

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»

---

А.А. Гуров, П.В. Слитиков

# Растворы. Электрохимические явления и процессы

*Учебно-методическое пособие*



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО

МГТУ им. Н.Э. Баумана

2021

УДК 54  
ББК 24.1  
Г90

Издание доступно в электронном виде по адресу  
<https://bmstu.press/catalog/item/7134/>

Факультет «Фундаментальные науки»  
Кафедра «Химия»

*Рекомендовано Научно-методическим советом  
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

**Гуров, А. А.**  
Г90 Растворы. Электрохимические явления и процессы : учебно-методическое пособие / А. А. Гуров, П. В. Слитиков. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — 84, [2] с.

ISBN 978-5-7038-5600-0

Приведены задачи, которые включены в домашнее задание модуля II «Растворы. Электрохимические явления и процессы» курса «Общая химия». В каждом разделе пособия даны примеры решения типовых задач. В приложении представлен обширный справочный материал.

Для студентов приборостроительных специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 54  
ББК 24.1



*Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: [info@baumanpress.ru](mailto:info@baumanpress.ru)*

ISBN 978-5-7038-5600-0

© Гуров А.А., Слитиков П.В., 2021  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

## Предисловие

Предлагаемое учебно-методическое пособие написано для обеспечения учебного процесса при изучении курса «Общая химия» и служит связующим звеном между лекционным материалом и практическими занятиями. Оно предназначено для выполнения и защиты домашнего задания модуля II «Растворы. Электрохимические явления и процессы». Пособие во-первых, помогает организовать самостоятельную работу студентов, а во-вторых, позволяет осуществлять контроль за приобретенными ими знаниями.

Современный курс «Общая химия» в техническом университете отражает основные тенденции совершенствования системы образования и направлен на формирование у выпускников компетенций, предусмотренных Самостоятельно установленным образовательным стандартом. Курс представлен тремя модулями, второй из которых посвящен изучению растворов, окислительно-восстановительных реакций, а также электрохимических процессов, протекающих на электродах гальванических элементов и электролитических ячеек (при электролизе).

Наряду с теоретической частью в курсе «Общая химия» предусмотрена и практическая часть, в которой помимо отработки лабораторных работ требуются выполнение и защита домашнего задания. Последнее представлено в предлагаемом пособии примерами решения как типовых, так и наиболее сложных задач, а также условиями задач различных типов, предназначенных для самостоятельного решения.

В учебно-методическом пособии содержится более 500 задач. Все они сгруппированы в наборы с конкретными условиями, что позволяет студентам применить приобретенные ими теоретические знания к разнообразным химическим процессам и системам и таким образом существенно расширить объем своих фактологических знаний. Тематика задач весьма разнообразна, а диапазон их сложности довольно широк. Это дает возможность осуществлять дифференцированный подход к обучению, составлять индивидуальные наборы задач для студентов с учетом уровня их подготовки и интересов. Включение расчетных задач в пособие вызвано необходимостью, во-первых, привить будущим инженерам навыки количественного расчета и составления мотивированного мнения о возможности проведения процесса на практике, а во-вторых, показать студенту, что в его профессиональной деятельности расчет условий всегда должен предшествовать попытке практического конструирования того или иного изделия.

Поскольку приведенные в пособии задачи, а также рассмотренные в нем примеры решения полностью соответствуют курсу «Общая химия» в технических университетах, авторы сочли возможным опустить краткие теоретические пояснения к отдельным темам.

Что касается терминологии и символики, то авторы пособия стремились следовать рекомендациям ИЮПАК (Международный союз теоретической и прикладной химии). Исключения составляют лишь те случаи, когда это противоречит общепринятым в России традициям. Однако следует отметить, что в современной литературе во всем мире одни и те же величины нередко имеют различные обозначения и названия. В этой связи авторы посчитали необходимым в начале пособия привести список основных обозначений и их названий.

Взаимодействие реагентов, протекающее с образованием продуктов, описывается химическим уравнением, которое объединяет одновременно и качественную (участвующие в реакции вещества), и количественную (масса, количество или объем реагентов и продуктов) стороны процесса. Правильное составление химического уравнения и практическое умение провести по нему различные количественные расчеты являются главными и неотъемлемыми аспектами в изучении химии.

Одна и та же задача иногда может быть решена различными способами. Все зависит от системы исходных данных, метода решения и степени точности. Выбор способа решения определяется поставленной целью, умением сравнивать эффективность и лаконичность используемого метода, а также способностью оценивать влияние различных факторов на точность получаемых результатов. Очевидно, что для этого требуется хорошая подготовка по математике и физике.

Необходимый для решения задач, аргументации ответов и подтверждения сделанных выводов справочный материал относительно термодинамических характеристик веществ приведен в приложении. Приемлемо использование для этого и других справочных материалов. Приведенные в приложении термодинамические характеристики отвечают современному состоянию — некоторые из них либо заново переопределены, либо уточнены, либо пересчитаны, а поэтому еще не вошли в современные справочные издания ни в России, ни за рубежом.

## Основные обозначения

$a$	— активность (моль/л, моль/кг растворителя)
$C$	— молярная концентрация, молярность (моль/л, М)
$C_{\text{масс}}$	— массовая концентрация (г/л)
$C_{\text{экв}}$	— молярная концентрация эквивалента, нормальность (моль экв/л, н.)
$C_m$	— моляльная концентрация, моляльность (моль/кг растворителя)
$E$	— электродвижущая сила, ЭДС (В); эбулиоскопическая постоянная растворителя (К · кг/моль)
$F$	— постоянная Фарадея (96 485,3 Кл/моль; 26,8 А · ч/моль экв)
$h$	— степень гидролиза (%)
$I$	— ионная сила раствора (моль/л, моль/кг растворителя); сила тока (А)
$K$	— криоскопическая постоянная растворителя (К · кг/моль)
$K_{\text{г}}$	— константа гидролиза
$K_{\text{дисс}}$	— константа диссоциации
$k$	— коэффициент растворимости (г/100 г H <sub>2</sub> O)
$n$	— число электронов, принимающих участие в электрохимическом процессе
$T$	— абсолютная температура (К)
$t$	— эмпирическая температура (°С)
$V$	— объем (л)
$Z$	— зарядовое число
$Z_{\text{экв}}$	— число эквивалентности
$\alpha$	— степень диссоциации (%)
$\beta$	— коэффициент выхода по току (%)
$\gamma_{\pm}$	— среднеионные молярный и моляльный коэффициенты активности
$\nu$	— количество вещества (моль)
$\rho$	— плотность вещества или раствора (г/см <sup>3</sup> , г/л)
$\varphi_{\text{Оф}}$ $\varphi_{\text{Вф}}$	— электродный потенциал (В)
$\omega$	— массовая доля (%)
ПК	— произведение концентраций
ПР	— произведение растворимости
[ ]	— равновесная молярная концентрация (моль/л)

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАСТВОРАХ: ВИДЫ, СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ СОСТАВА, ЗАКОН РАУЛЯ И ЕГО СЛЕДСТВИЯ

## Примеры решения задач

**Задача 1.** Плотность  $\rho$  водного раствора серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  составляет 1160,0 г/л. Рассчитайте молярную, моляльную и массовую концентрации этого раствора. Определите, какова его молярная концентрация эквивалента.

**Решение.** Указанное значение плотности водного раствора серной кислоты, согласно справочнику, соответствует ее массовой доле, равной 22,7 % (масс.). Зная молярную массу  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $M = 98,0$  г/моль, в соответствии с определениями находят концентрацию:

– молярную  $C$ :

$$C = \frac{v}{V} = \frac{m}{M \cdot V} = \frac{\omega \cdot m_{\text{р-ра}}}{M \cdot V} = \frac{\omega \rho}{M} = \frac{0,227 \cdot 1160,0}{98,0} = 2,69 \text{ моль/л};$$

– моляльную  $C_m$ :

$$C_m = \frac{v}{m_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{m}{M \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\omega \cdot m_{\text{р-ра}}}{M \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1000\omega}{M(1-\omega)} = \frac{1000 \cdot 0,227}{98,0 \cdot (1-0,227)} = 2,99 \text{ моль/кг H}_2\text{O};$$

– массовую  $C_{\text{масс}}$ :

$$C_{\text{масс}} = \frac{m}{V} = \frac{\omega \cdot m_{\text{р-ра}}}{V} = \omega \cdot \rho = 0,227 \cdot 1160,0 = 263,3 \text{ г/л.}$$

Поскольку серная кислота является двухосновной кислотой, ее число эквивалентности  $Z_{\text{эКВ}} = 2$ . Тогда молярная концентрация эквивалента раствора  $C_{\text{эКВ}}$  есть

$$C_{\text{эКВ}} = Z_{\text{эКВ}} C = 2 \cdot 2,69 = 5,38 \text{ моль экв/л.}$$

**Задача 2.** Какой объем 12%-ного (масс.) водного раствора гидроксида калия КОН потребуется для приготовления 1 л 0,1 М раствора?

**Решение.** Исходя из значений объема  $V$  и молярной концентрации  $C$  конечного раствора рассчитывают массу содержащегося в нем КОН:

$$C = \frac{v}{V} = \frac{m_{\text{KOH}}}{M_{\text{KOH}} \cdot V} \Rightarrow m_{\text{KOH}} = M_{\text{KOH}} C \cdot V = 56,1 \cdot 0,1 \cdot 1 = 5,61 \text{ г.}$$

Тогда масса 12%-ного раствора  $m_{\text{р-ра}}$  с такой массой КОН в нем составит:

$$m_{\text{р-ра}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{\omega} = \frac{5,61}{0,12} = 46,75 \text{ г.}$$

Согласно справочным данным, плотность  $\rho$  исходного раствора равна 1100,0 г/л. Следовательно, для приготовления 1 л 0,1 М раствора КОН потребуется

$$V = \frac{m_{\text{р-ра}}}{\rho} = \frac{46,75}{1100,0} = 0,0425 \text{ л}$$

12%-ного раствора КОН.

**Задача 3.** Давление насыщенного водяного пара над 10%-ным (масс.) водным раствором нитрата магния  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  ( $\rho = 1076,2$  г/л) при температуре 20 °С составляет  $p = 22,9 \cdot 10^2$  Па. Определите температуру начала кипения  $t_{\text{кип}}$  и температуру начала замерзания  $t_{\text{зам}}$  этого раствора. Каково его осмотическое давление при  $t = 20$  °С?

**Решение.** Водный раствор  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  является раствором сильного электролита. Температуру начала его кипения рассчитывают по следствию из закона Рауля в приложении к растворам электролитов:

$$\Delta T_{\text{кип}} = EC_m i,$$

где  $i$  — коэффициент диссоциации;  $E$  — эбулиоскопическая постоянная (константа) растворителя, для воды  $E = 0,52$  К·кг/моль (см. табл. П1);  $C_m$  — моляльная концентрация раствора, моль/кг  $\text{H}_2\text{O}$ .

Зная давление насыщенного пара над раствором, по закону Рауля применительно к растворам электролитов вычисляют коэффициент диссоциации  $i$ :

$$p = p_0 - p_0 X i \Rightarrow i = \frac{p_0 - p}{p_0 X},$$

где  $p_0$  — давление насыщенного пара над чистым растворителем;  $p$  — давление насыщенного пара над раствором;  $X$  — мольная доля растворенного вещества.

Массовая доля 10 % означает, что в 100 г раствора содержится 10 г  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ . Оставшиеся 90 г —  $\text{H}_2\text{O}$ . Тогда количества веществ

$$v_{\text{Mg}(\text{NO}_3)_2} = \frac{m_{\text{Mg}(\text{NO}_3)_2}}{M_{\text{Mg}(\text{NO}_3)_2}} = \frac{10}{148,3} = 0,067 \text{ моль};$$

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{90}{18} = 5 \text{ моль}.$$

В соответствии с определением молярная доля  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  в растворе

$$X = \frac{v_{\text{Mg}(\text{NO}_3)_2}}{v_{\text{Mg}(\text{NO}_3)_2} + v_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{0,067}{0,067 + 5} = 0,013.$$

По справочнику определяют, что при заданной температуре давление насыщенного пара чистой воды составляет  $p_0 = 23,38 \cdot 10^2$  Па. Отсюда

$$i = \frac{(23,38 - 22,9) \cdot 10^2}{23,38 \cdot 10^2 \cdot 0,013} = 1,58.$$

Молярная концентрация  $C_m$  раствора связана с массовой долей растворенного вещества  $\omega = 0,1$  следующим соотношением:

$$C_m = \frac{1000\omega}{M_{\text{Mg}(\text{NO}_3)_2}(1-\omega)} = \frac{1000 \cdot 0,1}{148,3(1-0,1)} = 0,75 \text{ моль/кг } \text{H}_2\text{O}.$$

Температуру начала кипения раствора определяют как

$$\begin{aligned} T_{\text{кип р-ра}} &= T_{\text{кип раст-ля}} + \Delta T_{\text{кип}} = T_{\text{кип раст-ля}} + EC_m i = \\ &= 373,15 + 0,52 \cdot 0,75 \cdot 1,58 = 373,77 \text{ К}. \end{aligned}$$

Аналогично, используя другое следствие из закона Рауля

$$\Delta T_{\text{зам}} = KC_m i,$$

где  $K$  — криоскопическая постоянная (константа) растворителя (для воды  $K = 1,86 \text{ К} \cdot \text{кг/моль}$ , см. табл. П1), находят температуру начала замерзания данного раствора:

$$T_{\text{зам р-ра}} = T_{\text{зам раст-ля}} - KC_m i = 273,15 - 1,86 \cdot 0,75 \cdot 1,58 = 270,95 \text{ К}.$$

В соответствии с законом Вант-Гоффа применительно к растворам электролитов осмотическое давление  $\pi$  связано с молярной концентрацией раствора  $C$  выражением