

**Пример 2.** Определить концентрацию ионов водорода в растворе, pH которого равен 4,60.

**Решение.** Согласно условию задачи,  $-\lg [H^+] = 4,60$ . Следовательно,  $\lg [H^+] = -4,60 = 5,40$ . Отсюда по таблице логарифмов находим:  $[H^+] = 2,5 \cdot 10^{-5}$  моль/л.

**Пример 3.** Чему равна концентрация гидроксид-ионов в растворе, pH которого равен 10,80?

**Решение.** Из соотношения  $pH + pOH = 14$  находим:

$$pOH = 14 - pH = 14 - 10,80 = 3,20.$$

Отсюда  $-\lg [OH^-] = 3,20$  или  $\lg [OH^-] = -3,20 = 1,80$ .

Этому значению логарифма соответствует значение  $[OH^-] = 6,31 \cdot 10^{-4}$  моль/л.

**Пример 4.** Определить концентрацию  $HCO_3^-$  и  $CO_3^{2-}$  в 0,01 M растворе угольной кислоты, если pH этого раствора равен 4,18.

**Решение.** Найдем концентрацию ионов водорода в растворе:

$$-\lg [H^+] = 4,18; \quad \lg [H^+] = -4,18 = 5,82; \quad [H^+] = 6,61 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л.}$$

Теперь, воспользовавшись данными табл. 6 приложения, запишем выражение для константы диссоциации угольной кислоты по первой ступени:

$$K_1 = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} = 4,45 \cdot 10^{-7}.$$

Подставляя значения  $[H^+]$  и  $[H_2CO_3]$ , находим:

$$[HCO_3^-] = 4,45 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-2} / (6,61 \cdot 10^{-5}) = 6,73 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л.}$$

Аналогично записываем выражение для константы диссоциации  $H_2CO_3$  по второй ступени и находим значение  $[CO_3^{2-}]$ :

$$K_2 = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = 4,69 \cdot 10^{-11};$$

$$[CO_3^{2-}] = 4,69 \cdot 10^{-11} \cdot 6,73 \cdot 10^{-5} / (6,61 \cdot 10^{-5}) = 4,8 \cdot 10^{-11} \text{ моль/л.}$$

При необходимости более точных расчетов для характеристики состояния ионов  $H^+$  в растворе следует вычислять не pH, а  $pH_{\text{акт}}$  — величину, равную отрицательному логарифму активности ионов водорода в растворе:

$$pH_{\text{акт}} = -\lg a_{H^+} = -\lg (f_{H^+} C_{H^+}).$$

**Пример 5.** Определить активность ионов водорода и значение  $pH_{\text{акт}}$  в  $2,5 \cdot 10^{-3}$  M растворе HCl, содержащем, кроме того,  $2,5 \cdot 10^{-3}$  моль/л KCl.

**Решение.** Для электролитов, состоящих из однозарядных ионов, значение ионной силы численно равно общей концентрации раствора; в данном случае  $I = 2,5 \cdot 10^{-3} + 2,5 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-3}$ . При этой ионной силе коэффициент активности однозарядного иона равен 0,95 (см. табл. 7 приложения). Следовательно,

$$a_{H^+} = 0,95 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 2,38 \cdot 10^{-3}.$$

Теперь находим значение  $pH_{\text{акт}}$ :

$$pH_{\text{акт}} = -\lg a_{H^+} = -\lg(2,38 \cdot 10^{-3}) = -3,38 = 2,62.$$

### Задачи\*

**536.** Найти молярную концентрацию ионов  $H^+$  в водных растворах, в которых концентрация гидроксид-ионов (в моль/л) составляет: а)  $10^{-4}$ ; б)  $3,2 \cdot 10^{-6}$ ; в)  $7,4 \cdot 10^{-11}$ .

**537.** Найти молярную концентрацию ионов  $OH^-$  в водных растворах, в которых концентрация ионов водорода (в моль/л) равна: а)  $10^{-3}$ ; б)  $6,5 \cdot 10^{-8}$ ; в)  $1,4 \cdot 10^{-12}$ .

**538.** Вычислить pH растворов, в которых концентрация ионов  $H^+$  (в моль/л) равна: а)  $2 \cdot 10^{-7}$ ; б)  $8,1 \cdot 10^{-3}$ ; в)  $2,7 \cdot 10^{-10}$ .

**539.** Вычислить pH растворов, в которых концентрация ионов  $OH^-$  (в моль/л) равна: а)  $4,6 \cdot 10^{-4}$ ; б)  $5 \cdot 10^{-6}$ ; в)  $9,3 \cdot 10^{-9}$ .

**540.** Вычислить pH 0,01 н. раствора уксусной кислоты, в котором степень диссоциации кислоты равна 0,042.

**541.** Определить pH раствора, в 1 л которого содержится 0,1 г NaOH. Диссоциацию щелочи считать полной.

**542.** Во сколько раз концентрация ионов водорода в крови (pH=7,36) больше, чем в спинномозговой жидкости (pH=7,53)?

**543.** Определить  $[H^+]$  и  $[OH^-]$  в растворе, pH которого равен 6,2.

**544.** Вычислить pH следующих растворов слабых электролитов: а) 0,02 M  $NH_4OH$ ; б) 0,1 M  $HCN$ ; в) 0,05 н.  $HCOOH$ ; г) 0,01 M  $CH_3COOH$ .

**545.** Чему равна концентрация раствора уксусной кислоты, pH которого равен 5,2?

**546.** Вычислить значения  $a_{OH^-}$  и  $pH_{\text{акт}}$  в 0,2 н. растворе NaOH, считая  $f_{OH^-} = 0,8$ .

\* При решении задач этого раздела следует при необходимости пользоваться табл. 6 и 7 приложения. При отсутствии специальных указаний предполагается, что растворы находятся при 20–25°C, так что можно считать, что  $K_{H_2O} = 10^{-14}$ .

547. Используя данные табл. 7 приложения, найти  $p_{\text{H}^+}$  0,005 н. раствора HCl, содержащего, кроме того, 0,015 моль/л NaCl.

548. Степень диссоциации слабой одноосновной кислоты в 0,2 н. растворе равна 0,03. Вычислить значения  $[\text{H}^+]$ ,  $[\text{OH}^-]$  и  $p_{\text{OH}}$  для этого раствора.

549. Рассчитать  $p_{\text{H}}$  раствора, полученного смешением 25 мл 0,5 М раствора HCl, 10 мл 0,5 М раствора NaOH и 15 мл воды. Коэффициенты активности ионов принять равными единице.

550. Вычислить  $p_{\text{H}}$  0,1 н. раствора уксусной кислоты, содержащего, кроме того, 0,1 моль/л  $\text{CH}_3\text{COONa}$ . Коэффициенты активности ионов считать равными единице.

551. Как изменится  $p_{\text{H}}$ , если вдвое разбавить водой: а) 0,2 М раствор HCl; б) 0,2 М раствор  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ; в) раствор, содержащий 0,1 моль/л  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и 0,1 моль/л  $\text{CH}_3\text{COONa}$ ?

#### Вопросы для самоконтроля

552. Указать, какие из рядов перечисленных ниже кислот соотвествуют возрастанию  $p_{\text{H}}$  в растворах одинаковой молярной концентрации: а) HCN, HF, HNO<sub>3</sub>, HCOOH,  $\text{CH}_3\text{ClCOOH}$ ; б) HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>2</sub>,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , HCN; в) HCl,  $\text{CH}_3\text{ClCOOH}$ , HF,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ .

553. В 0,01 н. растворе одноосновной кислоты  $p_{\text{H}} = 4$ . Какое утверждение о силе этой кислоты правильно: а) кислота слабая; б) кислота сильная?

554. Как изменится кислотность 0,2 н. раствора HCN при введении в него 0,5 моль/л KCN: а) возрастает; б) уменьшится; в) не изменится?

555. Как надо изменить концентрацию ионов водорода в растворе, чтобы  $p_{\text{H}}$  раствора увеличился на единицу: а) увеличить в 10 раз; б) увеличить на 1 моль/л; в) уменьшить в 10 раз; г) уменьшить на 1 моль/л?

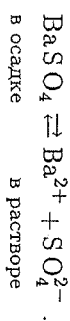
556. Сколько ионов водорода содержится в 1 мл раствора,  $p_{\text{H}}$  которого равен 13: а)  $10^{13}$ ; б)  $60,2 \cdot 10^{13}$ ; в)  $6,02 \cdot 10^7$ ; г)  $6,02 \cdot 10^{10}$ ?

557. Как изменится  $p_{\text{H}}$  воды, если к 10 л ее добавить  $10^{-2}$  моль NaOH: а) возрастет на 2; б) возрастет на 3; в) возрастет на 4; г) уменьшится на 4?

558. Чему равен  $p_{\text{H}}$  нейтрального раствора при 50°C: а) 5,5; б) 6,6; в) 7,0?

#### 4. ПРОИЗВЕДЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ

В насыщенном растворе малорастворимого сильного электролита устанавливается равновесие между осадком (твердой фазой) электролита и ионами электролита в растворе, например:



Поскольку в растворах электролитов состояние ионов определяется их активностями, то константа равновесия последнего процесса выразится следующим уравнением:

$$K = \frac{a_{\text{Ba}^{2+}} a_{\text{SO}_4^{2-}}}{a_{\text{BaSO}_4}}$$

Знаменатель этой дроби, т. е. активность твердого сульфата бария, есть величина постоянная, так что произведение  $K a_{\text{BaSO}_4}$  тоже является при данной температуре константой. Отсюда следует, что произведение активностей ионов  $\text{Ba}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  также представляет собой постоянную величину, называемую *произведением растворимости* и обозначаемую  $IP$ :

$$a_{\text{Ba}^{2+}} a_{\text{SO}_4^{2-}} = IP_{\text{BaSO}_4}$$

*Произведение активностей ионов малорастворимого электролита, содержащегося в его насыщенном растворе (произведение растворимости), есть величина постоянная при данной температуре.*

Если электролит очень мало растворим, то ионная сила его насыщенного раствора близка к нулю, а коэффициенты активности ионов мало отличаются от единицы. В подобных случаях произведение активностей ионов в выражении для  $IP$  можно заменить произведением их концентраций. Так, ионная сила насыщенного раствора  $\text{BaSO}_4$  имеет порядок  $10^{-5}$  и произведение растворимости  $\text{BaSO}_4$  может быть записано в следующей форме:

$$IP_{\text{BaSO}_4} = [\text{Ba}^{2+}] [\text{SO}_4^{2-}]$$

В приводимых ниже примерах и задачах, кроме специально оговоренных случаев, возможное отличие коэффициентов активности ионов от единицы не будет учитываться, а произведение растворимости будет выражаться через концентрации соответствующих ионов.

Если молекула электролита при диссоциации образует два или несколько одинаковых ионов, то в выражении для  $IP$  concentra-

454. 760 кПа.  
455. 35% O<sub>2</sub>.  
456. 90% (об.) N<sub>2</sub>O,  
10% (об.) NO.  
457. 483 кПа.  
458. -42,2 кДж/моль.  
459. -75,6 кДж/моль.  
460. Ha 8,9 К.  
461. -77,7 кДж/моль.  
462. Ha 8,1 К.  
463. 1,24 МПа.  
464. 311 кПа.  
465. 9,0 г.  
466. 309,6 кПа.  
467. 1,14 МПа.  
468.  $4,95 \cdot 10^4$ .  
469. 426 кПа.  
470. 92.  
471. 0,001 моль.  
472. 4,1 кПа.  
473. 24,8 кПа.  
474. 98 кПа.  
475. Ha 54 Па.  
476. 55,7 г.  
477. Ha 0,26 грамма.

## Глава VII

502. 0,24 моля Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  
0,02 моля NaCl,  
0,64 моля KCl.  
503. 0,055.  
504.  $5 \cdot 10^{-4}$ .  
505.  $K = 1,8 \cdot 10^{-4}$ , pK = 3,75.  
506.  $4,5 \cdot 10^{-7}$ .  
507. 0,01 моль/л.  
508. 2,3 моль/л.  
509. 900 мл.  
510.  $6 \cdot 10^{-3}$  моль/л.  
511. 0,014 моль/л.  
512.  $[H^+] = [HSe^-] =$   
 $= 2,9 \cdot 10^{-3}$  моль/л;  
 $[Se^{2-}] = 10^{-11}$  моль/л.  
513. В 167 раз.  
514.  $1,8 \cdot 10^{-4}$  моль/л.  
515. Для третьей ступени.  
516. 1,86.  
517. 0,7.  
518. 0,9.  
519. 0,75.

478. 101°C.  
479. -27°C.  
480. а) 18,4 г; б) 65,8 г.  
481. 2 : 1.  
482. Оксид - 8°C.  
483. 32.  
484. 145.  
485. Из восьми.  
486. C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O<sub>4</sub>.  
487. 32, 13,4 МПа.  
488. а) 311,7 кПа; б) - 0,25°C;  
в) 100,7°C; г) 2,33 кПа.  
489. 2 моль/кг; 40,6%; - 3,72°C.  
490. а; в.  
491. в.  
492. б.  
493. г.  
494. а.  
495. в.  
496. г.  
497. в.  
498. а.  
499. а.  
500. б.  
501. а.

535.  $f_{Cl^-} = 0,90$ ;  
 $f_{SO_4^{2-}} = 0,95$ ;  $f_{PO_4^{3-}} = 0,90$ ;  
 $f_{Fe(CN)_6^{4-}} = 0,83$ .  
536. а)  $10^{-10}$  моль/л;  
б)  $3,12 \cdot 10^{-9}$  моль/л;  
в)  $1,35 \cdot 10^{-4}$  моль/л.  
537. а)  $10^{-11}$  моль/л;  
б)  $1,54 \cdot 10^{-7}$  моль/л;  
в)  $7,14 \cdot 10^{-3}$  моль/л.  
538. а) 6,70; б) 2,09; в) 9,57.  
539. а) 10,66; б) 8,70; в) 5,97.  
540. 3,38.  
541. 11,40.  
542. В 1,5 раза.  
543.  $[H^+] = 6,3 \cdot 10^{-7}$  моль/л;  
 $[OH^-] = 1,6 \cdot 10^{-8}$  моль/л.  
544. а) 10,78; б) 5,05; в) 2,52;  
г) 3,38.  
545.  $2,2 \cdot 10^{-6}$  моль/л.  
546.  $\alpha_{OH^-} = 0,16$  моль/л;  
 $\rho_{OH^-} = 0,80$ .  
547. 2,35.  
548.  $[H^+] = 6,0 \cdot 10^{-3}$  моль/л;  
 $[OH^-] = 1,7 \cdot 10^{-12}$  моль/л;  
pOH = 11,78.  
549. 0,82.  
550. 4,75.  
551. а) Увеличится на 0,3;  
б) увеличится на 0,15;  
в) не изменится.  
552. г; в.  
553. а.  
554. б.  
555. в.  
556. г.  
557. в.  
558. г.  
559.  $4,8 \cdot 10^{-9}$ .  
560.  $9,2 \cdot 10^{-6}$ .  
561.  $4 \cdot 10^{-12}$ .  
562.  $8 \cdot 10^{-9}$ .  
563.  $7,1 \cdot 10^{-4}$  г.  
564.  $8,36 \cdot 10^{-5}$  г.  
565. 408 л.  
566.  $1,6 \cdot 10^{11}$  л.  
567. В 32500 раз.  
568. Да.  
569. Да.  
570. Да.  
571. В 2230 раз.  
572. а)  $2,15 \cdot 10^{-4}$  моль/л;  
б)  $1,4 \cdot 10^{-5}$  моль/л;  
в) 15,4 раза.  
573. В 72 раза.  
574. а.  
575. б.  
576. а.  
577. в.  
578. а.  
579. а.  
588.  $K_r = 1,5 \cdot 10^{-11}$ ;  
 $h = 3,9 \cdot 10^{-5}$ , pH = 7,59.  
589.  $K_r = 5,6 \cdot 10^{-10}$ ;  
 $h = 2,4 \cdot 10^{-4}$ , pH = 5,63.  
590. 11,66.  
591. В 0,1 М растворе  
 $h = 1,12 \cdot 10^{-2}$ , pH = 11,05;  
в 0,001 М растворе  
 $h = 0,107$ , pH = 10,03.  
592. 9,15 (25°C); 9,65 (60°C).  
593.  $10^{-7}$ .  
595. Оранжевая.  
599. б.  
600. а.  
601. а.  
602. б; в.  
603. а; г.  
604. в.  
605. в.  
606. а2.  
607. г; г; ж.

## Глава VIII

615. г; в; д.  
616. а; г; д.  
617. а.  
618. а; б; г.  
641. а) 49,03 г/моль;  
б) 49,03 г/моль;  
в) 12,26 г/моль.  
642. 94,8 г/моль; 6,2 г/моль;  
17,0 г/моль.  
643. а) 1/3 моля; 46,2 г/моль;  
б) 1,7 моля; 19,8 г/моль;  
в) 1/8 моля; 17,3 г/моль.  
644. а) б; б) 5.  
645. 0,134 г.