

## Решения заданий олимпиады ИНХ-2026

### Задача 1 (автор Гаркуль И.А.):

1. Белый (альбедо) – Альбус Дамблдор (имя связано с белым цветом, лат. albus – белый).

Красный (рубедо) – Рубеус Хагрид (имя Рубеус происходит от лат. rubeus – красный).

Черный (нигредо) – Сириус Блэк (фамилия Black – черный).

2. Подсказка «элемент имеет частичную схожесть с названием дремоносных бобов (Sorophorous Bean)» намекает на фосфор (Phosphorus – светонесущий).

**A** – P (фосфор)

**B** – P<sub>4</sub> (белый фосфор)

**C** – P<sub>кр</sub> (красный фосфор)

**D** – P<sub>черн</sub> (черный фосфор)

1)  $P_4 + 5O_2 \rightarrow P_4O_{10}$  (или  $P_4 + 3O_2 \rightarrow P_4O_6$  при недостатке кислорода)

Явление, дающее свечение – **хемилюминесценция** (холодное свечение, возникающее в результате химической реакции). Не путать с флуоресценцией!

3. Подсказка о четырехэлементном соединении **F**, которое является белилами и содержит металл **E**, указывает на основной карбонат свинца(II), известный как свинцовые белила.

**E** – Pb

Состав свинцовых белил –  $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$  или  $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ .

$\omega(Pb) = (3 \cdot 207.2) / 775.6 \approx 0.8014$  или 80.14%.

**F** –  $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$  или  $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$  (обладает белой окраской)

**G** – H<sub>2</sub>S

**H** – PbS (обладает черной окраской)

**I** – Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (обладает красно-оранжевой окраской)

2)  $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2 + 3H_2S \rightarrow 3PbS + 2CO_2 + 4H_2O$

3)  $3PbS + 5O_2 \rightarrow (t^\circ) Pb_3O_4 + 3SO_2$

4)  $PbS + 4H_2O_2 \rightarrow PbSO_4 + 4H_2O$

Использование свинцовых белил было запрещено из-за высокой токсичности свинца, который вызывает тяжелые отравления. Современной и безопасной альтернативой являются титановые белила на основе диоксида титана TiO<sub>2</sub>, который также используется в солнцезащитных кремах и в качестве пищевой добавки.

4. Речь о монетах, поэтому логичнее всего предположить элемент из группы монетных металлов, однако, маловероятно, что за газету будут расплачиваться горстями серебра или золота, следовательно, монеты медные.

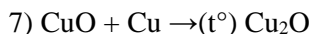
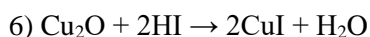
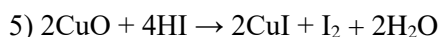
**J** – Cu

**K** – CuO (обладает черной окраской)

**L** – Ni

**M** – Cu<sub>2</sub>O (обладает красной окраской)

**N** – CuI (обладает белой окраской)



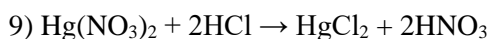
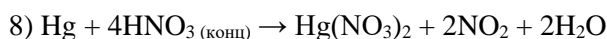
Хагрид расплавлялся медными монетами – кнатами. Созвучие: «кнут» + Эммануил «Кант»  $\approx$  кнат.

**5.** Название ртути на латыни (Hydrargyrum) не связано с растением, но алхимическое название «Меркурий» идентично латинскому названию растения Пролесник (Mercurialis). В алхимии ртуть считалась ключевым элементом для создания философского камня.

**O** – Hg

**P** – HgCl<sub>2</sub> (обладает белой окраской)

**Q** – HgS (обладает черной окраской, но в природе встречается в виде киновари – минерала красного цвета)



Способность одного и того же вещества существовать в различных кристаллических структурах (полиморфных модификациях), которые отличаются расположением атомов и, следовательно, физико-химическими свойствами (растворимостью, плотностью, цветом) называется **полиморфизмом**.

**6.** В октябре 2025 года Нобелевскую премию по химии получили Омар Яги, Ричард Робсон и Сусуму Китагава за разработку металл-органических каркасных структур (MOF). Это класс пористых кристаллических материалов, которые состоят из ионов металлов, соединенных органическими лигандами. Примеров таких соединений на сегодняшний день множество, в качестве примера можно привести  $[\text{Zn}_2(\text{bpy})(\text{H}_2\text{O})_2(\text{L})_2]$ , где «H<sub>2</sub>L» – это 4,7-ди(4-карбоксопиразол-1-ил)-2,1,3-бензоксадиазол, а «bpy» – 4,4'-бипиридин). Или более известный MOF-5 с формулой Zn<sub>4</sub>O(BDC)<sub>3</sub>, где «BDC<sup>2-</sup>» – это анион терефталевой кислоты (1,4-бензолдикарбоксилат).

Суть сравнения: Председатель Нобелевского комитета сравнил MOF с сумочкой Гермионы Грейнджер из-за их феноменальной пористости. Эти материалы имеют огромную внутреннюю площадь поверхности (один грамм может иметь площадь футбольного поля), что позволяет им вмещать в себя невероятное количество молекул газа или воды, «расширяя» пространство внутри.

<b>1.</b>	Три наставника по 1 баллу	$1 \cdot 3 = 3$
<b>2.</b>	Элемент <b>A</b> , вещества <b>B–D</b> , уравнение 1, хемилюминесценция по 1 баллу	$1 \cdot 4 + 1 + 1 = 6$
<b>3.</b>	Вещества <b>E–I</b> , уравнения 2–4, токсичность свинца, титановые белила по 1 баллу	$1 \cdot 5 + 1 \cdot 3 + 1 + 1 = 10$
<b>4.</b>	Вещества <b>J–N</b> по 1 баллу, уравнения 5–7, кнаты по 1 баллу	$1 \cdot 5 + 1 \cdot 3 + 1 = 9$
<b>5.</b>	Вещества <b>O–Q</b> по 1 баллу, уравнения 8–10, полиморфизм по 1 баллу	$1 \cdot 3 + 1 \cdot 3 + 1 = 7$
<b>6.</b>	Пример MOF, сравнение с сумочкой по 1 баллу	$1 + 1 = 2$
	<b>Всего:</b>	<b>37 баллов</b>

## Задача 2 (автор Задесенец А.В.):

1. Сразу стоит обратить внимание на высокую массовую долю лёгкого водорода в А и В. Это указывает на то, что остальные составляющие их элементы тоже лёгкие. О том же говорят и способность разлагаться без остатка при невысоких температурах, и даже указание округлять значения атомных масс до целых. Наконец, использование соединений А и В в промышленности свидетельствует о том, что вряд ли они относятся к химической экзотике.

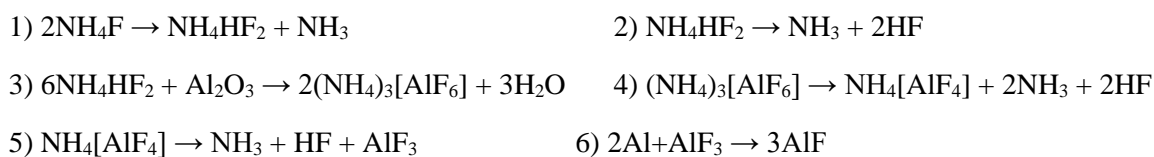
Если, как указано в условии, при разложении А с выделением Х доля водорода в твердом остатке В уменьшается, то Х неизбежно должен содержать водород. Находим второй элемент в составе бинарного Х. Сначала найдём долю водорода в Х. Представим соединение А в виде эмпирической формулы « $kX \cdot B$ », где  $k$  – число выделяющихся молекул Х на одну формульную единицу А. Массовые доли  $kX$  и В известны из первой кривой ТГ:  $\Omega_X = 23\%$ ,  $\Omega_B = 77\%$ . Тогда доля водорода в А  $\omega_{HA}$  составляет средневзвешенное арифметическое долей водорода в составе Х и В:  $\omega_{HA} = \omega_{HX} \times \Omega_X + \omega_{HB} \times \Omega_B$ . Подставляя значения, получаем линейное уравнение с одним неизвестным  $\omega_{HX}$ . Решив его, находим  $\omega_{HX} = 17,6\%$ . Далее находим второй элемент. Представим Х как  $H_n \Theta_X$ .  $\omega_{HX} = n/(n+A_r(\Theta_X)) \Rightarrow A_r(\Theta_X) = 4.67 n$ . Перебирая  $n$ , на третьей итерации находим **X = NH<sub>3</sub>**.

Остаток В разлагается на Х и Y; это следует из условия, что продукт разложения не один. С учетом условия обратимости процессов становится всё более ясным, что задача про разложение солей аммония. Отсюда следует, что бинарный Y также должен содержать водород, а не азот, иначе аммоний из аммиака в обратимом процессе не получить. Более того, для взаимодействия с аммиаком Y должен обладать выраженными кислотными свойствами, а следовательно, кроме водорода содержать неметалл. Таким образом, Y – это газообразное водородное соединение лёгкого галогена либо халькогена. Выделение аммиака в две стадии может говорить об образовании кислой соли на промежуточном этапе. Варианты с H<sub>2</sub>S и более тяжелыми халькогенами очень плохо подходят по расчётам; более того, их соединения сложно представить себе в технологической схеме переработки оксидов металлов, особенно алюминия. У оставшихся галогенов, несмотря на их «одновалентность», среди свойств можно вспомнить склонность фторидов к образованию гидродифторидов.

Находим Y, А и В. Используя представление « $kNH_3 \cdot B$ » и долю  $kNH_3$  в 23%, обнаруживаем, что уже при  $k = 1$  округленная молярная масса В составляет  $M_r(A) = 17/23 \times 77 = 57 \text{ г/моль}$ . Постепенно вычитая массу Х, анализируем массу остатка. На первом шаге ( $B = 1NH_3$  «остаток») получаем.  $57 - 17 = 40 \text{ г/моль}$ , который соответствует составу «2HF». Отсюда, **Y = HF; B = NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub>, A = NH<sub>4</sub>F**.

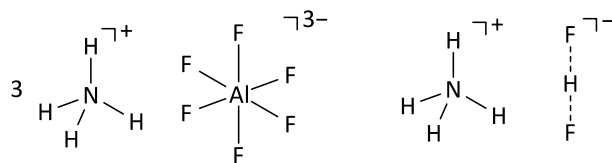
Содержащая алюминий комплексная соль С, при разложении которой выделяются NH<sub>3</sub> и HF, – это комплексный фторид алюминия с катионом аммония во внешней сфере  $(NH_4)_m[AlF_{3+m}]$ . Его полное разложение должно оканчиваться на образовании крайне стабильного AlF<sub>3</sub> (соединение Е). Поскольку разложение начинается при температуре около 300°C, образование промежуточных кислых солей уже маловероятно, и NH<sub>3</sub> и HF должны выделяться в равной пропорции. Для определения координационного числа алюминия в С приравняем соотношения молярных масс и масс на кривой ТГ:  $M_r(C)/M_r(E) = (M_r(AlF_3) + m \times M_r(NH_4F)) / M_r(AlF_3) = 100/43,1$ . Отсюда  $m=3$ , **C = (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>[AlF<sub>6</sub>]**. Аналогично, для соединения D  $m=1$ , **D = NH<sub>4</sub>[AlF<sub>4</sub>]**.

2. Все реакции идут при нагревании:



Хранят фторид аммония в плотно закрытой полипропиленовой таре (или иной инертной упаковке), так как они способны разъедать стекло.

3. Ковалентные полярные связи N–H, Al–F и H–F, водородная связь H⋯F в HF<sub>2</sub><sup>−</sup>, ионная связь между NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и [AlF<sub>6</sub>]<sup>3−</sup>, между NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и HF<sub>2</sub><sup>−</sup>.

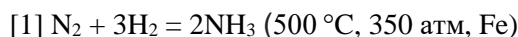


1.	Вещества A–F, X и Y по 1 баллу	1·8 = 8
2.	Уравнения 1–6, полипропилен или иной подходящий материал, взаимодействие со стеклом по 1 баллу	1·6 + 1 + 1 = 8
3.	Структурные формулы B и C по 1 баллу, связи по 0.5 балла	1·2 + 0.5·6 = 5
	<b>Всего:</b>	<b>21 балл</b>

### Задача 3 (автор Дудко Е.Р.):

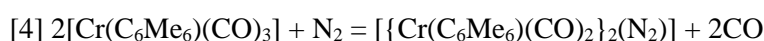
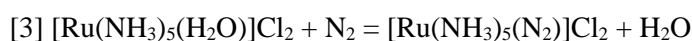
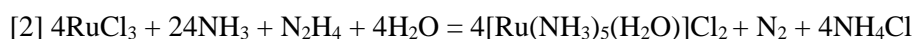
1. Процесс Габера-Боша – синтез аммиака из атмосферного азота при повышенных температуре и давлении в присутствии катализатора (железо с различными добавками). Открытие данного процесса позволило заметно увеличить производство азотной кислоты и, как следствие, азотных удобрений. Это позволило резко поднять продуктивность сельского хозяйства, что и легло в основу «зеленой революции».

Процесс Габера-Боша:

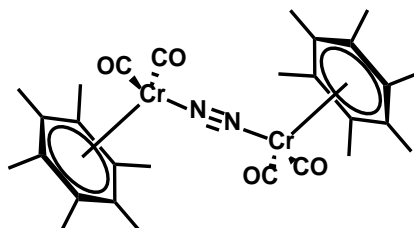


2. Гидразин восстанавливает рутений до степени окисления +2. Указание на избыток аммиака, а также подсказка про соотношение лигандов и сохранение заряда позволяют предположить состав соединения **A** –  $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_5(\text{H}_2\text{O})]\text{Cl}_2$ . Продувание через полученный раствор азота приводит к замещению воды на азот. Таким образом **B** –  $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_5(\text{N}_2)]\text{Cl}_2$ . Соединение **C** – продукт замещения карбонильного лиганда на азот, в котором последний является бидентатным и мостиковым:  $[\{\text{Cr}(\text{C}_6\text{Me}_6)(\text{CO})_2\}_2(\text{N}_2)]$ . В соединении **D** натрий восстанавливает молибден до степени окисления 0, а с помощью массовой доли молибдена можно установить его состав –  $[\text{Mo}(\text{N}_2)_2(\text{PMe}_2\text{Ph})_4]$ .

Уравнения реакций:



Структурная формула **C**:

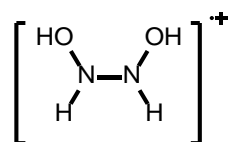


3. При взаимодействии азота и катион-радикалов димера воды образуется частица **E** –  $[\text{N}_2\text{H}_4\text{O}_2]^+$  симметричного строения. Далее она восстанавливается и распадается на две молекулы. Близкие значения массовых долей азота говорят о том, что молярные массы соединений **F** и **G** близки и отличаются, скорее всего, на пару атомов водорода (с учетом четного количества атомов водорода в **E** – на два). Тогда полученные соединения:

**F** –  $\text{HNO}$  (нитроксил или азанон)

**G** –  $\text{H}_2\text{NOH}$  (гидроксиламин)

Их структурные формулы:



Соединение **E**



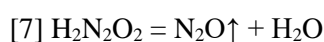
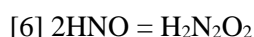
Соединение **F**



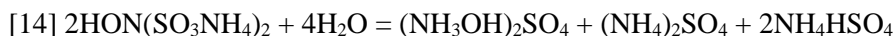
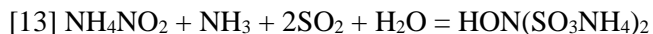
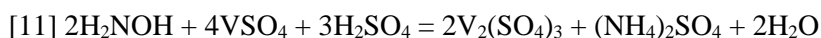
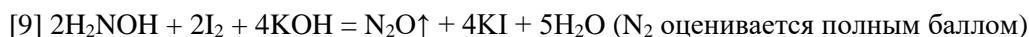
Соединение **G**

Более подробно о данном исследовании можно прочитать в статье: Zhang, X., Su, R., Li, J. et al. Efficient catalyst-free  $\text{N}_2$  fixation by water radical cations under ambient conditions // Nature Communications. 2024. V. 15, 1535. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45832-9>

4. Реакции с нитроксидом:



Реакции с гидроксиламином:



В 12 реакции в электролизер добавляют соляную кислоту для осаждения продукта в виде малорастворимой в кислой среде солянокислой соли.

Таблица с соединениями:

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	
$[\text{Ru}(\text{NH}_3)_5(\text{H}_2\text{O})]\text{Cl}_2$	$[\text{Ru}(\text{NH}_3)_5(\text{N}_2)]\text{Cl}_2$	$[\{\text{Cr}(\text{C}_6\text{Me}_6)(\text{CO})_2\}_2(\text{N}_2)]$	$[\text{Mo}(\text{N}_2)_2(\text{PMe}_2\text{Ph})_4]$	
<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>
$[\text{N}_2\text{H}_4\text{O}_2]^{++}$	HNO	H <sub>2</sub> NOH	HNO <sub>3</sub>	HON(SO <sub>3</sub> NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>

<b>1.</b>	Уравнение 1, суть «зеленой революции» – по 1 баллу	$1 + 1 = 2$
<b>2.</b>	Вещества A-D, уравнения 2–5, структура C по 1 баллу	$1 \cdot 4 + 1 \cdot 4 + 1 = 9$
<b>3.</b>	Вещества E–G, структурные формулы E–G, названия F и G по 1 баллу	$1 \cdot 3 + 1 \cdot 3 + 1 \cdot 2 = 8$
<b>4.</b>	Вещества H–I, уравнения 6–14, малорастворимый хлорид – по 1 баллу	$1 \cdot 2 + 1 \cdot 9 + 1 = 12$
	<b>Всего:</b>	<b>31 балл</b>

#### Задача 4 (автор Клейман Е.Е.):

**1.** Геммология (от лат. *gemma* – «самоцвет, драгоценный камень», и др.-греч. *λόγος* – «слово, разум») – наука о самоцветах, совокупность сведений о драгоценных и поделочных камнях (физических свойствах и химическом составе), их декоративно-художественных достоинствах для ювелирного и камнерезного производства.

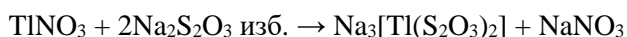
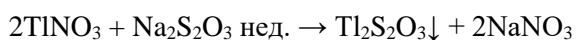
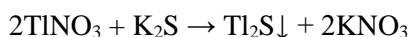
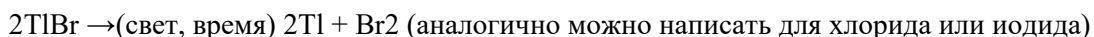
**2.** Информация о токсичности элемента X и о его сходстве как с щелочными металлами, так и серебром наводит на мысль о том, что под X зашифрован таллий. Кроме того, таллий имеет две степени окисления – устойчивую +1 и неустойчивую +3, в которой является сильным окислителем. Жидкость Клеричи – раствор, содержащий в равных долях формиат и малонат таллия. Плотность раствора варьируется в широких пределах в зависимости от температуры и степени разбавления, а показатель преломления (*n*) линейно зависит от плотности (*d*) в соответствии с уравнением  $n = 0,1152d + 1,2078$ . Благодаря этому свойству можно легко вычислить плотность исследуемого минерала по оптическим характеристикам раствора, в котором минерал начинает «плавать».

*Сходство со щелочными металлами (варианты уравнений):*

TlOH – щёлочь (растворимое основание, являющееся сильным электролитом)

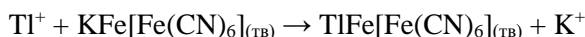


*Сходство с серебром (варианты уравнений):*



**3.** Ионы  $\text{K}^+$  и  $\text{Tl}^+$  имеют близкий ионный радиус (0,133 нм и 0,136 нм соответственно), поэтому способны замещать друг друга. Таким образом,  $\text{Tl}^+$  легко попадает в организм по путям  $\text{K}^+$ , однако другие его химические свойства сильно отличаются от свойств ионов щелочных металлов. Например, таллий имеет высокое сродство к сере, а потому способен связывать её из белков, с чем, в первую очередь, и связано его токсическое воздействие на организм.

Действие противоядия также основано на сходстве размеров ионов калия и таллия(I).  $\text{TlFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  имеет растворимость сильно ниже, чем  $\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ , потому не всасывается в кишечнике и выводится из организма естественным путём:

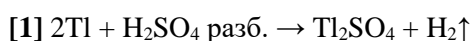


Ферроцин также прочно связывает ионы цезия и рубидия, предупреждая их всасывание из кишечника, что позволяет ускорить их выведение из организма.

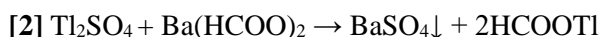
#### 4. Формулы веществ:

<b>X</b>	Tl	<b>D</b>	$\text{Tl}_2\text{S}_2\text{O}_3$	<b>H</b>	$\text{Tl}(\text{NO}_3)_3$		
<b>A</b>	$\text{HCOOTl}$	<b>E</b>	$\text{Na}_3[\text{Tl}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]$	<b>I</b>	$\text{TlNO}_3$		
<b>B</b>	$\text{TlOOC}-\text{CH}_2-\text{COOH}$	<b>F</b>	$\text{TlCl}_3$	<b>J</b>	$\text{Tl}_2\text{O}$		
<b>C</b>	$\text{Tl}_2\text{SO}_4$	<b>G</b>	$\text{Tl}[\text{TlCl}_4]$	<b>K</b>	$\text{Tl}_2\text{O}_3$	<b>L</b>	$\text{H}[\text{TlCl}_2]$

**5.** В электрохимическом ряду напряжений металлов таллий располагается левее водорода, поэтому способен вытеснять его из кислот-неокислителей, переходя при этом в наиболее устойчивую степень окисления +1:



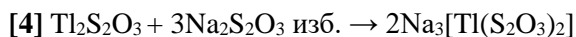
Соли таллия(I) закономерно вступают в реакции ионного обмена:



Таллий(I) осаждается из раствора тиосульфат-ионами:



При избытке  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  образуется устойчивый тиосульфатный комплекс таллия(I), аналогичный бис(тиосульфато)аргентатному:



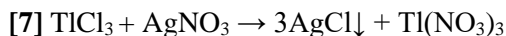
Металлический таллий окисляется хлором до хлорида таллия(III):



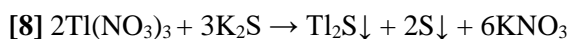
Tl(III) внутримолекулярно окисляет хлор уже при 40°C:



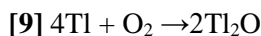
Однако соли таллия(III) способны вступать в классические реакции ионного обмена:



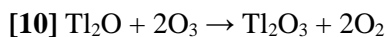
Под действием восстановителей таллий легко переходит из трёхвалентного состояния в одновалентное:



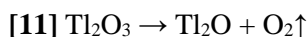
Металлический таллий окисляется кислородом до наиболее устойчивой степени окисления +1:



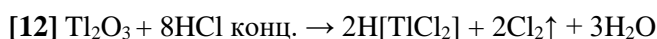
Таллий(III) можно получить при действии более сильных окислителей, например, озона:



Однако оксид таллия(III) неустойчив и разлагается уже при 100°C:



Таллий(III) способен окислять хлорид-ионы в кислой среде с образованием комплексной кислоты:



5. Название таллий получил по характерным зелёным линиям своего спектра. От др.-греч.  $\theta\alpha\lambda\lambda\acute{o}\varsigma$  — молодая, зелёная ветвь.

1.	Геммология – 1 балл	1
2.	Элемент X, два уравнения по 1 баллу	1 + 1·2 = 3
3.	Уравнение реакции, указание цезия или рубидия по 1 баллу	1 + 1 = 2
4.	Вещества A–L, уравнения реакций 1–12 – по 1 баллу	1·12 + 1·12 = 24
5.	Указание на спектральные линии – 1 балл	1
	<b>Всего:</b>	<b>31 балл</b>

### Задача 5 (автор Романов А.С.):

1. Давление в бутылке по данным видео Veritasium составляет 3,3 бар.

Сначала необходимо понять, можно ли пренебречь влиянием  $\text{CO}_2$  на pH раствора, по сравнению с фосфорной кислотой. По условию задачи давление  $\text{CO}_2$  не превышает 12 бар. Сделаем быструю оценку для этого давления:

$$\frac{[\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}}]}{12} = 3,4 \cdot 10^{-2} \Rightarrow [\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}}] = 0,4080 \text{ М}$$
$$K_0 = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{CO}_{2,\text{aq}}]} = \frac{0,408 - [\text{CO}_{2,\text{aq}}]}{[\text{CO}_{2,\text{aq}}]} = 1,5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow [\text{CO}_{2,\text{aq}}] = 0,4074 \text{ М}$$
$$K_1 = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_{2,\text{aq}}]} \approx \frac{[\text{H}^+]^2}{0,4074 - [\text{H}^+]} = 4,5 \cdot 10^{-7} \Rightarrow [\text{H}^+] \cong \sqrt{0,4074 \cdot K_1}, \text{pH} = 3,37$$

При этом фосфорная кислота указанной концентрации дает:

$$\frac{[\text{H}^+]^2}{5,55 \cdot 10^{-3} - [\text{H}^+]} = 7,1 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \text{pH} = 2,44$$

Даже при большом давлении влияние  $\text{CO}_2$  на pH раствора оказывается незначительным. Конечно, далее это нужно будет еще раз проверить.

В бутылку объемом 2000 мл (1970 мл жидкости и 30 мл газа) добавляют 12,32 г = 0,28 моль углекислого газа. Проведем оценку «сверху», пусть давление  $\text{CO}_2$  составляет 12 бар, тогда в газовой фазе его будет находиться 0,0147 моль, что составляет 5,25% от общего количества углекислого газа. Поскольку итоговое давление будет в несколько раз меньше, то в газовой фазе будет содержаться в несколько раз меньше  $\text{CO}_2$ , поэтому его количеством в газовой фазе можно пренебречь. Таким образом  $C(\text{CO}_2) = 0,14 \text{ М}$  и давление в бутылке равно 4,1 бар, что немного превышает измеренное в указанном видео, однако попадает в интервал давлений, который обычно указывают в интернете. Вероятно, когда автор видео надевал манометр на бутылку, часть углекислого газа была выпущена, что и привело к уменьшению давления. Ещё можно отметить, что для расчётов использован закон Генри, который строго говоря корректно использовать лишь при маленьких давлениях. Произведем расчёты:

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{C(\text{CO}_2)}{1 + \frac{[\text{H}^+]}{K_2} + \frac{[\text{H}^+]^2}{K_1 K_2}} = \frac{0,14}{1 + 7,56 \cdot 10^7 + 6,10 \cdot 10^{11}} = 2,30 \cdot 10^{-13} \text{ М}$$
$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{C(\text{CO}_2) \frac{[\text{H}^+]}{K_2}}{1 + \frac{[\text{H}^+]}{K_2} + \frac{[\text{H}^+]^2}{K_1 K_2}} = \frac{0,14 \cdot 7,56 \cdot 10^7}{1,68 \cdot 10^{14}} = 1,74 \cdot 10^{-5} \text{ М}$$

Видно, что фосфорная кислота полностью подавляет диссоциацию  $\text{CO}_2$ . Пренебрежение верно.

$$[\text{CO}_{2,\text{aq}}] = \frac{C(\text{CO}_2) \frac{[\text{H}^+]^2}{K_1 K_2}}{1 + \frac{[\text{H}^+]}{K_2} + \frac{[\text{H}^+]^2}{K_1 K_2}} \cong 0,14 \text{ М}$$
$$K_0 = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{CO}_{2,\text{aq}}]} = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{0,14 - [\text{H}_2\text{CO}_3]} = 1,5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow [\text{H}_2\text{CO}_3] = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ М}$$

2. Становится очевидно, что при стоянии на воздухе (если вода не испаряется!) pH раствора почти не меняется и остается равным 2,44. При этом  $[\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}}] = 0,034 \cdot 0,0004 \cdot 1 = 1,36 \cdot 10^{-5} \text{ М}$ . Поскольку pH не меняется, то не меняется и функция закомплексованности карбонат-иона, следовательно, аналитическая концентрация  $\text{CO}_2$  определяется только формами  $[\text{CO}_{2,\text{aq}}]$  и  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$  и равна  $1,36 \cdot 10^{-5} \cdot 44 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ г/л}$ . То есть при стоянии из бутылки выходит практически весь углекислый газ.

3. Из предыдущих расчётов ясно, что в нескрытой бутылке  $[\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}}] = 0,14 \text{ М}$ , следовательно, константа Генри должна уменьшиться при нагревании до значения  $K_T = 0,14/12 = 0,0117 \text{ М/бар}$ . Воспользуемся изобарой Вант-Гоффа:

$$\ln \frac{0,034}{0,0117} = 1,0668 = \frac{19,882 \cdot 10^3}{8,314} \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right) \Rightarrow T = 344 \text{ K}$$

Бутылку необходимо нагреть примерно до 70 °С, что представляется вполне реализуемым.

Однако при проведении реального, а не мысленного эксперимента, необходимо учитывать, что бутылка, сделанная из полиэтилентерефталата, будет расширяться под действием давления CO<sub>2</sub>. Автором задачи и редактором комплекта заданий экспериментально установлено, что расширение бутылки объемом 0,5 л происходит примерно в 2 раза при нагревании бутылки до целевой температуры в 344 К. Проведем расчеты для бутылки 0,5 л, с учетом, что при нагревании её объем увеличится в 2 раза. То есть объемы жидкой и газовой фазы будут равны по 0,5 л. В таком случае уже нельзя пренебрегать количеством CO<sub>2</sub> в газовой фазе. Будем считать, что в бутылку объемом 0,5 л добавляют 0,28/4 = 0,07 моль углекислого газа. Начальная концентрация углекислоты в растворе остается прежней – 0,14 М. Также, пренебрежем зависимостью констант равновесия от температуры, кроме константы Генри:

$$n_0(\text{CO}_2) = 0,07 \text{ моль} \approx n(\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}}) + n(\text{CO}_2)_{\text{газ}}$$

$$0,0117 = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}}]}{p(\text{CO}_{2,\text{газ}})} = \frac{n(\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}})}{V_{\text{р-р}} \cdot \frac{n(\text{CO}_2)_{\text{газ}} RT}{V_{\text{газ}}}} = \frac{1}{0,08314 \cdot 344} \cdot \frac{n(\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}})}{n(\text{CO}_2)_{\text{газ}}}$$

$$0,3346 = \frac{n(\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}})}{n(\text{CO}_2)_{\text{газ}}}$$

$$\begin{cases} 0,3346 = \frac{n(\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}})}{n(\text{CO}_2)_{\text{газ}}} \\ 0,07 \text{ моль} = n(\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}}) + n(\text{CO}_2)_{\text{газ}} \end{cases}$$

Решением системы уравнений является пара:  $n(\text{H}_2\text{CO}_{3,\text{эфф}}) = 0,01755$  моль,  $n(\text{CO}_2)_{\text{газ}} = 0,05245$  моль. То есть большая часть CO<sub>2</sub> выходит в газовую фазу. При этом давление  $p(\text{CO}_2) = 0,05245 \cdot 0,08314 \cdot 344 / 0,5 = 3$  бар. Бутылка не разорвется, что и было показано экспериментально при нагревании нижней части бутылки до 344 К. Если нагревать бутылку целиком, то резьба пробки деформируется ( $T_{\text{стеклования ПЭТ}} = 343 \text{ K}$ ) и она вылетает.



4. Для воссоздания вкуса Соса-Сола (версия V111) Зак Армстронг (LabCoatz) использовал научный подход, разделив рецепт на несколько ключевых баз.

а) Ароматическая эмульсия.

Масла цитрусовых: лимонное, апельсиновое и масло лайма.

Специи: масло кассии (китайская корица), мускатного ореха и кориандра.

Нероли: эфирное масло из цветков горького апельсина.

б) Секретный «заменитель» коки.

Так как доступ к декокаинизированным листьям коки есть только у компании Степан (Stapan Company), LabCoatz имитировал их химический профиль.

Масло чайного дерева: для воссоздания специфических терпенов (в микродозах).

Винные танины: для придания напитку характерной терпкости и «сухого» послевкусия.

в) Основные ингредиенты.

Сахароза: огромное количество для сладости и плотности.

Ортофосфорная кислота: для той самой резкой кислинки, которая балансирует сахар.

Карамельный колер (E150d): для темно-коричневого цвета.

Кофеин: Как легкий стимулятор и горькая вкусовая добавка.

Экстракт ванили: Для смягчения вкусового профиля.

г) Неочевидные добавки.

Глицерин: использовался как растворитель для масел, чтобы они смешались с водой, а не плавали на поверхности.

Уксусная кислота: в минимальных количествах для завершения химического букета.

По результатам его эксперимента, даже масс-спектрометр подтвердил, что химический «отпечаток» его напитка практически совпал с оригиналом.

1.	Давление, рН и равновесные концентрации частиц – по 3 балла	$3+3+3\cdot 4 = 18$
2.	рН и аналитическая концентрация – по 3 балла	$3+3 = 6$
3.	Температура – 3 балла	3
4.	Любые подходящие 6 компонентов по 0.5 балла	3
	<b>ИТОГО:</b>	<b>30 баллов</b>