

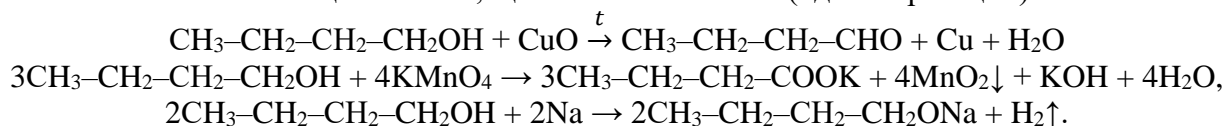
## II. Решение заданий заключительного тура олимпиады «Ломоносов» 10-11 классы

### 1. 8 баллов.

Неизвестное кислородсодержащее органическое соединение состоит из атомов углерода, водорода и кислорода, его формула  $C_xH_yO_z$ . Очевидно, что число атомов водорода равно разности чисел электронов и нейтронов:

$$y = 42 - 32 = 10.$$

Если соединение содержит 10 атомов водорода, то на атомы углерода и кислорода остаётся 32 электрона, и единственное решение  $x = 4$ ,  $z = 1$ . Формула изомеров  $C_4H_{10}O$ , это бутанол  $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2OH$  и диэтиловый эфир  $CH_3-CH_2-O-CH_2-CH_3$ , различить которые можно добавлением раствора перманганата калия, нагреванием с оксидом меди, реакцией с активными металлами – щелочными, щелочноземельными (одна из реакций):

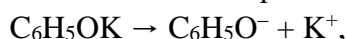


Диэтиловый эфир в эти реакции не вступает.

*Ответ:*  $C_4H_{10}O$ , бутанол и диэтиловый эфир.

### 2. 16 баллов.

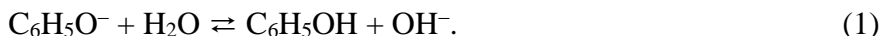
В растворе фенолят калия полностью диссоциирован:



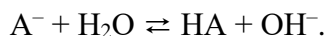
поэтому начальная (до гидролиза) концентрация аниона совпадает с искомой концентрацией соли (обозначим ее за  $x$ ):

$$c(C_6H_5O^-) = c(C_6H_5OK) = x.$$

Соль образована очень слабой кислотой (фенолом) и сильным основанием, поэтому идет ее обратимый гидролиз по аниону и среда раствора становится щелочной:



Обозначим фенол  $HA$ , а фенолят-анион  $A^-$ , тогда уравнение (1) примет вид



Константа равновесия этого обратимого процесса (константа гидролиза) имеет вид

$$K = [HA][OH^-] / [A^-].$$

С другой стороны, известно выражение для константы диссоциации кислоты:

$$K_{\text{дис}} = [H^+][A^-] / [HA].$$

Из ионного произведения воды  $K_w = [H^+][OH^-] = 10^{-14}$  получим  $[OH^-] = 10^{-14} / [H^+]$ .

Тогда:

$$K = [HA] \cdot 10^{-14} / ([A^-] \cdot [H^+]) = 10^{-14} / K_{\text{дис}} = 10^{-14} / 10^{-10} = 10^{-4}.$$

По условию  $pH = 11$ , значит,  $[H^+] = 10^{-11}$ ;  $[OH^-] = 10^{-14} / 10^{-11} = 10^{-3}$  (моль/л).

Из уравнения (1):

$$[HA] = [OH^-] = 10^{-3} \text{ (моль/л)},$$

а равновесная концентрация фенолят-аниона равна

$$[A^-] = x - [OH^-] = x - 10^{-3}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} K &= (10^{-3})^2 / (x - 10^{-3}) = 10^{-4}; \\ x &= 10^{-6} / 10^{-4} + 10^{-3} = 1.1 \cdot 10^{-2} = 0.011 \text{ (моль/л)}. \end{aligned}$$

Можно решить эту задачу, не используя константу гидролиза. Как видно из уравнения (1), концентрация образующегося фенола равна концентрации гидроксид-ионов:

$$[HA] = [OH^-]$$

Нам известно значение константы кислотной диссоциации фенола:

$$K_{\text{дис}} = [A^-][H^+] / [HA]$$

Чтобы ответить на вопрос задачи, нужно найти общую концентрацию фенолята, являющуюся суммой равновесной концентрации фенолята и продукта его гидролиза – фенола:

$$x = [A^-] + [HA].$$

Подставим в это выражение  $[A^-]$  из константы равновесия и  $[HA]$  из выражения  $[HA] = [OH^-]$ . Учтем, что  $[H^+][OH^-] = K_w = 1 \cdot 10^{-14}$ , а  $[H^+] = 1 \cdot 10^{-11}$  при pH 11:

$$x = [A^-] + [HA] = K_{\text{дис}}[HA] / [H^+] + [OH^-] = K_{\text{дис}}[OH^-] / [H^+] + [OH^-] = \\ = K_{\text{дис}} K_w / [H^+]^2 + K_w / [H^+] = 10^{-10} \cdot 10^{-14} / 10^{-22} + 10^{-14} / 10^{-11} = 10^{-2} + 10^{-3} = 0.011 \text{ (моль/л)}.$$

Ответ: 0.011 моль/л.

### 3. 16 баллов

Определим мольные доли компонентов в равновесной смеси:

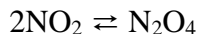
$$x(A) = 1 / (1 + 1.86) = 0.35,$$

$$x(B) = 0.65.$$

Средняя молярная масса смеси выражается как

$$M_{\text{ср}} = 0.35 \cdot M(A) + 0.65 \cdot M(B) = 0.35 \cdot M(A) + 0.65 \cdot 2M(A) = 75.9 \text{ (г/моль)}.$$

Отсюда находим  $M(A) = 46$  г/моль. Подходящие по молярной массе вещества –  $\text{NO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{HCOOH}$ . Однако газообразным при  $30^\circ\text{C}$  веществом, способным димеризоваться, является именно  $\text{NO}_2$ :



Найдем количества вещества компонентов равновесной смеси:

$$v = \frac{pV}{RT} = 101.3 \cdot 1.0 / (8.314 \cdot 303) = 0.04 \text{ моль},$$

$$v(\text{NO}_2) = 0.04 \cdot 0.35 = 0.014 \text{ моль},$$

$$v(\text{N}_2\text{O}_4) = 0.04 \cdot 0.65 = 0.026 \text{ моль}.$$

Молярные концентрации веществ:

$$c(\text{NO}_2) = 0.014 / 1.0 = 0.014 \text{ моль/л},$$

$$c(\text{N}_2\text{O}_4) = 0.026 / 1.0 = 0.026 \text{ моль/л}.$$

В состоянии равновесия скорости прямой и обратной реакций одинаковы:

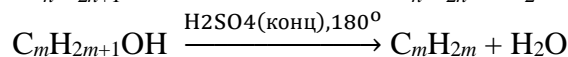
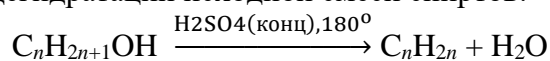
$$k_1 \cdot c(\text{NO}_2)^2 = k_2 \cdot c(\text{N}_2\text{O}_4),$$

$$k_2 = 0.005 \cdot 0.014^2 / 0.026 = 3.77 \cdot 10^{-5} \text{ мин}^{-1}.$$

Ответ: **A** –  $\text{NO}_2$ , **B** –  $\text{N}_2\text{O}_4$ ;  $k_2 = 3.77 \cdot 10^{-5} \text{ мин}^{-1}$ .

### 4. 20 баллов

Уравнения реакций дегидратации исходной смеси спиртов:



Суммарное количество вещества образовавшихся алкенов  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$  и  $\text{C}_m\text{H}_{2m}$  равно

$$v(\text{смеси}) = 11.15 \cdot 101.3 / (8.314 \cdot 453) = 0.3 \text{ моль},$$

следовательно, и спиртов суммарно тоже было 0.3 моль. Пусть первого спирта было  $x$  моль, а второго –  $y$  моль, тогда:

$$\begin{cases} x + y = 0.3 \\ x(14n + 18) + y(14m + 18) = 15.9 \end{cases}$$

Полученная система двух уравнений содержит четыре неизвестных. Найдем среднюю молярную массу смеси спиртов:

$$M(\text{спиртов}) = m / v = 15.9 / 0.3 = 53 \text{ г/моль}.$$

Один из спиртов должен иметь молярную массу меньше, а второй – больше 53 г/моль. Молярную массу менее 53 г/моль могут иметь метанол и этанол, но метанол не подвергается внутримолекулярной дегидратации, значит, один из спиртов – этанол ( $n = 2$ ). Выразим из первого уравнения  $x$  и подставим во второе уравнение. Тогда второе уравнение приобретает вид

$$46(0.3 - y) + y(14m + 18) = 15.9,$$

откуда, выражая  $y$  через  $m$ , получаем:

$$y = 2.1 / (14m - 28).$$

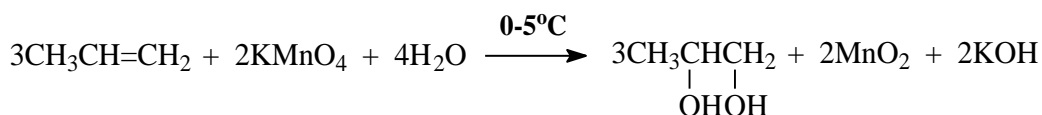
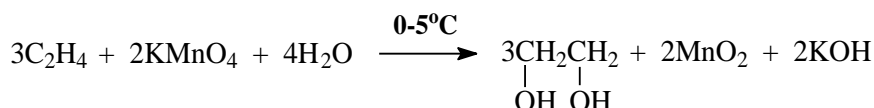
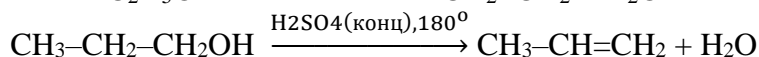
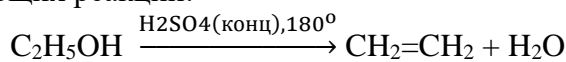
Минимальное значение, которое может принять  $m$ , равно 3, откуда  $y = 0.15$ . Также возможны и другие решения (например, при  $m = 4$ ,  $y = 0.075$  и т.д.). Итак, возможное решение – эквимолярная (по 0.15 моль) смесь этанола и пропанола-1.

Массовые доли спиртов в данной смеси:

$$\omega(\text{этанола}) = 43.4\%,$$

$$\omega(\text{пропанола-1}) = 56.6\%.$$

Уравнения протекающих реакций:



Полученная смесь алкенов (0.3 моль) обесцвечивает перманганат калия в водном растворе в количестве

$$v(\text{KMnO}_4) = 0.3 \cdot 2 / 3 = 0.2 \text{ моль},$$

$$V(\text{р-ра}) = v / c = 0.2 / 0.4 = 0.5 = 500 \text{ мл}.$$

*Ответ:* 43.4% этанола и 56.6% пропанола-1; 500 мл.

## 5. 20 баллов

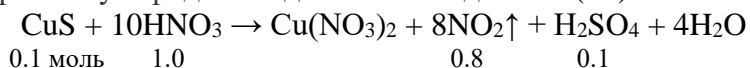
В каждом из стаканов находится сульфид меди(II) в количестве

$$v(\text{CuS}) = 9.6 / 96 = 0.1 \text{ моль}.$$

В первом стакане после добавления концентрированной азотной кислоты в количестве

$$v(\text{HNO}_3) = 120 \cdot 0.63 / 63 = 1.2 \text{ моль}$$

происходит растворение сульфида и выделение оксида азота(IV):



Если реакцию записать с образованием сульфата меди, на конечном ответе это не скажется.

Поскольку кислота была взята в избытке, сульфид меди растворяется полностью. В образовавшемся после реакции растворе избыток  $\text{HNO}_3$  составляет

$$v(\text{HNO}_3(\text{изб})) = 1.2 - 1 = 0.2 \text{ моль}.$$

Масса этого раствора

$$m_1 = m(\text{CuS}) + m(\text{HNO}_3(\text{р-р})) - m(\text{NO}_2) = 9.6 + 120 - 46 \cdot 0.8 = 92.8 \text{ г}.$$

Во втором стакане после добавления концентрированной серной кислоты в количестве

$$v(\text{H}_2\text{SO}_4) = 142.7 \cdot 0.98 / 98 = 1.427 \text{ моль}$$

также происходит растворение сульфида и выделение оксида серы(IV):



Кислота была взята в избытке, сульфид меди растворяется полностью. Масса этого раствора

$$m_2 = m(\text{CuS}) + m(\text{H}_2\text{SO}_4(\text{р-р})) - m(\text{SO}_2) = 9.6 + 142.7 - 64 \cdot 0.4 = 126.7 \text{ г}.$$

Таким образом, после окончания реакций масса первого стакана становится меньше массы второго на

$$\Delta m = 126.7 - 92.8 = 33.9 \text{ г}.$$

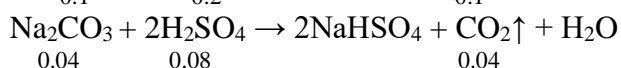
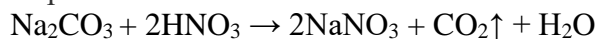
Чтобы уравновесить чаши весов, навеску  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (молярная масса 286 г/моль) следует добавить в первый стакан. В нем после растворения сульфида осталось 0.2 моль азотной кислоты и образовалось 0.1 моль серной кислоты. Если  $x$  моль кристаллогидрата прореагирует с кислотами, то выделится  $x$  моль углекислого газа, масса стакана увеличится при этом на  $286x - 44x$ .

$$286x - 44x = 242x = 33.9;$$

$$x = 0.14 \text{ (моль);}$$

$$m(\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}) = 286 \cdot 0.14 \approx 40.0 \text{ г.}$$

Реакции карбоната натрия с кислотами:



С присутствующей в растворе солью меди в кислой среде карбонат натрия не реагирует.

Ответ: 33.9 г; 40.0 г.

## 6. 20 баллов

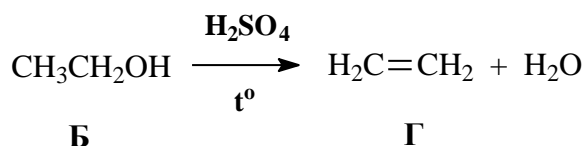
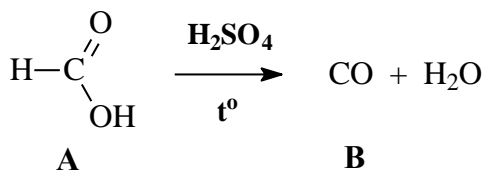
Средняя молярная масса образовавшейся смеси газов **В** и **Г** составляет

$$M_{\text{ср.}} = 0.875 \cdot 32 = 28 \text{ г/моль.}$$

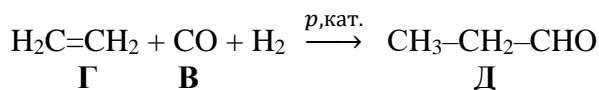
Поскольку в задаче нет упоминания об объёмном соотношении газов, то можно предположить, что молярные массы газов одинаковы:

$$M(\text{В}) = M(\text{Г}) = 28 \text{ г/моль.}$$

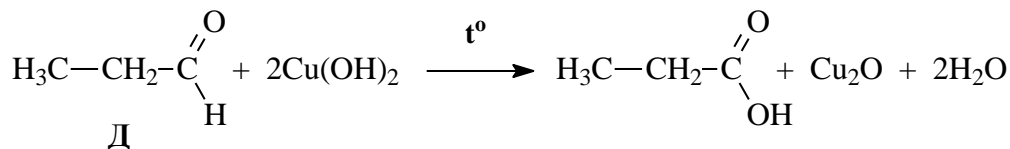
Газы с такой молярной массой – например,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$  или  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Поскольку исходные соединения являются жидкостями при комнатной температуре, и одно из них – кислота, можно предположить, что газ **В** – это  $\text{CO}$ , а газ **Г** –  $\text{C}_2\text{H}_4$ , а исходными веществами **А** и **Б** являются уксусная кислота и этанол соответственно:



Взаимодействие газов **В** и **Г** с избытком водорода в присутствии катализатора – это реакция гидроформилирования алкенов (оксосинтез):



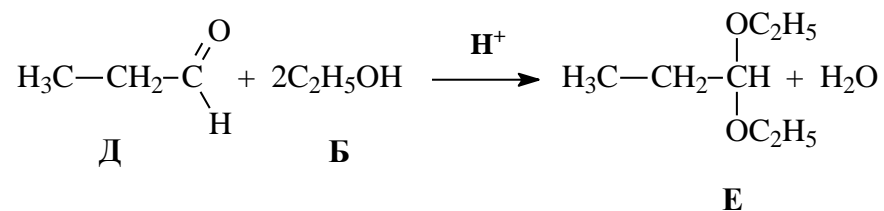
Соединение **Д** – это пропионовый альдегид, уравнение его окисления гидроксидом меди(II) с образованием осадка  $\text{Cu}_2\text{O}$ :



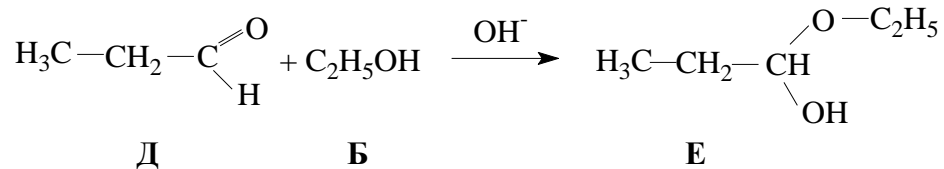
$$v(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}) = v(\text{Cu}_2\text{O}) = 21.6 / 144 = 0.15 \text{ моль,}$$

$$m(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}) = 0.15 \cdot 58 \text{ г/моль} = 8.7 \text{ г.}$$

Пропаналь **Д** реагирует с избытком этанола в кислой среде с образованием соответствующего ацеталя **Е**:



В щелочной среде образуется полуацеталь:



*Ответ:* 8.7 г; **А** – HCOOH, **Б** – C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, **В** – CO, **Г** – C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, **Д** – пропаналь C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, **Е** – ацеталь (полуацеталь).