**Задание 1. «Химики меча и магии».**

В 2024 году исполняется 25 лет одной из самых популярных компьютерных стратегий в мире – «Герои меча и магии III». Сегодня, дорогой участник Всесибирской олимпиады, Вы посетите нагорья Бракады, удивительные земли, которые населяют маги и джинны. Бракада всегда славилась своими богатейшими россыпями самоцветов, пещерами кристаллов, шахтами, рудниками и прочими источниками ресурсов. К несчастью, эти месторождения постоянно прельщают ужасных алчных ржавых драконов, разоряющих всё на своём пути. Для защиты от них волшебники создают гарнизоны из стальных големов, но кислотное дыхание, изрыгаемое драконами, разъедает компоненты их доспехов и механизмов. Жозефине (герою-алхимику, специализирующемуся на големах) было поручено решить эту проблему, разработав драконостойких големов.

Первым делом Жозефина исследовала кислоту **A**, выплёвываемую драконом. При стоянии на свету колбы с образцом кислоты **A** раствор желтел вследствие появления в нем бурого газа **B** [реакция 1]. Исследуемая кислота была подвергнута нейтрализации раствором натриевой щелочи с образованием соли **B** [2]. После этого раствор она упарила, а полученную соль **B** разложила нагреванием. В ходе разложения образовалась соль **Г**, **анион** которой содержит 69,55% кислорода по массе, а также выделился газ **Д**, поддерживающий горение [3]. Соль **Г** при дальнейшем нагревании тоже разлагается [4], образуя твёрдый оксид **Е** ($\omega(\text{O}) = 25,81\%$), а также бесцветные газы **Ж** и **Д**.

При добавлении к соли **Г** водного раствора иодоводорода образуется газ **Ж** и простое вещество **З**, пары которого окрашены в фиолетовый цвет [5].

При растворении **Е** в воде протекает реакция [6], а получаемый при этом раствор вещества **И** окрашивается при добавлении фенолфталеина.

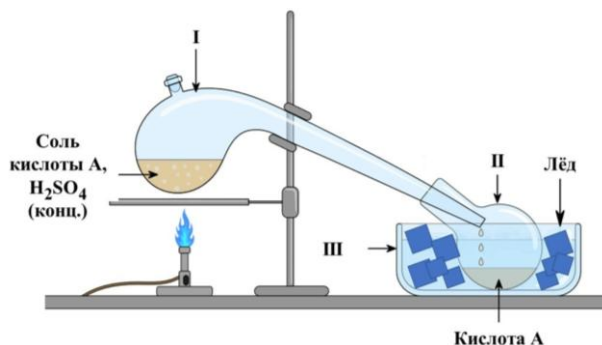
Известно, что газ **Д** также может быть получен при нагревании перманганата калия [7].

1. Установите формулы веществ **A-I**. Напишите уравнения реакций [1-7]. Какую окраску будет давать раствор **И** в воде со следующими индикаторами: а) фенолфталеином; б) лакмусом; в) метилоранжем?

2. Рассчитайте массовую долю **A** в образце, полученном из дракона, если для полной нейтрализации 100 г этого раствора потребовалось 720 мл раствора натриевой щелочи с концентрацией 1 моль/л.

Для дальнейших экспериментов наша героиня решила сама приготовить кислоту **A**, для чего она собрала установку, изображённую на рисунке. В сосуд **I** она помещала смесь концентрированной серной кислоты и натриевую соль **A**. После нагревания смеси образовалась кислая соль и пары **A** [8], конденсат которых собирался в сосуде **II**.

3. Напишите уравнение реакции [8]. Приведите названия частей **I-III** изображённой установки.



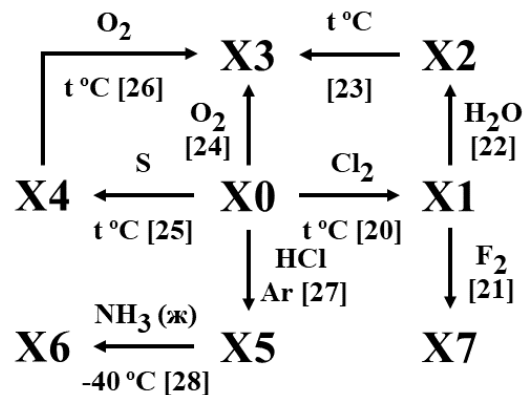
Жозефина уже имела богатый опыт работы с кислотой **A**. В частности, она изучала её взаимодействие с основными ресурсами, представленными в игровой вселенной. Вам предоставлены фрагменты её лабораторного журнала, где описаны эксперименты с использованием **концентрированной А**. «Золото растворяла в царской водке [9]. Начала опыты с самоцветами, алмаз оказался устойчив к действию кислоты, но сгорал в атмосфере фтора [10]. Раствор, полученный при взаимодействии кристаллов минерала родохрозита (MnCO_3) и **A** [11], упарила, а твердый остаток прокалила [12], полученный оксид ($\omega(\text{O}) = 36,81\%$) может окислять соляную кислоту [13]. Взаимодействие **A** и серы приводило к образованию другой сильной минеральной кислоты [14]. Руда, состоящая в основном из магнетита (Fe_3O_4), растворяется в кислоте **A** с образованием единственной соли [15]. Взаимодействие ртути с кислотой **A** даёт соль [16], при добавлении к раствору которой раствора гидроксида натрия выпадает в осадок бинарное (двухэлементное) вещество жёлтого цвета [17]».

4. Напишите уравнения реакций [9-17].

Долго размышляла над решением проблемы с големами героиня. И вот, наконец, во время одной из прогулок по городу, взглядевшись в *заоблачный храм*, она воскликнула: «Конечно же, металл **X0**! Он превосходно пассивируется (становится не активным) под действием кислоты **A**!». Для металла **X0** характерно сочетание сравнительно малой плотности, высокой механической прочности и коррозионной стойкости, что делает его ценным конструкционным материалом. Основным источником элемента **X** на Земле служит минерал рутил ($\omega(\text{O}) = 40,06\%$). Для получения металла **X0** рутил спекают с углём в присутствии хлора [18], в ходе реакции образуется высший хлорид **X** и угарный газ. Далее полученный хлорид элемента **X** взаимодействует с металлическим магнием [19], который восстанавливает его до металла **X0**.

5. Установите формулу рутила и напишите название элемента **X**, которому соответствует простое вещество **X0**. Напишите уравнения реакций [18-19].

Вспомнив, насколько удивительна и разнообразна химия элемента **X**, Жозефина тут же составила схему превращений. На схеме представлено несколько соединений **X**, часть из которых является ценными материалами или лабораторными реактивами. Известно, что в большинстве приведённых веществ (кроме **X0**, **X5** и **X6**) элемент **X** находится в высшей степени окисления. В реакции [21] один из продуктов - простое вещество. **X2** – продукт полного гидролиза **X1**. Одним из продуктов реакции [26] является сернистый ангидрид. **X5** содержит 68,95% хлора по массе. Во внутренней координационной сфере **X6** находится только один тип лигандов.



6. Установите формулы веществ **X1-X7** и напишите уравнения реакций [20-28].

Литьё големов целиком из металла **X0** экономически нецелесообразно, поэтому Жозефина решила использовать нанесение этого металла на поверхность стали при помощи электрического тока. Электролиз она проводила в инертной атмосфере с разделением катодного и анодного пространств. В качестве электролита Жозефина использовала расплав одного из хлоридов **X** ($\omega(\text{Cl}) = 59,69\%$) и пропустила через систему заряд, равный 121000 Кл. В ходе реакции электролиза на катоде, которым служили доспехи големов, выделялся **X0** [29-катодная реакция], а на инертном аноде образовался газ жёлто-зелёного цвета [30-анодная реакция].

7. Напишите уравнения электродных реакций [29-30]. Вычислите массу металла **X0**, образовавшегося в ходе электролиза. Необходимые данные: закон Фарадея $m = \frac{Q \cdot M}{z \cdot F}$, m – масса выделившегося на электроде вещества, Q – прошедший заряд, M – молярная масса иона, z – заряд иона, $F = 96485 \text{ Кл/моль}$ – постоянная Фарадея.

За успешное выполнение задания король Гевин Магнус пожаловал Жозефине титул Герцогини Бракады, она снискала славу одного из величайших алхимиков своего времени, а её трактаты долгое время считались классическими трудами в алхимии.

Задание 2. «Недоверчивые авторы».

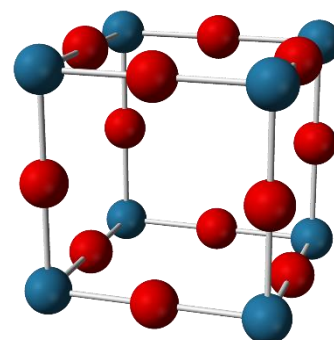
«Пятнадцатилетию задачи номер 5 посвящается»

«Один опыт я ставлю выше, чем тысячу мнений, рожденных только воображением»

М.В. Ломоносов

Около 15 лет назад один из студентов НГУ усомнился в достоверности информации о том, что металл **A** не реагирует с неким неметаллом в расплавленном состоянии. Прочитал он об этом в монографии М. Ситтига «**A**, его производство, свойства и применение» (Госатомиздат, Москва, 1961 г.). Стоит отметить, что сотрудники Института неорганической химии СО РАН, к которым студент обратился с этим вопросом, также поддержали его сомнения. Тем не менее, опыты, проведенные автором той самой «задачи № 5», подтвердили информацию из монографии, а результаты тех опытов составили основу задачи для заключительного этапа Всероссийской олимпиады школьников.

В той же монографии написано: «при обычных условиях **A** не реагирует с **B**. При повышенных же температурах **A** способен реагировать с **B**, давая два продукта реакции: **C** и **D**». Как и 15 лет назад, но теперь автор уже этой задачи усомнился в справедливости написанного и отправился искать более современную и достоверную информацию. Поразительно! Но **A** действительно реагирует (реакция [1]) со стократным избытком вещества **B**, образуя только вещество **C**, однако условия проведения реакции оказались гораздо экзотичнее, нежели указанные Ситтигом. Вещества **A** и



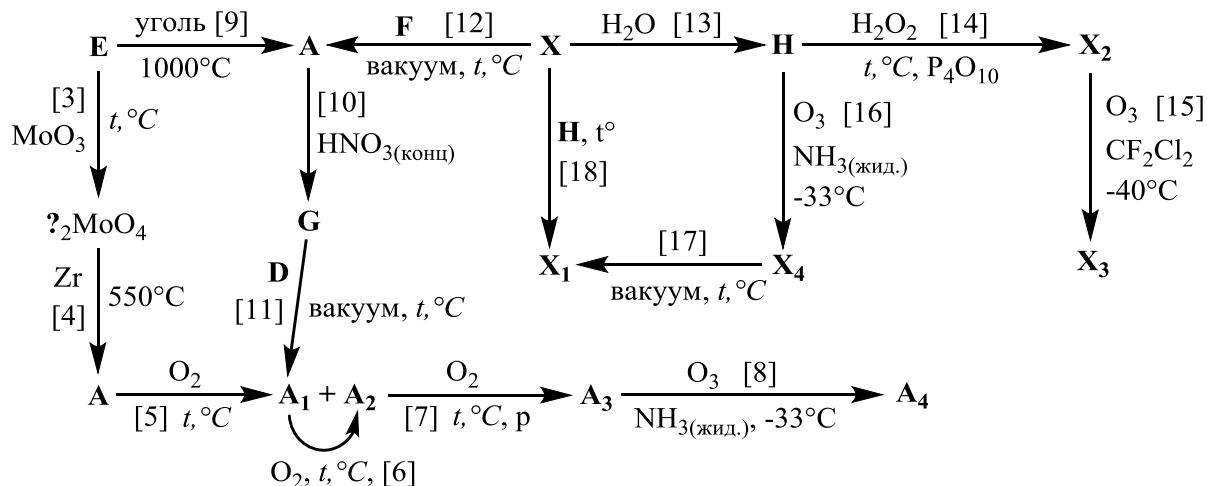
Элементарная ячейка соли **C**

В вводят в реакцию, осаждая их из газовой фазы на сапфировую подложку при $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, пониженном давлении и при воздействии микроволновой плазмы. Образующееся красно-коричневое вещество **С** ($\omega(\text{N}) = 16,87\%$) имеет металлический блеск и очень охотно разрушается парами воды с образованием аммиака [2]. Вещество **Д** получают косвенным путем.

1. Напишите уравнения реакций [1], [2] и формулы веществ **А** – **Д**, если известно, что при высокой температуре 1,00 г соли **Д** необратимо разлагается с образованием 354 мг **А** и 517 мл (н. у.) газа **В**.

2. Как в лабораторных условиях можно обеспечить температуру синтеза $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Ниже представлена схема, иллюстрирующая получение некоторых сложных веществ. Элемент, образующий простое вещество **Х**, находится в одной подгруппе ПС с элементом, образующим вещество **А**.



В реакции [5] вещество **A₁** образуется в качестве примеси к основному продукту **A₂**. Вещества **A₄** и **X₄** содержат одинаковый анион, соединения **A₁ – A₄** являются бинарными (двухэлементными) и имеют одинаковый качественный состав. Вещества **X₁ – X₃** также являются бинарными и имеют одинаковый качественный состав, а **X₄** относится к классу координационных соединений.

В таблице дано массовое содержание некоторых элементов в нескольких соединениях.

| Соединение | Е | F | X₃ | X₄ |
|---------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Массовая доля | $\omega(\text{C}) = 11,32\%$ $\omega(\text{O}) = 45,28\%$ | $\omega(\text{F}) = 45,24\%$ | $\omega(\text{O}) = 82,05\%$ | $\omega(\text{N}) = 45,53\%$ |

3. Напишите формулы веществ **Е – Н**, **X**, **A₁ – A₄**, **X₁ – X₄** и уравнения реакций [3] – [18].

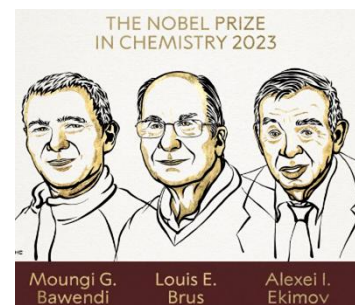
Одна из наиболее интересных особенностей простых веществ **А** и **Х** – их легкая растворимость в жидком аммиаке с образованием ярко-синих растворов с необычными свойствами. Разбавленные растворы имеют высокую электропроводность и одинаковую синюю окраску, что говорит о присутствии одинаковых окрашивающих частиц **Z**. Тем не менее, раствор **А** в чистом жидком аммиаке остается стабильным в течение нескольких месяцев и после испарения аммиака из этого раствора снова выделяется вещество **А**. Однако при добавлении в этот раствор нитрата железа(III) в качестве катализатора выделяется газ и происходит образование соли **Y** [19] (59,0 масс. % элемента **А**). Интересно, что чистая соль **Y** имеет белый цвет, но при выпаривании аммиака на дне сосуда остается порошок серого цвета.

4. Что представляет собой частица **Z**? Напишите формулу соли **Y** и уравнение реакции [19]. Почему при выпаривании аммиака образуется порошок именно серого цвета, несмотря на то, что чистая соль **Y** имеет белый цвет?

Задание 3. «Квантовые точки».

Нобелевскую премию по химии в 2023 г. присудили Алексею Екимову, Мунги Бавенди и Луису Брюсу за открытие и исследование квантовых точек. Квантовые точки представляют собой кристаллические частицы размерами в несколько нанометров, которые имеют свойства полупроводников и применяются для создания дисплеев QLED, а также очень перспективны для использования в клеточной биологии и медицине.

Большой интерес для науки представляет получение квантовых точек на основе соединений элемента **Х**. Потребность в соединениях данного элемента, существование которого предсказал еще Д.И. Менделеев, существенно выросла за последние 30 лет. Так, мировое потребление **Х** в 2023 г. составило около 100 тонн. Вещества, содержащие



элемент **X**, играют важную роль в производстве электроники, так как используются в промышленности для изготовления полупроводниковых материалов.

Ученые Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской Академии Наук работают над синтезом квантовых точек на основе соединения **I**, представляющего из себя нитрид элемента **X** с массовой долей **X** 83,33% и являющегося одним из самых эффективных полупроводников современности.

Помимо использования в качестве полупроводниковых материалов соединения элемента **X** применяются и в других областях. Например, малотоксичный сплав, содержащий элемент **X**, индий и олово, является отличной альтернативой ртути при изготовлении бытовых термометров. Средняя молекулярная масса такого сплава составляет 80 г/моль, содержание элементов по массе следующее: $\omega(\text{X}) = 68,5\%$, $\omega(\text{In}) = 21,5\%$, $\omega(\text{Sn}) = 10\%$.

1. Установите элемент **X** и формулу вещества **I**. Ответы подтвердите расчетом. Укажите название сплава, если известно, что оно состоит из первых слогов латинских названий входящих в него элементов в порядке упоминания их в тексте задачи.

В 1869 году Д.И. Менделеев сформулировал Периодический закон, который гласил, что свойства элементов, а также состав и свойства образуемых ими простых веществ и соединений находятся в периодической зависимости от величин их атомных масс (конечно, со временем периодический закон был доработан и величины атомных масс в формулировке закона были заменены на заряды ядер атомов). При создании периодической системы химических элементов в 1869 г. он, основываясь на Периодическом законе, оставил вакантные места в IV периоде для неизвестных на тот момент элементов **X** и **M** – аналогов уже известных р-элементов **Z** и **Y**, соответственно, расположенных в III периоде.

Менделеев, основываясь на свойствах соседних, хорошо изученных элементов, достаточно точно описал не только важнейшие физические и химические свойства, но и предсказал метод открытия еще не обнаруженных химических элементов – спектроскопию.

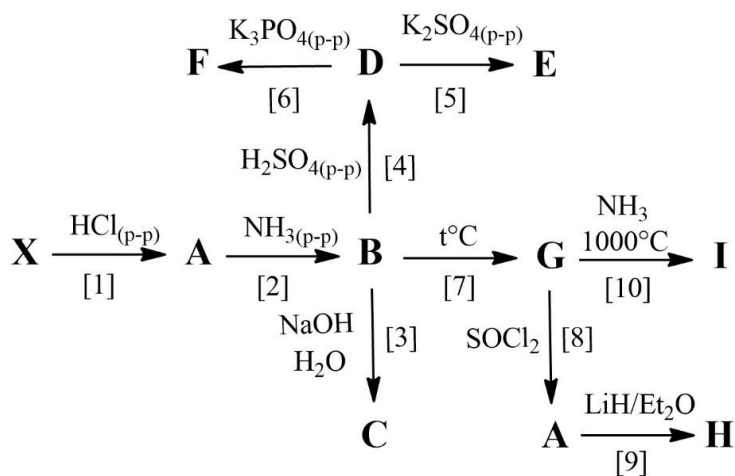
2. Укажите названия элементов **Z** и **Y**, а также названия элементов **X** и **M**, данные им Д.И. Менделеевым.

Вскоре после открытия Периодического закона элемент **X** был открыт и выделен в виде простого вещества французским химиком Полем Эмилем Лекоком де Буабодраном. Это был триумф Периодического закона! Вскоре на основании выводов Д.И. Менделеева были обнаружены и прочие предсказанные им элементы.

Основываясь на Периодическом законе, нетрудно догадаться, что химические свойства элементов **X** и **Z** будут очень схожи. Так, при растворении простого вещества, образованного элементом **X**, в растворе соляной кислоты происходит образование раствора соли металла **X** (*вещество А*) [реакция 1]. Взаимодействие полученного раствора **A** с раствором аммиака [2] приводит к образованию осадка *вещества В*. По аналогии с гидроксидом металла **Z**, *вещество В* растворяется в избытке щелочи, так, например, при его взаимодействии с избытком раствора гидроксида натрия образуется *комплексная соль С* [3], в которой соотношение атомов натрия и кислорода равно 1 к 4. В кислотах **B** тоже растворяется [4]. Наиболее яркая аналогия между соединениями элементов **X** и **Z** проявляется в образовании изоструктурных соединений, например, **E** [5], **F** [6] и **H** [9]. Эти соединения элемента **X** имеют такие же кристаллические решетки, как соответствующие им, всем знакомые, соединения элемента **Z**. Так, например, *вещество E* (с массовой долей элемента калия $\omega = 6,84\%$) относится к классу квасцов, точно так же, как и его аналог, содержащий элемент **Z**. *Вещество F* так же, как и изоструктурное соединение элемента **Z**, нерастворимо в воде, а *вещество H*, которое является комплексным соединением, тоже может применяться в качестве сильного восстановителя в органическом синтезе. Получают *вещество H* также как и его аналог с элементом **Z** – взаимодействием безводного хлорида **A** с гидридом лития в диэтиловом эфире (Et_2O) в качестве растворителя [9].

При нагревании *вещества В* [7] получается *вещество G* ($\omega(\text{X}) = 74,47\%$). Отметим, что получение безводного хлорида металла **X** является непростой задачей, так как при выпаривании водного раствора **A** образуется гексагидрат хлорида металла **X** (точно такое же поведение наблюдается и для раствора хлорида элемента **Z**). Для решения этой задачи в качестве исходного вещества берут *вещество G* и действуют на него хлористым тионилем, при этом в результате реакции, помимо безводного хлорида металла **X** (*вещество А*), образуется газ, который тяжелее воздуха приблизительно в два раза [8].

Описанные химические превращения соединений элемента **X** представлены на схеме справа.



3. Напишите формулы веществ **A-H** и уравнения реакций [1-10].

Помимо применения в электротехнике и термометрах, некоторые соединения элемента **X** (например нитрат), широко применяются в медицине при лечении гиперкальциемии, вызванной злокачественными новообразованиями. Препараты, содержащие это вещество, снижают вымывание кальция из костной ткани, связываясь с гидроксипатитом и уменьшая его растворимость.

Некоторое количество безводного нитрата элемента **X**, т.е. $X(NO_3)_3$, растворили в 150 г воды при $60^\circ C$, а затем охладили до $20^\circ C$. При этом в осадок выпало 41,8 г девятиводного нитрата элемента **X** ($X(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) и, соответственно, образовался насыщенный при $20^\circ C$ раствор $X(NO_3)_3$.

4. Определите массовую долю безводного нитрата $X(NO_3)_3$ в исходном растворе при $60^\circ C$ (в %). Растворимость безводного нитрата элемента **X** при $20^\circ C$ составляет 181 г на 100 г воды.

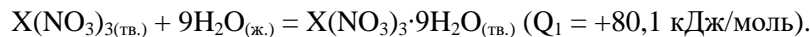
Дан отрывок таблицы растворимости солей элемента **X**:

| | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| Анион | F ⁻ | S ²⁻ | PO ₄ ³⁻ | SO ₄ ²⁻ | MoO ₄ ²⁻ | Br ⁻ |
| Соединение с X³⁺ | H | – | H | P | H | P |

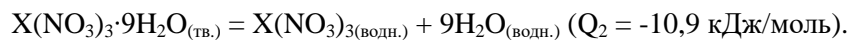
Примечание: **H** – нерастворимое в воде соединение, **P** – растворимое в воде соединение.

5. С водными растворами каких соединений реагирует водный раствор нитрата элемента $X(NO_3)_3$: серная кислота, молибдат калия, фторид аммония, бромоводородная кислота, нитрат бария, фосфат натрия, сульфид калия (напишите уравнения протекающих реакций)?

Образование девятиводного кристаллогидрата из нитрата элемента **X** и воды описывается следующим термохимическим уравнением:

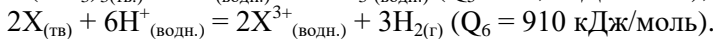
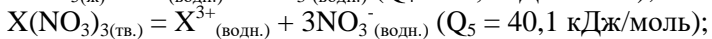
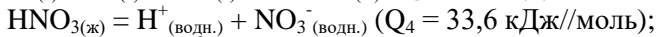


Растворение девятиводного кристаллогидрата элемента **X** в воде можно описать следующим термохимическим уравнением:



6. Вычислите тепловой эффект процесса растворения 1 моль безводного нитрата элемента **X** в воде.

Вам известны тепловые эффекты следующих реакций:



Дополнительно известно, что теплота образования воды $Q_f(H_2O)$ равна 285,8 кДж/моль.

7. Рассчитайте тепловой эффект реакции образования твердого девятиводного кристаллогидрата нитрата элемента **X** из простых веществ ($X_{(тв.)} + 1,5N_{2(г)} + 9H_{2(г)} + 9O_{2(г)} = X(NO_3)_{3(тв.)} \cdot 9H_2O_{(тв.)}$).