
Моль. Количество вещества эквивалента (эквивалент) и молярная масса эквивалента (эквивалентная масса) простых и сложных веществ. Закон эквивалентов

С 1 января 1963 г. в СССР введена Международная система единиц измерения (СИ), состоящая из шести основных единиц: метр (м) — длина, килограмм (кг) — масса, секунда (с) — время, ампер (А) — сила тока, кельвин (К) — термодинамическая температура, кандела (кд) — сила света. XIV Генеральная конференция по мерам и весам (1971) утвердила в качестве седьмой основной единицы Международной системы моль (моль)-единицу количества вещества. *Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.* При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц. Моль вещества соответствует постоянной Авогадро $N_A = (6,022045 \pm 0,000031) \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ структурных элементов. При применении понятия «моль» следует указывать, какие структурные элементы имеются в виду, например, моль атомов Н, моль молекул Н₂, моль протонов, моль электронов и т.п. Так, заряд моля электронов равен $6,022 \cdot 10^{23} e^-$ и отвечает количеству электричества, равному 1 фарадею (F). Масса моля атомов или масса моля молекул (молярная масса), выраженная в граммах (г/моль), есть грамм-атом данного элемента или

соответственно грамм–молекула данного вещества в прежнем понимании.

Пример 1. Выразите в молях: а) $6,02 \cdot 10^{21}$ молекул CO_2 ; б) $1,20 \cdot 10^{24}$ атомов кислорода; в) $2,00 \cdot 10^{23}$ молекул воды. Чему равна молярная масса указанных веществ?

Решение. Моль — это количество вещества, в котором содержится число частиц любого определенного сорта, равное постоянной Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$). Отсюда а) $6,02 \cdot 10^{21}$, т.е. 0,01 моль; б) $1,20 \cdot 10^{24}$, т.е. 2 моль; в) $2,00 \cdot 10^{23}$, т.е. $\frac{1}{3}$ моль.

Масса моля вещества выражается в кг/моль или г/моль. Молярная масса вещества в граммах численно равна его относительной молекулярной (атомной) массе, выраженной в атомных единицах массы (а.е.м).

Так как молекулярные массы CO_2 и H_2O и атомная масса кислорода соответственно равны 44; 18 и 16 а.е.м., то их молярные массы равны: а) 44 г/моль; б) 18 г/моль; в) 16 г/моль.

Пример 2. Определите эквивалент (\mathcal{E}) и молярную массу эквивалента $m_{\mathcal{E}}$ азота, серы и хлора в соединениях NH_3 , H_2S и HCl .

Решение. Масса вещества и количество вещества — понятия неидентичные. Масса выражается в килограммах (граммах), а количество вещества — в молях.

Эквивалент элемента (\mathcal{E}) — это такое количество вещества, которое соединяется с 1 моль атомов водорода или замещает то же количество атомов водорода в химических реакциях. Масса эквивалента элемента называется молярной массой эквивалента ($m_{\mathcal{E}}$). Таким образом, эквиваленты (количество вещества эквивалента) выражаются в молях, а молярная масса эквивалента — в г/моль.

В данных соединениях с 1 моль атомов водорода соединяется $\frac{1}{3}$ моль азота, $\frac{1}{2}$ моль серы и 1 моль хлора. Отсюда $\mathcal{E}(\text{N}) = \frac{1}{3}$ моль, $\mathcal{E}(\text{S}) = \frac{1}{2}$ моль, $\mathcal{E}(\text{Cl}) = 1$ моль.

Исходя из молярных масс этих элементов, определяем их молярные массы эквивалентов: $m_{\mathcal{E}(\text{N})} = \frac{1}{3} \cdot 14 = 4,67$ г/моль; $m_{\mathcal{E}(\text{S})} = \frac{1}{2} \cdot 32 = 16$ г/моль, $m_{\mathcal{E}(\text{Cl})} = 1 \cdot 35,45 = 35,45$ г/моль.

Пример 3. На восстановление 7,09 г оксида двухвалентного металла требуется 2,24 л водорода (н.у.). Вычислите молярную массу эквивалента оксида и молярную массу эквивалента металла. Чему равна атомная масса металла?

Нормальные условия по Международной системе единиц (СИ): давление $1,013 \cdot 10^5$ Па (760 мм рт. ст. = 1 атм), температура 273 К или 0°C .

Решение. Согласно закону эквивалентов массы (объемы) реагирующих веществ m_1 и m_2 пропорциональны их молярным массам (объемам):

$$\frac{m_1}{m_{Э(1)}} \text{ и } \frac{m_2}{m_{Э(2)}}, \quad (1)$$

$$\frac{m_{\text{MeO}}}{m_{Э(\text{MeO})}} = \frac{m_{\text{H}_2}}{m_{Э(\text{H}_2)}}. \quad (2)$$

Если одно из веществ находится в газообразном состоянии, то, как правило, его количество измеряется в объемных единицах (см^3 , л, м^3).

Объем, занимаемый при данных условиях молярной массой эквивалента газообразного вещества, называется молярным объемом эквивалента этого вещества. Молярный объем любого газа при н.у. равен 22,4 л. Отсюда эквивалентный объем водорода $V_{mЭ(\text{H}_2)}$, молекула которого состоит из двух атомов, т.е. содержит два моля атомов водорода, равен $22,4 : 2 = 11,2$ л. В формуле (2) отношение $m_{\text{H}_2} / m_{Э(\text{H}_2)}$ заменяем равным ему отношением $V_{\text{H}_2} / V_{mЭ(\text{H}_2)}$, где V_{H_2} — объем водорода, $V_{mЭ(\text{H}_2)}$ — эквивалентный объем водорода:

$$\frac{m_{\text{MeO}}}{m_{Э(\text{MeO})}} = \frac{V_{\text{H}_2}}{V_{mЭ(\text{H}_2)}}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) находим молярную массу эквивалента оксида металла $m_{Э(\text{MeO})}$:

$$\frac{7,09}{m_{Э(\text{MeO})}} = \frac{2,24}{11,2}; \quad m_{Э(\text{MeO})} = \frac{7,09 \cdot 11,2}{2,24} = 35,45 \text{ г / моль.}$$

Согласно закону эквивалентов $m_{Э(\text{MeO})} = m_{Э(\text{Me})} + m_{Э(\text{O}_2)}$. Отсюда $m_{Э(\text{Me})} = m_{Э(\text{MeO})} - m_{Э(\text{O}_2)} = 35,45 - 8 = 27,45$ г / моль. Молярная масса металла определяется из соотношения $m_{Э} = A/B$, где $m_{Э}$ — молярная масса эквивалента, A — молярная масса металла, B — стехиометрическая валентность элемента; $A = m_{Э}B = 27,45 \cdot 2 = 54,9$ г/моль. Так как относительная атомная масса в а.е.м. численно равна относительной молярной массе, выражаемой в г/моль, то искомая масса металла равна 54,9 а.е.м.

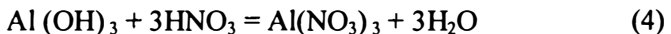
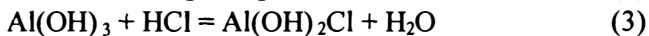
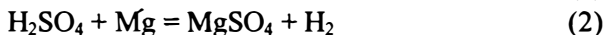
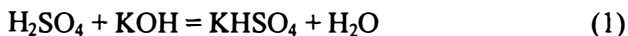
Пример 4. Сколько металла, эквивалентная масса которого 12,16 г/моль, взаимодействует с 310 см³ кислорода (н.у.)?

Решение. Так как молярная масса O₂ (32 г/моль) при н.у. занимает объем 22,4 м, то объем молярной массы эквивалента кислорода (8 г/моль) будет равен 22,4 : 4 = 5,6 = 5600 см³. По закону эквивалентов

$$\frac{M_{\text{Me}}}{m_{\text{Э(Ме)}}} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{m_{\text{Э(O}_2)}}} \quad \text{или} \quad \frac{m_{\text{Me}}}{12,16} = \frac{310}{5600},$$

откуда $m_{\text{Me}} = 12,16 \cdot 310 / 5600 = 0,673$ г.

Пример 5. Вычислите количество вещества эквивалентов и молярные массы эквивалентов H₂SO₄ и Al(OH)₃ в реакциях



Решение. Молярная масса эквивалента сложного вещества, как и молярная масса эквивалента элемента, может иметь различные значения и зависит от того, в какую реакцию обмена вступает это вещество. Молярная масса эквивалента кислоты (основания) равна молярной массе (M), деленной на число атомов водорода, замещенных в данной реакции на металл (на число вступающих в реакцию гидроксильных групп). Следовательно, эквивалентная масса H₂SO₄ в реакции (1) $M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98$ г/моль, а в реакции (2) $M_{\text{H}_2\text{SO}_4} / 2 = 49$ г/моль. Эквивалентная масса Al(OH)₃ в реакции (3) $M_{\text{Al(OH)}_3} = 78$ г/моль, а в реакции (4) $M_{\text{Al(OH)}_3} / 3 = 26$ г/моль.

Задачу можно решить и другим способом. Так как H₂SO₄ взаимодействует с одной молярной массой эквивалента KOH и двумя молярными массами эквивалента магния, то ее молярная масса эквивалента равна в реакции (1) $M/1$ г/моль и в реакции (2) $M/2$ г/моль. Al(OH)₃ взаимодействует с одной молярной массой эквивалента HCl и тремя молярными массами эквивалента HNO₃, поэтому его молярная масса эквивалента в реакции (3) равна $M/1$ г/моль, в реакции (4) $M/3$ г/моль. Количество вещества эквивалента H₂SO₄ в уравнениях (1) и (2) соответственно равны 1 моль и 1/2 моль; количество вещества эквивалента Al(OH)₃ в уравнениях (3) и (4) соответственно равны 1 моль и 1/3 моль.

Пример 6. Из 3,85 г нитрата металла получено 1,60 г его гидроксида. Вычислите молярную массу эквивалента металла ($m_{Э(Ме)}$).

Решение. При решении задачи следует иметь в виду: а) молярная масса эквивалента гидроксида равна сумме молярных масс эквивалентов металла и гидроксильной группы; б) молярная масса эквивалента соли равна сумме молярных масс эквивалентов металла и кислотного остатка. Вообще молярная масса эквивалента химического соединения равна сумме молярных масс эквивалентов составляющих его частей.

Учитывая сказанное, подставляем соответствующие данные в уравнение (1) примера 3:

$$\frac{3,85}{1,60} = \frac{m_{Э(Ме)} + m_{Э(NO_3^-)}}{m_{Э(Ме)} + m_{Э(OH^-)}}; \quad \frac{3,85}{1,60} = \frac{m_{Э(Ме)} + 62}{m_{Э(Ме)} + 17},$$

$m_{Э(Ме)} = 15$ г/моль.

Пример 7. В какой массе $Ca(OH)_2$ содержится столько же эквивалентных масс, сколько в 312 г $Al(OH)_3$?

Решение. Молярная масса эквивалента $Al(OH)_3$ равна $1/3$ его молярной массы, т.е. $78/3 = 26$ г/моль. Следовательно в 312 г $Al(OH)_3$ содержится $312/26 = 12$ эквивалентов. Молярная масса эквивалента $Ca(OH)_2$ равна $1/2$ его молярной массы, т.е. 37 г/моль. Отсюда 12 эквивалентов составляют 37 г/моль \cdot 12 моль = 444 г.

Пример 8. Вычислите абсолютную массу молекулы серной кислоты в граммах.

Решение. Моль любого вещества (см. пример 1) содержит постоянную Авогадро N_A структурных единиц (в нашем примере молекул). Молярная масса H_2SO_4 равна 98,0 г/моль. Следовательно, масса одной молекулы $98/(6,02 \cdot 10^{23}) = 1,63 \cdot 10^{-22}$ г.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определите количество вещества эквивалента и молярную массу эквивалентов фосфора, кислорода и брома в соединениях PH_3 , H_2O , HBr .

2. В какой массе $NaOH$ содержится тоже количество эквивалентов, что и в 140 г KOH . **Ответ:** 100 г.

3. Из 1,35 г оксида металла получается 3,15 г его нитрата. Вычислите молярную массу эквивалента этого металла. **Ответ:** 32,5 г/моль.

4. Из 1,3 гидроксида металла получается 2,85 г его сульфата. Вычислите молярную массу эквивалента этого металла. **Ответ:** 17 г/моль.

5. Оксид трехвалентного элемента содержит 31,58% кислорода. Вычислите молярную массу эквивалента, молярную и атомную массы этого элемента.

6. Чему равен при н.у. эквивалентный объем водорода? Вычислите молярную массу эквивалента металла, если на восстановление 1,017 г его оксида израсходовалось 0,28 л водорода (н.у.).
Ответ: 32,68 г/моль.

7. Вычислите в молях: а) $6,02 \cdot 10^{22}$ молекул C_2H_2 ; б) $1,80 \cdot 10^{24}$ атомов азота; в) $3,01 \cdot 10^{23}$ молекул NH_3 . Какова молярная масса указанных веществ?

8. Вычислите количество вещества эквивалента и молярную массу эквивалента H_3PO_4 в реакциях образования: а) гидрофосфата; б) дигидрофосфата; в) ортофосфата.

9. В 2,48 г оксида одновалентного металла содержится 1,84 г металла. Вычислите молярную массу эквивалента металла и его оксида. Чему равна молярная и относительная атомная масса этого металла?

10. Чему равен при н.у. эквивалентный объем кислорода? На сжигание 1,5 г двухвалентного металла требуется 0,69 л кислорода (н.у.) Вычислите молярную массу эквивалента, молярную массу и относительную атомную массу этого металла.

11. Из 3,31 г нитрата металла получается 2,78 г его хлорида. Вычислите молярную массу эквивалента этого металла. *Ответ:* 103,6 г/моль.

12. Напишите уравнение реакций $Fe(OH)_3$ с хлороводородной (соляной) кислотой, при которых образуются следующие соединения железа: а) хлорид дигидроксожелеза; б) дихлорид гидроксожелеза; в) трихлорид железа. Вычислите количество вещества эквивалента и молярную массу эквивалента $Fe(OH)_3$ в каждой из этих реакций.

13. Избытком гидроксида калия подействовали на растворы: а) дигидрофосфата калия; б) нитрата дигидроксовисмута (III). Напишите уравнение реакций этих веществ с КОН и определите количество вещества эквивалентов и молярные массы эквивалента.

14. В каком количестве $Cr(OH)_3$ содержится столько же эквивалентов, сколько в 174,96 г $Mg(OH)_2$? *Ответ:* 205,99 г.

15. Избытком хлороводородной (соляной) кислоты подействовали на растворы: а) гидрокарбоната кальция; б) дихлорида гидроксиалюминия. Напишите уравнения реакций этих веществ с HCl и определите количество вещества эквивалентов и молярные массы эквивалента.

16. При окислении 16,74 г двухвалентного металла образовалось 21,54 г оксида. Вычислите молярные массы эквивалента металла и его оксида. Чему равны молярная и относительная атомная массы металла? *Ответ:* 27,9 г/моль; 35,9 г/моль; 55,8 г/моль; 55,8 а.е.м.

17. При взаимодействии 3,24 г трехвалентного металла с кислотой выделяется 4,03 л водорода (н.у.). Вычислите молярную массу эквивалента, молярную и относительную атомную массы металла.

18. Исходя из молярной массы углерода и воды, определите абсолютную массу атома углерода и молекулы воды в граммах.

Ответ: $2,0 \cdot 10^{-23}$ г; $3,0 \cdot 10^{-23}$ г.

19. На нейтрализацию 9,797 г ортофосфорной кислоты израсходовано 7,998 г NaOH. Вычислите количество вещества эквивалента, молярную массу эквивалента и основность H_3PO_4 в этой реакции. На основании расчета напишите уравнение реакции.

Ответ: 0,5 моль; 49 г/моль; 2.

20. На нейтрализацию 0,943 г фосфористой кислоты H_3PO_3 израсходовано 1,291 г KOH. Вычислите количество вещества эквивалента, молярную массу эквивалента и основность кислоты. На основании расчета напишите уравнение реакции. *Ответ:* 0,5 моль; 41 г/моль; 2.