

Приводятся примеры приложений неравенств к выводу молекулярных формул соединений и формулированию химических закономерностей в виде теорем.

В учебниках, справочниках и журнальных статьях нередко встречаются задачи на вывод формул соединений, причем в их условиях оказывается данных больше, чем это необходимо для нахождения ответа. В таких случаях избыточную информацию можно исключить и, в частности, применяя неравенства получить однозначный результат.

Продемонстрируем сказанное возможными вариантами рассматриваемых ниже решений.

При этом для сокращения текста будем пользоваться леммой: Для индексов x и y молекулярной формулы C_xH_y любого углеводорода справедливо неравенство

$$y \leq 2x + 2. \quad (*)$$

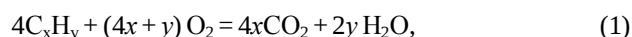
Действительно, для индексов молекулярной формулы C_xH_y или $C_xH_{2x+2+(y-2x-2)}$ не может быть $y - 2x - 2 > 0$, поскольку в насыщенной структуре соответствующей формуле алкана C_xH_{2x+2} , дополнительным $y - 2x - 2$ атомам водорода места нет. Следовательно, $y - 2x - 2 \leq 0$ или $y \leq 2x + 2$.

Задача 1. Смешали газообразный углеводород объемом 40 мл с кислородом объемом 200 мл, который взят в избытке и подожгли. После приведения полученной смеси газов к первоначальным условиям (вода конденсируется) объем их составил 140 мл, из которых 80 мл поглощено щелочью при пропускании через нее газов. Установите формулу углеводорода [1, с. 38].

Решение первое.

Исключим из условия информацию о том, что кислород был взят в избытке.

Так как в результате реакции образовалось 80 мл CO_2 , а остаток составил $140 - 80 = 60$ (мл), то углеводород в избытке быть не мог, ибо $40 < 60$. Значит, в избытке был кислород, прореагировавший объем которого составил $200 - 60 = 140$ (мл). Обозначив формулу неизвестного углеводорода как C_xH_y и записав уравнение реакции



на основании следствия из закона Авогадро, получим систему: $4/40 = 4x/80$ и $(4x + y)/140 = 4/40$, из которой находим: $x = 2$, $y = 6$ и C_2H_6 или $H_3C - CH_3$ – формула углеводорода (этан).

Решение второе. Исключим из условия данное «40 мл».

Поскольку объем не прореагировавшего кислорода равен $140 - 80 = 60$ (мл), объем прореагировавшего кислорода $200 - 60 = 140$ (мл), а образовавшегося углекислого газа 80 мл, то, записав формулу углеводорода как C_xH_y на основании уравнения (1) и следствия из закона Авогадро, получим уравнение $(4x + y)/140 = 4x/80$, из которого находим $y = 3x$. Но для любого углеводорода C_xH_y справедливо неравенство (*) $y \leq 2x + 2$, поэтому $3x \leq 2x + 2$ или $x \leq 2$. Однако x не может равняться 1, так как не существует углеводорода формула которого CH_3 . Значит, $x = 2$, $y = 6$ и C_2H_6 или $H_3C - CH_3$ – формула углеводорода.

Решение третье. Исключим из условия информацию о том, что кислород был взят в избытке и данное «40 мл», т.е. решим задачу:

Смешали газообразный углеводород с 200 мл кислорода и подожгли. После окончания реакции и приведения полученной смеси газов к первоначальным условиям (вода конденсируется) объем их составил 140 мл, из которых 80 мл поглощено щелочью при пропускании через нее газов. Установите формулу углеводорода.

Так как в результате реакции образовалось 80 мл CO_2 , а остаток составил $140 - 80 = 60$ (мл), то либо кислород, либо углеводород был взят в избытке. Предположим, что в избытке был неизвестный углеводород. Тогда бы 80 мл CO_2 образовалось в результате реакции углеводорода C_xH_y с 200 мл кислорода и на основании уравнения реакции (1) можно записать пропорцию $(4x + y)/200 = 4x/80$, из которой получаем $y = 6x$. Но из неравенства (*) $y \leq 2x + 2$ имеем $6x \leq 2x + 2$ или $x \leq 1/2$. Но это неравенство не имеет решений во множестве натуральных чисел. Следовательно, не существует углеводорода который мог бы быть в избытке. Значит, в избытке был кислород. Поэтому на основании уравнения реакции (1) имеем пропорцию $(4x + y)/(200 - 60) = 4x/80$, т.е. $y = 3x$. Теперь, как и во втором решении, приходим к выводу, что $x = 2$, $y = 6$ и C_2H_6 или $H_3C - CH_3$ – формула углеводорода.

Задача 2. Этиленовые углеводороды широко используются в промышленности для синтеза полимеров. Этиленовый углеводород объемом 30 мл смешали с кислородом объемом 120 мл, взятым в избытке, и подожгли. После приведения смеси газов к первоначальным условиям (вода конденсируется) объем их составил 90 мл, а после поглощения смеси газов раствором щелочи объем газов составил 30 мл. Выведите формулу этиленового углеводорода [1, с. 38-39].

Решение первое. Исключим из условия этой задачи данное «120 мл» и информацию «после поглощения смеси газов раствором щелочи объем газов составил 30 мл», тем более, что это условие сформулировано некорректно

Запишем формулу этиленового углеводорода в виде C_xH_{2x} и неполное уравнение реакции $C_xH_{2x} \rightarrow xCO_2$. Обозначим через a мл объем углекислого газа, образованного в результате полного сгорания 30 мл этиленового углеводорода. Тогда на основании следствия из закона Авогадро можно написать соотношение $(x/1) = (a/30) < 90/30$ ($a < 90$, поскольку в 90 мл входят и углекислый газ, и избыток кислорода). Значит, $x < 3$ или $x \leq 2$, так как x – целое положительное число. Но $x \geq 2$, ибо неизвестный углеводород – этиленовый. Поэтому $x = 2$ и C_2H_4 или $H_2C = CH_2$ – формула углеводорода

Решение второе. Исключим из условия всю информацию кроме той, что этиленовый углеводород объемом 30 мл полностью сгорает в 120 мл кислорода, взятого в избытке. Записав уравнение реакции $2C_xH_{2x} + 3xO_2 \rightarrow 2xCO_2 + 2xH_2O$ и обозначив через b мл объем кислорода, нужного для сгорания 30 мл углеводорода на основании следствия из закона Авогадро имеем соотношение $(3x/2) = (b/30) < 120/30$ ($b < 120$, так как в 120 мл входит и избыток кислорода), из которого следует, что $3x < 8$. Но $x \geq 2$, так как углеводород этиленовый и $x < 8/3$, т.е. натуральное число $x \leq 2$. Значит $x = 2$ и $H_2C = CH_2$ – формула углеводорода

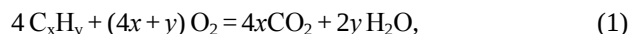
Решение третье. Исключим из условия информацию «объемом 120 мл, взятым в избытке». Тогда, учитывая, что при пропускании смеси газов через раствор щелочи остаток составил 30 мл и углеводород был взят в объеме 30 мл, то в избытке он не мог оказаться. Следовательно в избытке был кислород.

Так как объем образовавшегося в результате реакции оксида углерода (IV) составил $90 - 30 = 60$ (мл), то, записав формулу этиленового углеводорода в виде C_xH_{2x} и неполное уравнение реакции $C_xH_{2x} \rightarrow xCO_2$, на основании пропорции $(1/30) = (x/60)$ находим $x = 2$ и C_2H_4 или $H_2C = CH_2$ – формула углеводорода

Решение четвертое. Исключим из условия слова “взятым в избытке” и “объем их составил 90 мл”. Тогда, как и в третьем решении приходим к выводу, что в избытке был кислород, в 120 мл которого полностью сгорает 30 мл этиленового углеводорода. Теперь на основании второго решения вновь приходим к выводу, что $H_2C = CH_2$ – формула углеводорода

Решение пятое. Отсекая лишнюю неколичественную информацию, переформулируем задачу: Смешали углеводородом объемом 30 мл с кислородом объемом 120 мл и подожгли. После окончания реакции и приведения смеси газов к первоначальным условиям (вода конденсируется) объем их составил 90 мл, а после её пропускания через раствор щелочи объем уменьшился до 30 мл. Назовите углеводород о котором идет речь.

Учитывая, что при пропускании смеси газов через раствор щелочи остаток составил 30 мл и углеводород был взят в объеме 30 мл, то в избытке он не мог оказаться. Следовательно в избытке был кислород. Значит, объем прореагировавшего кислорода равен $120 - 30 = 90$ (мл), а объем образовавшегося в результате реакции углекислого газа составляет $90 - 30 = 60$ (мл). Теперь обозначив формулу неизвестного углеводорода как C_xH_y и записав уравнение реакции



на основании следствия из закона Авогадро, получим систему: $4/30 = 4x/60$ и $(4x + y)/90 = 4/30$, из которой находим: $x = 2$, $y = 4$ и C_2H_4 или $H_2C = CH_2$ – формула углеводорода (этилен).

Задача 3. Смесь 5 мл газообразного углеводорода с 12 мл кислорода поместили в эвдиометр и взорвали. После приведения условий к первоначальному объем газовой смеси составил 7 мл, а после её пропускания через раствор щелочи уменьшился до 2 мл, причем оставшийся газ поддерживал горение. Определите формулу углеводорода [2, с. 138].

Решение первое. Исключим из условия количественное данное «12 мл» и сведения о том, что «оставшийся газ поддерживал горение». Поскольку после пропускания смеси газов через раствор щелочи объем уменьшился до 2 мл, то один из газов был взят в избытке. Предположим, что в избытке был неизвестный углеводород формулу которого обозначим как C_xH_y (x и y – натуральные числа) и запишем неполное уравнение реакции $C_xH_y \rightarrow xCO_2$. Тогда объем прореагировавшего углеводорода будет $5 - 2 = 3$ (мл) и на основании уравнения реакции и следствия из закона Авогадро имеем пропорцию $(1/3) = x/(7 - 2)$, т.е. $x = 5/3$, а это противоречит тому, что x – натуральное число. Следовательно в избытке был кислород, поэтому имеем пропорцию $(1/5) = x/(7 - 2)$, т.е. $x = 1$ и CH_4 – формула углеводорода (метан). (В соответствии со строением углеводородов с одним атомом углерода соединяются четыре атома водорода).

Решение второе. Удалим из условия количественное данное «5 мл» и сведения о том, что «оставшийся газ поддерживал горение». Так как после пропускания смеси газов через раствор щелочи объем уменьшился до 2 мл, то один из газов был взят в избытке. Если в избытке был углеводород C_xH_y , то записав уравнение реакции (1) получим пропорцию $(4x + y)/12 = 4x/(7 - 2)$, из которой находим $y = (28/5)x$. Теперь из неравенства (*) $y \leq 2x + 2$ имеем $(28/5)x \leq 2x + 2$, т.е. $x \leq 5/9$. Следовательно такого углеводорода нет. Значит, в избытке был кислород. Из уравнения реакции имеем пропорцию $(4x + y)/(12 - 2) = (4x - 2)$, т.е. $y = 4x$. Но для любого углеводорода C_xH_y справедливо неравенство (*) $y \leq 2x + 2$ и потому $4x \leq 2x + 2$ или $x \leq 1$, т.е. $x = 1$, $y = 4$ и CH_4 – формула углеводорода

Решение третье. Исключим информацию «12 мл» и «до 2 мл». Поскольку оставшийся газ поддерживал горение, то кислород был взят в избытке. Если принять объем CO_2 , образовавшегося в результате полного сгорания 5 мл C_xH_y , равным a мл, то на основании уравнения реакции (1) можно записать пропорцию $4x/4 = a/5 < 7/5$ ($a < 7$, поскольку в 7 мл входят и углекислый газ, и избыток кислорода). Значит, $x < 7/5$, а это неравенство имеет единственное решение в целых положительных числах: $x = 1$ и CH_4 – формула углеводорода

Решение четвертое. Исключим из условия информацию о том, что объем газовой смеси составил 7 мл и после её пропускания через раствор щелочи уменьшился до 2 мл. Иными словами, найдем формулу углеводорода 5 мл которого сгорают в 12 мл кислорода, взятого в избытке.

Обозначим через c мл объем кислорода, нужного для сгорания 5 мл углеводорода C_xH_y . Теперь на основании уравнения реакции (1) и следствия из закона Авогадро, запишем соотношение $(4x + y)/4 = c/5 < 12/5$ ($c < 12$, так как в 12 мл входит и избыток кислорода) или $(4x + y)/4 < 12/5$, из которого $20x + 5y < 48$. Поскольку в молекуле любого углеводорода число атомов водорода четное $y \geq 2$. Подставляя в последнее неравенство вместо y его наименьшее значение, равное 2, получим $20x < 38$, а это неравенство имеет в натуральных числах единственное решение $x = 1$ и мы снова приходим к выводу, что CH_4 – формула углеводорода

Решение пятое. Исключим из условия слова «а после её пропускания через раствор щелочи уменьшился до 2 мл, причем оставшийся газ поддерживал горение». Поскольку объем газовой смеси (CO_2 и одного из исходных газов) составил 7 мл, то в этот объем входил и избыток v мл одного из исходных газов. Если в избытке был углеводород C_xH_y , то записав уравнение реакции (1) получим систему $4/(5 - v) = 4x/(7 - v)$ и

$4/(5 - v) = (4x + y)/12$, из первого уравнения которой имеем $v = (5x - 7)/(x - 1)$. Подставив найденное значение v во второе уравнение системы, находим $y = 20x - 24$, причем $x \geq 2$, так как при $x = 1$ y не является натуральным числом. Но для любого углеводорода C_xH_y справедливо неравенство (*) $y \leq 2x + 2$ и потому $20x - 24 \leq 2x + 2$ или $x \leq 13/9$, т.е. $x = 1$, что противоречит полученному выше условию $x \geq 2$.

Значит, не существует углеводород который может быть в избытке. Итак, в избытке был кислород и на основании уравнения реакции (1) имеем соотношение $4/5 = 4x/(7 - v) > 4x/7$ т.е. $x < 7/5$, а это неравенство имеет единственное решение в целых положительных числах: $x = 1$ и потому CH_4 – формула углеводорода

Задача 4. К 300 мл смеси некоторого углеводорода с аммиаком добавили избыток кислорода и подожгли. После полного сгорания газов исследуемой смеси объем вновь полученной смеси составил 1250 мл. После конденсации паров воды он сократился до 550 мл, после обработки щелочью – до 250 мл, из которых 100 мл приходилось на долю азота. Объемы всех газов измерялись при одинаковых условиях. Установите формулу углеводорода [3, с. 43-44].

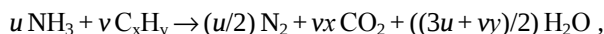
Решение первое. Заменим первое предложение из условия этой задачи таким «К смеси некоторого углеводорода с аммиаком добавили кислород и подожгли», а остальной текст оставим без изменения. Так как после полного сгорания газов исследуемой смеси 100 мл приходилось на долю азота, то кислород, он был взят в избытке: $250 - 100 = 150$ (мл). Смесь, образовавшаяся после полного сгорания газов, содержит: $1250 - 550 = 700$ (мл) паров H_2O , $550 - 250 = 300$ (мл) CO_2 , и 100 мл N_2 . Теперь запишем формулу углеводорода в виде C_xH_y и уравнения реакций горения аммиака и углеводорода $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ и $2\text{C}_x\text{H}_y \rightarrow 2x\text{CO}_2 + y\text{H}_2\text{O}$. Из первого уравнения следует, что при образовании 100 мл N_2 получается 300 мл паров H_2O . Следовательно, при сгорании углеводорода образуется $700 - 300 = 400$ (мл) паров H_2O . Поэтому из второго уравнения следует, что $2x/300 = y/400$, т.е. $y = (8/3)x$, причем $x \geq 3$, так как y – число натуральное. Но для любого углеводорода C_xH_y справедливо неравенство (*) $y \leq 2x + 2$ и потому $(8/3)x \leq 2x + 2$ или $x \leq 3$. Значит, $x = 3$, $y = 8$ и C_3H_8 – формула углеводорода (пропан).

Решение второе. Сначала переформулируем условие: К 300 мл смеси некоторого углеводорода с аммиаком добавили кислород и подожгли. После полного сгорания газов исследуемой смеси объем вновь полученной смеси составил 1250 мл. После конденсации паров воды он сократился до 550 мл, после обработки щелочью – до 250 мл, 100 мл из которых приходилось на долю некоторого газа. Объемы всех газов измерены при одинаковых условиях. Установите формулу углеводорода

В конечных продуктах содержится азот и кислород. Предположим, что 150 мл ($250 - 100$) составляет азот. Тогда из неполного уравнения реакции $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ следует, что для образования 150 мл азота необходимо 300 мл аммиака, а это невозможно, так как объем всей смеси равен 300 мл. Следовательно, 150 мл приходится на долю кислорода, который и был взят в избытке. Значит, на долю азота приходится 100 мл, при образовании которых, как следует из уравнения реакции, получается 300 мл паров H_2O . Значит, при сгорании углеводорода образуется $700 - 300 = 400$ (мл) паров воды. Поэтому, с учетом того, что объем CO_2 равен 300 мл, из уравнения $2\text{C}_x\text{H}_y \rightarrow 2x\text{CO}_2 + y\text{H}_2\text{O}$ получаем пропорцию $2x/300 = y/400$, т.е. $x : y = 3 : 8$. Уже отсюда следует, что C_3H_8 – формула углеводорода (пропан).

Решение третье. Исключим информацию об объеме смеси, равном 300 мл и воспользуемся общим уравнением реакции горения, которое с точки зрения системного подхода (анализа) больше соответствует реальному химическому процессу.

Пусть сгорают u моль NH_3 и v моль C_xH_y , тогда общее (неполное) уравнение реакции горения смеси можно записать в виде:



Как показано выше, смесь, образовавшаяся после полного сгорания газов, содержит:

700 мл паров воды, 300 мл углекислого газа, 100 мл азота и потому коэффициенты перед N_2 и CO_2 относятся как 100 : 300, т.е. $u/(2vx) = 100/300$ или $x = 3u/(2v)$, а коэффициенты перед N_2 и H_2O относятся как 100 : 700, т.е. $u/(3u + vy) = 100/700$ или $y = 4u/v$. Значит, $x : y = 3 : 8$ и C_3H_8 – формула углеводорода (пропан).

Задача 5. При сжигании 6,45 г газообразного галогеналкана образовалось 4,48 л углекислого газа и 22,4 л хлороводорода (н.у.); плотность неизвестного вещества при н.у. равна 2,879 г/л. Выведите молекулярную формулу вещества [4, с. 4].

Исключим из условия всю информацию, кроме той, что плотность газообразного галогеналкана при н.у. равна 2,879 г/л, да и ту округлим до трех значащих цифр: 2,88 г/л. Отсюда, с точностью до трёх значащих цифр, относительная молекулярная масса галогеналкана $M_r = 2,88 \cdot 22,4 = 64,5$. Теперь очевидно, что ни бром, ни иод, ни астат не удовлетворяют значению $M_r = 64,5$, так как относительная атомная масса каждого из них (80; 127 и 210 соответственно) больше M_r всего галогеналкана. Фтор также не подходит, поскольку его относительная атомная масса с точностью до трёх значащих цифр равна 19,0. Остается хлор, относительная атомная масса которого 35,5 (кстати, это очевидно, поскольку $M_r = 64,5$).

Теперь ясно, что молекула галогеналкана содержит один атом хлора, а на остаток, равный 29, приходится два атома углерода и пять атомов водорода (проверка: $5 + 1 = 2 \cdot 2 + 2$) и $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ – молекулярная формула вещества. Возможны и другие варианты.

Однако неравенства могут применяться не только как средство решения задач, но и, что ещё важнее, как способ формулирования химических закономерностей, например в форме теорем. Итак,

Теорема 1. Углеводород – алкан, тогда и только тогда, когда массовая доля углерода в углеводороде меньше массовой доли ($\approx 85,7\%$) углерода в этилене.

Теорема 2. Для того, чтобы углеводород был алканом, необходимо и достаточно, чтобы массовая доля водорода в углеводороде была бы больше массовой доли водорода в этилене. Их обоснования приведены в [5].

Задача 6. При сжигании 4,5 г органического вещества получили 13,2 г оксида углерода (IV) и 6,1 г воды. 1 л исходного вещества имеет массу 1,34 г. Какова молекулярная формула вещества? [6, с. 40].

Без ущерба для дела опустим сведение о том, что 1 л исходного вещества имеет массу 1,34 г, тем более, что в задаче не указано при каких условиях определялась масса. Тогда на основании сохранённой информации выведем простейшую формулу. Так как 44 г CO_2 содержат 12 г углерода, то в 13,2 г его $(12/44) \cdot 13,2 = 3,6$ г. Аналогично в 8,1 г H_2O содержится $(2/18) \cdot 8,1 = 0,9$ г водорода. Сумма масс углерода и водорода будет $3,6 + 0,9 = 4,5$ г. Значит, вещество не содержит кислород, т.е. оно – углеводород, массовая доля углерода в котором $3,6/4,5 = 0,8$ или 80 %. По теореме 1 углеводород – алкан, так как $80\% < 85,7\%$, поэтому его формула имеет вид $\text{C}_x\text{H}_{2x+2}$. Теперь из уравнения $(12x + 2x + 2) \cdot 0,8 = 12x$ находим $x = 2$, значит C_2H_6 – молекулярная формула вещества.

В заключение подчеркнем, что, удаляя лишнее из условий задач, мы получаем более совершенные их формулировки и решения. Говорят, что знаменитый скульптор Роден на вопрос, как ему удается делать свои замечательные статуи, ответил: «Я беру глыбу мрамора и отсекаю от нее всё лишнее». Пожалуй, и не будет более подходящего случая, чтобы вспомнить эти слова, решая химические задачи.

Библиографический список

1. Ерыгин Д.П. Задачи и примеры по химии с межпредметным содержанием / Д.П. Ерыгин, А.К. Грабовый. — М.: Высш. шк., 1989. — 176 с.
2. Кузьменко Н.Е. Начала химии. Современный курс для поступающих в вузы / Н.Е. Кузьменко, В.В. Еремин, В.А. Попков — Т. 2. — М.: ЭКЗАМЕН, 2004. — 384 с.
3. Адамович Т.П. Сборник упражнений и усложненных задач с решениями по химии / Т.П. Адамович, Г.И. Васильева, Г.А. Попкович, А.Р. Улазова — Минск: Вышэйш. шк., 1973. — 240 с.
4. Маршанова Г.Л. Сборник задач по органической химии. 10 – 11 классы / Г.Л. Маршанова. — М.: Издат-школа, 2000. — 80 с.
5. Хрусталева А.Ф. Теоремы математической химии / А.Ф. Хрусталева // Вестн. СевГТУ. Сер. Физика и математика: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 43. — С. 96–100.
6. Егоров А.С. Все типы расчётных задач по химии для подготовки к ЕГЭ. Изд. 2 – е / А.С. Егоров. — Ростов н/Д: Феникс, 2004. — 320 с.

Поступила в редакцию 18.04.2005 г.