

§ 39. Понятие о выходе продукта химической реакции

На практике при проведении химических реакций обычно получается несколько меньшее количество продукта, чем рассчитанное теоретически в соответствии с уравнением реакции. Это может происходить по нескольким причинам.

Многие химические реакции обратимы, т. е. протекают не до конца. Потери веществ могут быть также обусловлены их испарением, частичным растворением (ведь абсолютно нерастворимых веществ нет), потерями при упаривании или фильтровании растворов и т. п. Немаловажное значение имеет оборудование, с помощью которого осуществляется химическая реакция. Негерметичность оборудования, в котором проходят химические процессы, всегда приводит к потерям газообразных веществ. И наконец, часть веществ может не вступить в реакцию или образовать при взаимодействии побочные продукты.

Для оценки полноты протекания процесса пользуются понятием **выход продукта химической реакции**. Оно подобно понятию «коэффициент полезного действия», которое применяется в физике для характеристики процессов преобразования и использования энергии, работы различных двигателей и механизмов.

Выход продукта химической реакции обозначается буквой греческого алфавита η (*эта*). Он представляет собой величину, равную отношению реально полученной, т. е. *практической массы вещества* ($m_{\text{практ}}$) к массе этого вещества, рассчитанной по уравнению реакции, т. е. к его *теоретической массе* ($m_{\text{теор}}$):

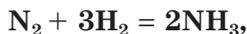
$$\eta = \frac{m_{\text{практ}}}{m_{\text{теор}}}.$$

Выход продукта химической реакции — безразмерная величина, например: $\eta(\text{CaO}) = 0,75$, или 75 %.

Поскольку масса вещества пропорциональна его химическому количеству, то выход продукта реакции можно определять и как отношение соответствующих химических количеств вещества или объемов (для газов):

$$\eta = \frac{m_{\text{практ}}}{m_{\text{теор}}}, \quad \eta = \frac{V_{\text{практ}}}{V_{\text{теор}}}.$$

Например, если известно, что в реакции синтеза аммиака



выход продукта составляет 0,75 ($\eta = 0,75$, или 75 %), то это означает, что из азота массой 28 г (объемом 22,4 дм³, химическим количеством 1 моль) мы получим аммиак массой не 34 г (объемом 44,8 дм³, химическим количеством 2 моль), а массой $34 \text{ г} \cdot 0,75 = 25,5 \text{ г}$ (объемом 33,6 дм³, химическим количеством 1,5 моль).

Таким образом, **выход продукта реакции** — это величина, равная отношению реально полученной массы (химического количества, объема) вещества к массе (химическому количеству, объему) этого вещества, рассчитанной по уравнению реакции.

Величина выхода продукта реакции не может превышать 100 %. Если выход равен 100 %, то говорят, что реакция протекает *количественно*. В этом случае

$$m_{\text{практ}} = m_{\text{теор}}; \quad n_{\text{практ}} = n_{\text{теор}}; \quad V_{\text{практ}} = V_{\text{теор}}.$$

Кроме выражения «выход продукта химической реакции», часто используют и более краткие формы этого понятия: «выход продукта», «выход реакции», «реакция протекает с 90 %-м выходом».

На практике часто приходится рассчитывать химическое количество, массу или объем продукта реакции, если его выход отличается от 100 %, или, наоборот, определять выход продукта реакции. Рассмотрим типы расчетов с использованием этого понятия.

Тип 1. Даны массы (объемы, химические количества) исходного вещества и продукта реакции. Требуется определить выход продукта реакции.

Пример. При прокаливании гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ массой 93,6 г получен оксид алюминия Al_2O_3 массой 52,02 г. Определите выход продукта реакции.

Дано:

$$m(\text{Al}(\text{OH})_3) = 93,6 \text{ г}$$

$$m_{\text{практ}}(\text{Al}_2\text{O}_3) = 52,02 \text{ г}$$

$$\eta(\text{Al}_2\text{O}_3) = ?$$

Решение

1. Определяем молярные массы гидроксида и оксида алюминия:

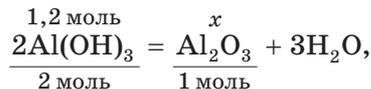
$$M(\text{Al}(\text{OH})_3) = 27 + 3 \cdot 16 + 3 \cdot 1 = 78 \text{ (г/моль)}.$$

$$M(\text{Al}_2\text{O}_3) = 2 \cdot 27 + 3 \cdot 16 = 102 \text{ (г/моль)}.$$

2. Находим химические количества гидроксида и оксида алюминия:

$$n(\text{Al}(\text{OH})_3) = \frac{93,6 \text{ г}}{78 \text{ г/моль}} = 1,2 \text{ моль}; \quad n(\text{Al}_2\text{O}_3) = \frac{52,02 \text{ г}}{102 \text{ г/моль}} = 0,51 \text{ моль}.$$

3. Записываем уравнение реакции разложения гидроксида алюминия и производим расчет теоретического химического количества (x) и теоретической массы полученного оксида алюминия:



откуда получим: $x = 0,6$ моль. Это — $n_{\text{теор}}(\text{Al}_2\text{O}_3)$.

Тогда теоретическая масса оксида алюминия составит:

$$m_{\text{теор}}(\text{Al}_2\text{O}_3) = n_{\text{теор}}(\text{Al}_2\text{O}_3) \cdot M(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0,6 \text{ моль} \cdot 102 \text{ г/моль} = 61,2 \text{ г}.$$

4. Определяем выход продукта реакции (двумя способами):

$$\text{а) } \eta(\text{Al}_2\text{O}_3) = \frac{m_{\text{практ}}(\text{Al}_2\text{O}_3)}{m_{\text{теор}}(\text{Al}_2\text{O}_3)} = \frac{52,02 \text{ г}}{61,2 \text{ г}} = 0,85, \text{ или } 85 \%.$$

$$\text{б) } \eta(\text{Al}_2\text{O}_3) = \frac{n_{\text{практ}}(\text{Al}_2\text{O}_3)}{n_{\text{теор}}(\text{Al}_2\text{O}_3)} = \frac{0,51 \text{ моль}}{0,6 \text{ моль}} = 0,85, \text{ или } 85 \%.$$

Ответ: выход продукта реакции равен 85 %.

Тип 2. Даны масса (объем, химическое количество) исходного вещества и выход продукта реакции. Требуется определить массу (объем, химическое количество) продукта реакции.

Пример. Рассчитайте массу нитрата аммония NH_4NO_3 , который может быть получен из аммиака объемом 4,48 м³ (н. у.) и необходимого количества азотной кислоты, если выход продукта составляет 90 %?

Дано:

$$V(\text{NH}_3) = 4,48 \text{ м}^3 = 4480 \text{ дм}^3$$

$$\eta(\text{NH}_4\text{NO}_3) = 90 \%$$

$$m_{\text{практ}}(\text{NH}_4\text{NO}_3) = ?$$

Решение

1. Найдем химическое количество аммиака:

$$\begin{aligned} n(\text{NH}_3) &= \frac{V(\text{NH}_3)}{V_m} = \\ &= \frac{4480 \text{ дм}^3}{22,4 \text{ дм}^3/\text{моль}} = 200 \text{ моль}. \end{aligned}$$

2. Составим уравнение реакции и рассчитаем теоретическое химическое количество NH_4NO_3 :



$$x = \frac{200 \cdot 1}{1} = 200 \text{ моль } \text{NH}_4\text{NO}_3. \text{ Это — } n_{\text{теор}}(\text{NH}_4\text{NO}_3).$$

3. Находим теоретическую массу NH_4NO_3 :

$$M(\text{NH}_4\text{NO}_3) = 2 \cdot 14 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 32 = 80 \text{ (г/моль)}.$$

$$\begin{aligned} m_{\text{теор}}(\text{NH}_4\text{NO}_3) &= n_{\text{теор}}(\text{NH}_4\text{NO}_3) \cdot M(\text{NH}_4\text{NO}_3) = \\ &= 200 \text{ моль} \cdot 80 \text{ г/моль} = 16\,000 \text{ г}. \end{aligned}$$

4. Из формулы для определения выхода продукта реакции выражаем $m_{\text{практ}}$ и производим расчет:

$$\eta = \frac{m_{\text{практ}}}{m_{\text{теор}}}, \text{ откуда } m_{\text{практ}} = \eta \cdot m_{\text{теор}} = 0,9 \cdot 16\,000 \text{ г} = 14\,400 \text{ г} = 14,4 \text{ кг}.$$

Ответ: практическая масса нитрата аммония равна 14,4 кг.

Тип 3. Даны масса (объем, химическое количество) продукта и выход продукта. Требуется определить массу (объем, химическое количество) исходного вещества.

Пример. Определите объем (н. у.) водорода, который понадобится для получения аммиака объемом 13,44 м³ (н. у.), если его практический выход равен 20 %.

Дано:

$$V_{\text{практ}}(\text{NH}_3) = 13,44 \text{ м}^3$$

$$\eta(\text{NH}_3) = 20 \% = 0,2$$

$$V(\text{H}_2) = ?$$

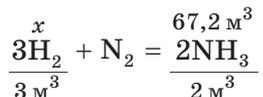
Решение

1. Рассчитаем теоретический объем аммиака:

$$\eta = \frac{V_{\text{практ}}}{V_{\text{теор}}}; \text{ откуда } V_{\text{теор}} = \frac{V_{\text{практ}}}{\eta};$$

$$\begin{aligned} V_{\text{теор}}(\text{NH}_3) &= \frac{V_{\text{практ}}(\text{NH}_3)}{\eta} = \\ &= \frac{13,44 \text{ м}^3}{0,2} = 67,2 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

2. Составим уравнение реакции синтеза аммиака и рассчитаем объем (x) водорода:



$$x = \frac{3 \cdot 67,2}{2} = 100,8 \text{ м}^3. \text{ Это — } V(\text{H}_2).$$

Ответ: для синтеза аммиака потребуется водород объемом 100,8 м³.

Выход продукта реакции — это величина, равная отношению реально полученной в результате реакции массы (химического количества, объема) вещества к массе (химическому количеству, объему) этого вещества, рассчитанной по уравнению реакции.



Вопросы и задания

1. Почему на практике обычно получается меньшее количество продукта, чем рассчитанное теоретически по уравнению реакции?
2. Как рассчитывают выход продукта химической реакции?
3. При окислении оксида серы(IV) объемом (н. у.) $17,92 \text{ дм}^3$ образовался оксид серы(VI) массой 60 г. Определите выход продукта реакции в процентах.
4. При сплавлении оксида кремния(IV) с карбонатом натрия химическим количеством 5 моль получили силикат натрия и углекислый газ объемом (н. у.) $89,6 \text{ дм}^3$. Определите выход углекислого газа.
5. Найдите объем (н. у.) аммиака, необходимый для получения сульфата аммония массой 26,4 г, если его выход равен 80 %.
6. Рассчитайте объем (н. у.) воздуха, который необходим для получения оксида серы(IV) объемом (н. у.) $85,12 \text{ дм}^3$ из природной серы, если выход SO_2 составляет 90 %.
7. При взаимодействии оксида кремния(IV) с оксидом кальция получили силикат кальция массой 200 кг, что составило 93 % от теоретически возможного. Определите химическое количество оксида кальция, вступившего в реакцию.
8. Известняк состоит из карбоната кальция и примесей, массовая доля которых равна 15 %. Рассчитайте массу известняка, при прокаливании которого выделится углекислый газ объемом 80 дм^3 (н. у.), если его выход равен 90 %.