

**Задание 1. «Затаившийся, инертный и чужой, но лучистый, солнечный и новый».**

О том, что воздух представляет собой смесь газов, ученые стали догадываться во второй половине XVIII века. В 1754 году шотландский ученый Джозеф Блэк экспериментально доказал, что воздух представляет собой смесь газов, а не однородную субстанцию. Вот как описал его эксперименты другой шотландский химик нобелевский лауреат Уильям Рамзай в своей статье «История химии», (1920 г). «В старые годы казалось каким-то чудом, что воздух может быть в большом количестве выделен из камня. Только с открытием Блэка **«фиксируемого»** воздуха было обращено внимание на то, что газ может быть получен из твердого тела... Получив мягкую магнезию осаждением из горькой соли с поташом [реакция 1], Блэк нашел, что она «быстро растворяется с бурным выделением воздуха кислотами купороса [2], селитры [3] или обыкновенной соли [4]». Если сильно нагреть мягкую магнезию [5], то она превращается в белый порошок, растворяющийся в кислотах без выделения пузырьков. Кроме того, она при накаливании теряет около 25/48 своего веса. Чтобы снова получить улетучивающуюся часть, Блэк растворяет остаток в купоросной кислоте [6] (*при этом получается раствор горькой соли*) и снова осаждает его поташом. Полученный белый порошок «снова получает все свойства, которые он потерял при накаливании. Кроме того, он увеличился в весе на столько же, сколько он потерял при накаливании; а так как он растворяется в кислотах с выделением пузырьков, то часть его веса, без сомнения, должна быть приписана **«фиксируемому»** воздуху». Блэк сделал здесь огромный шаг вперед: он взвесил газ в связанном состоянии...».

В 1772 г. британский химик и физик Генри Кавендиш многократно пропустил воздух над раскаленным углем [7] (при этом часть воздуха превращается в **«фиксируемый»**), а полученную газовую смесь пропустил через раствор калиевой щелочи [8] (образуется поташ), получив остаток, который он назвал «удушливым» или **«испорченным»** воздухом. В том же году шведский химик Карл Шееле повторил эти эксперименты, а через 5 лет написал: «Я склонен думать, что атмосферный воздух состоит главным образом из двух видов воздуха – **«огненного»**, поддерживающего дыхание и горение, и **«испорченного (безжизненного)»**, не поддерживающего горение. Французский ученый Антуан Лоран Лавуазье, которого не без оснований считают основателем современной химии, в 1772-75 годах произвел анализ и синтез воздуха, также сделав вывод о том, что весь воздух в основном состоит из **«огненного»**, и **«безжизненного»**, в пропорциях 1/5 и 4/5 объема соответственно. Он показал, что вес металлов (в частности, олова [9] и железа [10]) при их нагревании в закрытых сосудах увеличивается за счет присоединения части воздуха. Он также показал увеличение массы при сгорании серы [11] и фосфора [12].

1. Напишите современные названия **«фиксируемого»**, **«безжизненного»** и **«огненного»** воздуха. Приведите их содержание в атмосферном воздухе в объемных процентах. Какие коэффициенты следует использовать для каждого из этих газов, чтобы пересчитать объемные проценты: а) в массовые; б) в молярные?
2. Напишите формулы и современные названия мягкой магнезии, горькой соли, поташа, кислот купороса, селитры и обыкновенной соли. Если не получается, внимательно перечитайте условие задачи.
3. Напишите уравнения реакций [1] – [12]. Массовая доля металлов в продуктах реакций [9] и [10] составляет 78,8 и 72,4 % соответственно.
4. Как в настоящее время в промышленности получают **«безжизненный»** и **«огненный»** воздух? Предложите также по 2 лабораторных способа получения этих газов.

В работе 1785 г. Кавендиш описал эксперименты, в которых ему удалось установить, что около 1 % атмосферного воздуха составляют другие газы. Он зафиксировал **«безжизненный»** воздух, пропуская через его смесь с **«огненным»** воздухом электрические разряды. Образующийся в результате реакции [13] бесцветный газ быстро превращался в бурый газ [14], для удаления которого использовался раствор гидроксида калия [15] (в этой реакции образуются две соли, одна из которых называется селитрой). Газовый остаток после этих экспериментов обладал необыкновенной химической стойкостью.

Спустя приблизительно сто лет британский ученый лорд Рэлей обнаружил, что **«безжизненный»** воздух, получаемый из воздуха, имеет несколько большую плотность, чем простое вещество, получаемое химическим путем, о чем он сообщил в журнале «Nature» в 1892 г. Откликнувшись на эту публикацию, Уильям Рамзай предположил, что **«безжизненный»** воздух содержит примесь более тяжелого газа и провел новые эксперименты. Полученный из 10 л атмосферного воздуха **«безжизненный»** воздух, он многократно пропустил над раскаленным магнием [16], получив в остатке немногим менее 100 мл нового газа. Оказалось, что этот газ тяжелее чистого **«безжизненного»** воздуха почти в полтора раза, а его молекула состоит из одного

атома. Из одноатомности молекулы следовал вывод о том, что выделено новое простое вещество. Много времени затратили Рамзай и Рэлей на изучение его реакционной способности, но в итоге пришли к выводу, что их газ совершенно недейтелен. В то время не было известно ни одного настолько неакционноспособного вещества. 7 августа 1894 г. на собрании Британской ассоциации физиков, химиков и естествоиспытателей, было сделано сообщение об открытии нового элемента. В своём докладе Рэлей утверждал, что в каждом кубическом метре воздуха присутствует около 15,28 г открытого газа (1,288 % по массе). Позднее выяснилось, что Рамзай и Рэлей держали в своих руках не одного незнакомца, а нескольких – целое новое семейство элементов. Собственно, Рамзай и предсказал их существование. Опыты с урановым минералом клевеитом в 1895 г. привели его к обнаружению на Земле элемента, который к тому времени был обнаружен только на Солнце. А уже через три года, в 1898 г Рамзай объявил об открытии еще трех новых элементов.

В 1904 г. Рэлей за исследования плотностей наиболее распространённых газов и открытие нового элемента получил Нобелевскую премию по физике, а Рамзай за открытие в атмосфере нескольких новых газов и определения их места в Периодической системе – Нобелевскую премию по химии.

5. Напишите уравнения реакций [13] – [16]. Какой основной способ фиксации «безжизненного» воздуха в настоящее время используется в промышленности (уравнение реакции с условиями проведения). Как называется этот процесс?

6. Об открытии какого элемента Рамзай и Рэлей сообщили в 1894 г.? Исходя из данных Рэлея, вычислите: а) объёмную долю этого газа в составе воздуха; б) количество атомов этого элемента в 1 м³ воздуха; в) температуру, при которой Рэлей измерял объём воздуха.

7. Какой элемент Рамзай обнаружил на Земле в 1895 г., а какие – в 1898 г.? В какую группу (номер) Рамзай предложил поместить открытые им элементы? Какое общее название имеют элементы этой группы? Соотнесите русские названия каждого из этих элементов с эпитетами, приведенными в названии этой задачи.

Наиболее реакционно-способным из газов этого семейства является простое вещество, образованное элементом X, природным источником которого служит ядерный распад ²³⁸U. Его наиболее устойчивый изотоп имеет период полураспада 3,8 суток и образуется после следующей последовательности превращений ядра урана: один альфа-распад [17], два бета-распада [18], [19], три альфа-распада [20], [21], [22]. Известно, что в ходе альфа-распада из ядра нестабильного изотопа вылетает ядро ⁴He, а в ходе бета-распада один из нейтронов в ядре превращается в протон и выбрасывает электрон.

8. Укажите название элемента X и состав ядра его наиболее устойчивого изотопа. Напишите уравнения ядерных реакций [17] – [22].

9. Вычислите, какие массы гелия и газа X образуются при распаде 1 кг ²³⁸U. Какая масса X останется после хранения образца исходной массой 12,0 г в течение 11,4 суток?

Поскольку исследование химических свойств газа X затруднено из-за его высокой радиоактивности, на сегодняшний день более всего соединений получено для элемента Y. Одним из первых таких соединений был фторид (массовая доля ω(F) = 22,45%), являющийся чрезвычайно сильным окислителем. Он легко окисляет не только сероводород [23] (до фторида серы (VI)), но и соляную кислоту [24], и даже воду [25].

10. Укажите название элемента Y, вычислите формулу упомянутого фторида, и напишите уравнения реакций [23] - [25].

Помимо всех упомянутых в задаче газов при анализе обычного воздуха можно обнаружить заметное количество еще одного компонента, содержание которого очень сильно зависит от погоды, температуры и географического положения местности, в которой был взят образец этого воздуха. В частности, при 25 °С его объёмная доля в составе воздуха может достигать 3,1 %.

11. Укажите название этого вещества. Какой воздух будет тяжелее (иметь более высокую плотность), тот, в котором много этого вещества, или тот, в котором этого вещества мало? Обоснуйте свой ответ.

Задание 2. «Химия и цивилизация»

«Страна, опередившая мир в развитии химии, также будет на первом месте в богатстве и в общем процветании».

Уильям Рамзай, лауреат Нобелевской премии по химии 1904 г.

Химия сопровождает человечество в течение всего его развития. В процессе приготовления еды древние люди, сами того не зная, задействовали множество химических реакций. Даже для того, чтобы сварить обычную похлёбку, приходилось иметь дело с реакцией горения для разведения костра, не говоря о десятках сложных процессов, которые протекают при термической обработке овощей и мяса. На этом этапе исторического развития человек освоил некоторые нужные ему закономерности, не вникая в суть происходящих процессов. Однако с объединением общин в деревни, деревень – в протогорода и их дальнейшей эволюцией в города, положившие основу первым цивилизациям, человечество начало искать возможность добывать ресурсы. В тех местах, где была медь, люди использовали бронзу; древние средиземноморские цивилизации стали повсеместно использовать бронзовые изделия, что дало название длительной исторической эпохе – Бронзовому веку.

Считается, что Бронзовому веку средиземноморских народов положил конец т.н. «бронзовый коллапс» – извержение вулкана Санторин в Эгейском море, что прервало торговое сообщение с народами, продававшими один из основных компонентов бронзы средиземноморским народам.

1. Какой металл, необходимый для производства бронзы, оказался в дефиците?

На смену бронзе искали новые сплавы, и постепенно для металлических изделий начали применять металл **X** и его сплавы. И поныне **X** используется в виде сплавов для изготовления металлоконструкций и разнообразных предметов. В природе **X** встречается не в чистом виде, а в составе различных минералов, например гематита и магнетита (содержат в своём составе оксиды **A** и **B** соответственно; массовые доли **X** в них составляют 70,00% и 72,41%).

Древние люди восстанавливали металл **X** из руд в сыродутной печи; суть процесса заключалась в смешивании руды с древесным углём, последующем поджигании смеси и продувании влажным воздухом [реакции 1–6]. В результате получали сплавы **X** с большим содержанием углерода и содержащие большое количество примесей. Со временем люди научились избавляться от примесей и регулировать содержание углерода в сплаве. Например, для избавления от кварца, который содержится практически во всех рудах, в реакционную смесь добавляли флюс в виде известняка [7]. Продуктом реакций [1] – [4] является сам **X**, а в реакциях [5] и [6] реагентами выступают простые вещества. Продукт реакции [5] принимает участие в реакциях [3] и [4].

2. Определите металл X, напишите формулы оксидов A и B и уравнения реакций [1] – [7]. Примите, что в руде содержится 64,08 масс. % X, а единственной примесью является кварц (содержание 9,00 масс. %). На основании этого найдите массовые доли A и B в составе данной руды.

3. Какие названия носят сплавы X с низким и высоким содержанием углерода? Предположите, где может находиться ближайший от Вас природный источник металла X в виде простого вещества.

Итак, человечество получило в своё распоряжение ценный металл **X**. Но на одном металле долго не проживешь: **X**ом печку не растопишь и каши на нём не сварить. Важным фактором для развития народов является эффективное топливо. Долгое время в качестве топлива человек использовал древесину. С началом Промышленной революции в XVIII веке начала бурно развиваться и металлургия. Требуемые количества топлива не могла покрыть одна лишь древесина – люди начали активно использовать каменный уголь.

Наиболее высоко ценным сортом каменного угля является антрацит (в его состав входит в основном 4 элемента). С образцом антрацита массой 15,00 г провели следующий эксперимент. Сначала его измельчили и поместили в трубку, нагрели до 110 °C и продували током азота. После этого полученный порошок остудили, достали из трубки и взвесили; его масса составила 14,46 г. Затем его положили в камеру и сожгли в избытке кислорода. В результате сгорания образовалась газовая смесь, а также негорючая зола (силикаты и оксиды) массой 0,9601 г. Газовую смесь последовательно пропустили через башню с активной медью при нагревании, трубку с оксидом фосфора(V) (масса увеличилась на 2,954 г, [8]) и известковую воду (выпало 106,3 г осадка, [9]). После проделанных процедур осталось 57,84 мл азота (н. у.).

4. Назовите 4 основных элемента, входящих в состав антрацита. В каких формах эти элементы содержатся в антраците? Напишите уравнения реакций [8], [9]. Для чего смесь вводят в реакции с активной медью?

5. Найдите влажность исходного антрацита (в масс. %). Рассчитайте элементный состав сухого антрацита (в масс. %). Рассчитайте удельную теплоту сгорания исходного антрацита (в МДж/кг). Вам потребуются теплоты образования $Q_f(\text{CO}_{2(\text{г})}) = 393,5 \text{ кДж/моль}$, $Q_f(\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}) = 285,8 \text{ кДж/моль}$ и теплота испарения воды 44,00 кДж/моль; для оценки примите $Q_f(\text{антрацита}_{(\text{тв})}) = 0 \text{ кДж/моль}$, для расчетов примите, что в результате сгорания образуются только два сложных вещества.

С развитием машиностроения возникла потребность в новых, более удобных видах топлива. В этом качестве начали применять продукты фракционной перегонки нефти. Нефть представляет собой смесь различных веществ, в первую очередь, различных углеводородов. Также в составе нефти всегда содержится некоторое количество серосодержащих соединений. После перегонки из нефтепродуктов удаляют серосодержащие соединения (проводят т.н. *обессеривание*).

6. Приведите причины, из-за которых требуется проводить обессеривание нефти и продуктов её перегонки.

Для определения общего количества серы в образце западносибирской нефти *Siberian Light* плотностью 0,836 г/мл использовали ламповый метод. Образец данной нефти объёмом 40,00 мл внесли в мерную колбу на 100,0 мл и довели до метки при помощи *n*-гептана (для разбавления). Аликвоту объёмом 25,00 мл из мерной колбы внесли в специальную лампу для сжигания в смеси, состоящей из 70% углекислого газа и 30% кислорода. Поток продуктов после сжигания направляют в раствор перекиси водорода [10]. К образовавшемуся в ходе реакции раствору добавляют избыток раствора хлорида бария [11], образовавшийся осадок, нерастворимый в кислотах и щелочах, собирают на беззольном фильтре, который далее сжигают в муфельной печи. Масса сухого остатка после сжигания в печи оказалась равной 0,2554 г.

7. Напишите уравнения реакций [10] и [11]. По результатам гравиметрического анализа рассчитайте массовое содержание серы (%) в данном образце нефти *Siberian Light*.

Также, с развитием гражданской и военной авиации возникла потребность в легких и прочных конструкционных материалах. Подавляющее большинство таких материалов находит в своем составе металл **М**, впервые полученный в 1825 г. датским физиком Гансом Эрстедом. Для этого он пропускал хлор через расплавленную смесь глинозёма с углём [12], а полученную соль **С** нагревал с амальгамой калия [13]. При действии избытка нашатырного спирта на раствор 3,23 г **С** в воде выпадает студенистый осадок [14], при прокаливании которого [15] образуется белый оксид (основной компонент глинозёма с массовой долей **М** 52,94%) массой 1,234 г.

8. Определите металл **М**. Напишите уравнения реакций [12] - [15] и формулу соли **С**. Что такое амальгама?

Часто применяемым в авиационной отрасли является *сплав 2024*, состоящий из четырех металлов. Навеска порошка данного сплава массой 10,00 г без остатка растворяется в избытке концентрированной азотной кислоты при нагревании [16] - [19]. Далее к полученному раствору с осторожностью добавили избыток раствора гидроксида натрия, в результате чего образовались окрашенный осадок [20] - [22] и бесцветный раствор [23], [24]. Через бесцветный раствор долго пропускали углекислый газ, при этом из раствора выпал студенистый осадок [25], [26], при прокаливании которого образуется белый оксид [15] массой 17,89 г. Полученный ранее отфильтрованный окрашенный осадок растворили в азотной кислоте, а затем пропустили через образовавшийся голубой раствор избыток сероводорода [27], в результате образовались бесцветный раствор и черный осадок массой 0,5715 г. Полученный бесцветный раствор избавили от сероводорода кипячением, после чего добавили к нему избыток $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ и длительно нагревали [28]. К образовавшемуся в результате окисления фиолетовому раствору добавили избыток едкого натра [22], [23], [29], в результате выпал белый осадок, который после прокаливании образует белый оксид (массовое содержание кислорода равно 40,00%) массой 0,2000 г.

9. Напишите символы элементов, из которых состоит *сплав 2024*. Два металла, входящих в состав сплава, имеют похожие названия. Напишите уравнения реакций [16] - [29]. Определите массовое содержание всех элементов (%) входящих в состав данного сплава. Реакции [23], [26], [29] являются реакциями нейтрализации.

10. В XX веке человечество получило в своё распоряжение новое, экологически чистое, но достаточно опасное топливо. Какой элемент является основой данного топлива?

Задание 3. «Лактоза».

Первым продуктом питания в жизни ребенка является молоко. В молоке содержатся белки, жиры и углеводы, которые позволяют организму человека полноценно развиваться без существенной нагрузки на пищеварительную систему. Одним из ключевых питательных веществ в молоке является углевод лактоза, содержание которого в молоке млекопитающих может достигать до 8 масс. %.

1. Установите брутто-формулу лактозы, если известно, что теплота сгорания 1 моля лактозы составляет 1345 ккал, а $1 \text{ г} - 16,5 \text{ кДж}$. Дополнительно известно, что суммарное количество атомов в 1 моле лактозы составляет $2,71 \cdot 10^{25}$. Ответ подтвердите расчетом.

Справочная информация: 1 калория = 4,2 Дж, общая формула углеводов – $\text{C}_x(\text{H}_2\text{O})_y$

2. Напишите уравнение реакции сгорания лактозы [1].

3. Вычислите количество теплоты (в кДж), которое выделится при сгорании всей лактозы, содержащейся в 1 литре молока. Плотность молока примите равной 1,03 г/мл, а содержание лактозы в молоке – 4 масс. %.

Под энергетической ценностью (калорийностью) принято понимать количество теплоты, которое выделяется при сгорании питательных веществ – белков, жиров и углеводов, содержащихся в продукте питания. Как правило, энергетическую ценность устанавливают путем сжигания продукта в калориметре и приводят выделившееся количество энергии в килокалориях на 100 г продукта.

4. Вычислите, какая доля (в %) от энергетической ценности молока приходится на лактозу, если калорийность молока составляет 54 ккал/100 г.

Несмотря на важную функцию, осуществляемую молоком в первые месяцы жизни человека, в последующем у многих людей могут возникать проблемы пищеварительного тракта, ассоциированные с непереносимостью лактозы. Непереносимость лактозы связана с недостаточной выработкой в организме фермента, который в процессе гидролиза лактозы выступает катализатором.

5. Напишите определения терминов «гидролиз» и «катализатор».

Непосредственно сама лактоза не способна всасываться в кровь ввиду непроницаемости кишечной стенки для такого типа молекул. В результате гидролиза лактоза расщепляется на две молекулы с одинаковым химическим составом, но разной структурой.

6. Напишите уравнение реакции гидролиза лактозы, представив вещества в виде брутто-формул, если известно, что лактоза и вода вступают в реакцию в соотношении 1:1 [2].

Гидролиз лактозы является многоступенчатым процессом, в котором помимо воды и лактозы участвует фермент. Для описания скорости гидролиза лактозы можно воспользоваться простейшей схемой ферментативной реакции, которая впервые была опубликована в 1913 г. Согласно данной схеме, для вычисления начальной скорости реакции с участием фермента используется следующее уравнение:

$$V = k_2[\Phi]_0[L]_0/([L]_0 + K_M),$$

где $[\Phi]_0$ – начальная концентрация фермента, $[L]_0$ – начальная концентрация лактозы, k_2 и K_M – константы.

7. Воспользовавшись уравнением, вычислите начальную скорость гидролиза лактозы в организме человека с непереносимостью лактозы, который выпил 200 мл молока. При вычислениях плотность молока примите равной 1,03 г/мл, содержание лактозы в молоке – 2 масс. %, $[\Phi]_0 = 4 \cdot 10^{-9}$ моль/л, $k_2 = 1,0097 \text{ с}^{-1}$, $K_M = 0,0024$ моль/л. Объем реакционной среды примите равным объему употребленного молока.

Один из способов улучшения качества жизни человека с непереносимостью лактозы – употребление фермента, катализирующего гидролиз лактозы, одновременно с молочными продуктами. В Российской Федерации можно приобрести БАД «Лактазар», одна капсула которого содержит 0,0585 г фермента. По заявлениям производителя, употребление одной капсулы «Лактазара», позволяет достичь нормального уровня фермента в пищеварительной системе человека.

8. Вычислите начальную скорость гидролиза лактозы в организме того же человека с непереносимостью лактозы, употребившего 1 капсулу «Лактазара» одновременно с тем же стаканом молока объемом 200 мл. При вычислениях примите $M(\Phi) = 320$ кг/моль.

В составе фермента, катализирующего гидролиз лактозы, присутствуют атомы металлов **A** и **B**. Примечательно, что атомные массы единственного стабильного изотопа металла **A** и самого распространенного изотопа металла **B** отличаются на единицу, также как и их степени окисления в составе образуемых ими соединений отличаются на единицу.

9. Установите металлы **A** и **B**, если известно, что массовая доля **B** в составе его оксида составляет 60 %.

Основным способом получения металлов **A** и **B** является электролиз расплавов их хлоридов [3], [4].

10. Что такое электролиз? Напишите уравнения реакций, протекающих при электролизе расплавов хлоридов металлов **A** и **B** [3], [4].

11. Напишите уравнения реакции взаимодействия металлов **A** и **B** с кислородом [5], [6], раствором соляной кислоты [7], [8] и раствором натриевой щелочи при нагревании [9], [10]. Укажите цвета окрашивания пламени, наблюдаемые в реакциях [5] и [6].