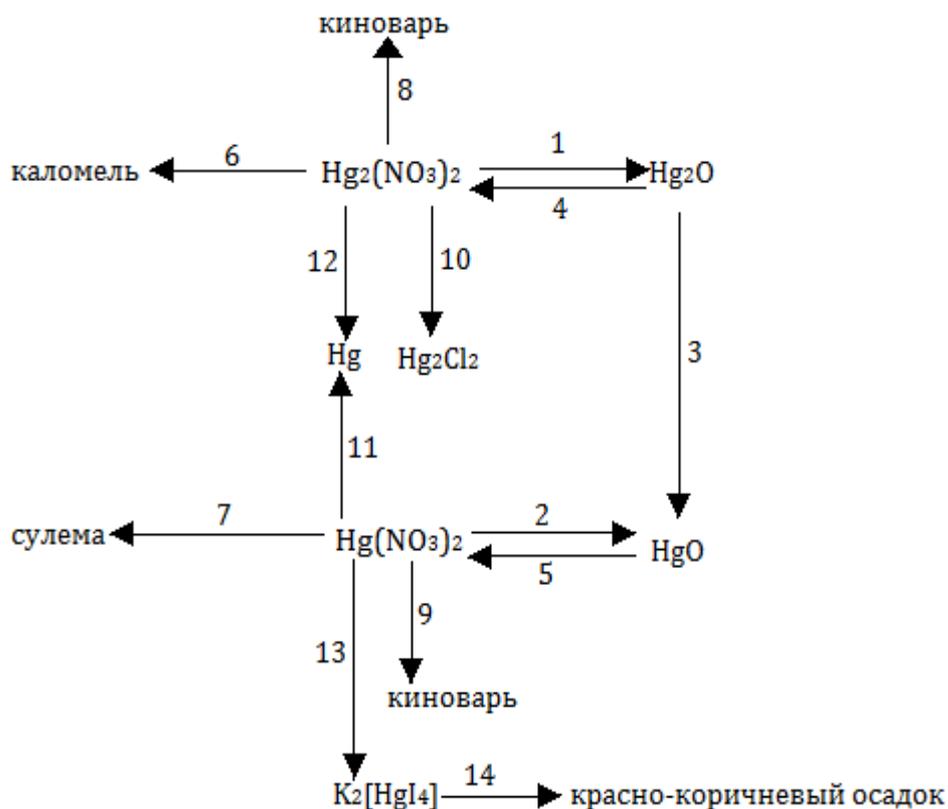
2. Из решения пункта 1 легко понять, какими данными можно уточнить расчёты. К примеру, удельный объём волокон в углепластике определяется точно, если считать расстояние между волокнами одинаковым для всех слоёв, а также зафиксировать угол между волокнами соседних слоёв.

Задача 8 (10 баллов).

Ртуть и ее соединения нашли чрезвычайно широкое применение в таких областях как техника, металлургия, сельское хозяйство, химическая промышленность и медицина.

1. Приведите не менее пяти примеров применения ртути и/или ее соединений в данных областях. **(3 балла)**

2. Напишите все уравнения химических реакций, соответствующих превращениям ртути, изображенным на схеме ниже. **(7 баллов)**



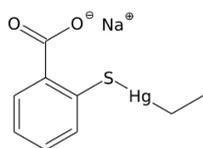
Решение:

Hg (в виде жидкости) – до сих пор используется в измерительных приборах (ртутных барометрах, термометрах и манометрах);

Hg (в виде паров) – используется как проводящая среда в газоразрядных лампах бытовых (излучающих в основном видимый свет - эти лампы называют также лампами дневного света) и медицинских (излучающих в основном ультрафиолет - эти лампы называют кварцевыми);

HgS (киноварь) – используется как фунгицид в строительстве и сельском хозяйстве;

$K_2[HgI_4]$ (тетраиодомеркурат (II) калия) – используется для приготовления реактива Несслера (водного раствора $K_2[HgI_4]$ и щелочи), который применяется для обнаружения присутствия аммонийных ионов в воде, в частности, для оценки ее пригодности для питья;



(тиомерсал) – используется в медицине как антисептик и как фунгицидное средство.

- $Hg_2(NO_3)_2 + 2NaOH = Hg_2O \downarrow + 2NaNO_3 + H_2O$
- $Hg(NO_3)_2 + 2NaOH = HgO \downarrow + 2NaNO_3 + H_2O$
- $Hg_2O = HgO + Hg$ (в щелочной среде)
- $Hg_2O + 2HNO_3 = Hg_2(NO_3)_2 + H_2O$
- $HgO + 2HNO_3_{\text{разбавл.}} = Hg(NO_3)_2 + H_2O$
- $Hg_2(NO_3)_2 + 2NaCl = Hg_2Cl_2 \downarrow + 2NaNO_3$

7. $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{NaCl} = \text{HgCl}_2\downarrow + 2\text{NaNO}_3$
8. $\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2 + \text{Na}_2\text{S} = \text{HgS}\downarrow + \text{Hg}\downarrow + 2\text{NaNO}_3$
9. $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 + \text{Na}_2\text{S} = \text{HgS}\downarrow + 2\text{NaNO}_3$
10. $\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2 + 2\text{HCl} = \text{Hg}_2\text{Cl}_2\downarrow + 2\text{HNO}_3$ (при пониженной температуре)
11. $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 + \text{SnCl}_2 + 2\text{HCl} = \text{Hg}\downarrow + \text{SnCl}_4 + 2\text{HNO}_3$
12. $\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2 + 2\text{KOH} = \text{HgO}\downarrow + \text{Hg}\downarrow + 2\text{KNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
13. $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 + 4\text{KI} = \text{K}_2[\text{HgI}_4]\downarrow + 2\text{KNO}_3$ (в избытке раствора йодида калия)
14. $2\text{K}_2[\text{HgI}_4] + 3\text{KOH} + \text{NH}_3 = [\text{Hg}_2\text{N}]\text{I}\cdot\text{H}_2\text{O}\downarrow + 7\text{KI} + 2\text{H}_2\text{O}$