



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

К а ф е д р а аналитической и физической химии

ТЕРМОДИНАМИКА

ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Методические указания
к лабораторной работе № 18

Самара
Самарский государственный технический университет
2019

Печатается по решению методического совета химико-технологического факультета СамГТУ

УДК 544.652

Термодинамика гальванического элемента. Метод. указ. к лаб. занятиям / Сост. Ю.В. Рублинецкая, Н.А. Расщепкина, Б.М. Стифатов, Е.О. Ильиных. Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2019. 16 с.

Рассмотрены теоретические основы и экспериментальное определение термодинамических характеристик электрохимических реакций, протекающих при работе гальванического элемента.

Указания рассчитаны на студентов, изучающих физическую химию в рамках бакалавриата по направлениям 04.03.01, 04.03.02, 18.03.01, 18.03.02, 18.05.01, 19.03.01, 19.03.02, 22.03.01, 22.03.02 и специалитета по направлениям 020100, 240300 и специалитета по направлениям 020100 и 240300.

УДК 544.652

Составители: д-р хим. наук Ю.В. Рублинецкая,
канд. хим. наук Н.А. Расщепкина,
канд. хим. наук Б.М. Стифатов,
канд. хим. наук Е.О. Ильиных.

Рецензент д-р хим. наук Гаркушин И.К.
(Самарский государственный технический университет)

© Рублинецкая Ю.В., Расщепкина Н.А.,
Стифатов Б.М., Ильиных Е.О.,
составление 2019

© Самарский государственный
технический университет, 2019

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электрохимическая цепь представляет собой систему, состоящую из двух электродов, называемых *катодом* и *анодом*. *Электродом* является проводник 1-го рода (имеет электронную проводимость), находящийся в контакте с проводником 2-го рода (электролитом). Электрод, на котором протекает процесс восстановления, называется *катодом*; электрод, на котором происходит процесс окисления, – *анодом*.

Редокс-электрод или *электрод окислительно-восстановительной системы* $Ox + ne^- \rightleftharpoons Red$ представляет собой короткий отрезок платиновой проволоки, впаянный в стеклянный корпус. Платиновая проволока, выступающая из стекла всего на 1-0,5 мм, приобретает заряд, зависящий от природы и активности, находящихся в растворе *окислителя* (Ox) и *восстановителя* (Red).

Для количественной характеристики потенциала любого редокс-электрода $Ox, Red | Pt$ его сравнивают в электрохимической цепи с потенциалом *стандартного водородного электрода* ($H^+ | H_2 | Pt$). Вертикальная черта (|) соответствует границе раздела фаз. Такие цепи принято записывать так, чтобы электрод сравнения находился слева. Электрохимическую цепь, используемую для измерения потенциалов электродов окислительно-восстановительных систем, в общем виде можно представить следующим образом: $Pt | H_2 | H^+ || Ox_1, Red_1 | Pt$. Две вертикальные черты (||) соответствуют пористой перегородке или солевому мостику, который обеспечивает электрическую проводимость между растворами электролитов и препятствует их взаимной диффузии. Представленная электрохимическая цепь содержит электролитический мостик, а на ее концах находятся одинаковые металлы (Pt), поэтому она является *правильно разомкнутой цепью без переноса*. *Стандартным электродным потенциалом* (E^0) редокс-электрода называется напряжение на концах правильно разомкнутой электрохимической цепи, составленной из исследуемого электрода и стандартного водородного электрода, если $p = 1$ бар, $T = 298$ К, активности всех участников электродных реакций равны 1. Единица измерения электродных потенциалов – вольт (В) – представляет собой ту движущую силу, которая необходима, чтобы заряд в 1 кулон приобрел энергию в 1 Дж.

Стандартные электродные потенциалы (E^0) являются мерой окислительно-восстановительной способности веществ. Чем больше

стандартный окислительно-восстановительный потенциал системы, тем сильнее в ней окислитель (Ox) и слабее восстановитель (Red). Стандартные электродные потенциалы систем приведены в справочниках физико-химических величин.

1. Гальванический элемент

Гальванический элемент – это электрохимическая цепь, способная превращать химическую энергию заключенных в ней реагентов (окислителя и восстановителя) непосредственно в электрическую энергию.

Электродвижущей силой гальванического элемента (ЭДС) называется разность потенциалов на концах правильно разомкнутой электрохимической цепи [1]. ЭДС (ΔE) – величина всегда положительная, измеряется в вольтах (В). Её можно вычислить, вычитая из величины более положительного потенциала (катода) величину менее положительного (анода).

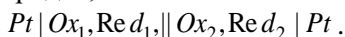
Таким образом, ЭДС гальванического элемента (ΔE) равна разности

$$\Delta E = E_k - E_a. \quad (1)$$

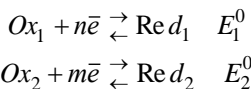
Тогда в соответствии с уравнением (1) получаем для стандартных условий

$$\Delta E^0 = E_k^0 - E_a^0. \quad (2)$$

Электрохимическую цепь, составленную из двух окислительно-восстановительных электродов, можно записать как:



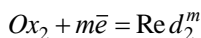
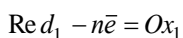
Электродам гальванического элемента соответствуют полуреакции и стандартные потенциалы:



Поскольку гальванический элемент принято записывать так, чтобы анод находился слева, то для стандартных условий $E_1^0 < E_2^0$.

(-) анод

катод (+)



восстановление

окисление

Суммарное количество электронов должно быть равно нулю, поэтому уравнение протекающей реакции записывается:

$m\text{Red}_1 + n\text{Ox}_2 = m\text{Ox}_1 + n\text{Red}_2$. В реакции принимает участие $z = n \cdot m$ молей электронов.

Для определения электродвижущей силы гальванического элемента (ΔE) по формуле (1) необходимо из потенциала катода вычесть потенциал анода: $\Delta E^0 = E_2^0 - E_1^0 > 0$. Во внешней цепи гальванического элемента электроны переходят от анода к катоду. В растворе анионы движутся к аноду, а катионы - к катоду. Данный гальванический элемент не содержит границы раздела между разными растворами. Если замкнуть его электроды проводником бесконечно большого сопротивления, то при изобарно-изотермических условиях он будет работать *обратно* (при термодинамическом равновесии). В таком случае наибольшая часть теплоты протекающей в нем токообразующей реакции превращается в электрическую работу. Иными словами, электрическая работа такого гальванического элемента максимальна (A_{\max}). Она равна изменению энергии Гиббса, которая измеряется в Дж и представляет собой произведение числа молей перенесенных электронов z , числа Фарадея F (количества электричества в 1 моле электронов, выраженное в Кл и равное 96500 Кл/моль) и электродвижущей силы процесса ΔE .

Следовательно,

$$-\Delta G = A_{\max} = z \cdot F \cdot \Delta E. \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает связь химической и электрической энергий. Тогда в соответствии с уравнением (3) получаем для стандартных условий

$$-\Delta G = z \cdot F \cdot \Delta E^0. \quad (4)$$

Гальванический элемент характеризуется не только ЭДС, но и напряжением, емкостью, энергией. Емкость элемента – это количество электричества, которое источник тока отдает при разрядке. Она определяется массой запасенных в элементе реагентов и степенью их превращения. Энергия элемента равна произведению его емкости на напряжение. Для сравнения элементов используется удельная энергия, то есть энергия, отнесенная к единице массы или объема элемента. Более высокую удельную энергию можно получить в элементах с большим значением ЭДС, малой массой моля эквивалентов и высокими степенями превращения реагентов. После расхода реагентов элемент не может больше работать.

Если окислитель и восстановитель хранятся вне элемента и в процессе работы подаются к электродам, которые не расходуются, то эле-

мент может работать длительное время. Такие элементы называют топливными. Установку, состоящую из батарей топливного элемента, систем хранения, обработки и подвода топлива и окислителя, отвода продуктов реакции, поддержания и регулирования температуры элементов, а также преобразования тока и напряжения, называют электрохимической энергоустановкой. Наиболее разработаны кислородно-водородные энергоустановки, которые уже применяются на космических кораблях. В последние годы большое внимание уделяется разработке электрохимических энергоустановок для электромобилей, работающих на водороде или метане.

Таким образом, гальванический элемент - это источник тока одностороннего действия или первичный источник тока, который можно охарактеризовать ЭДС, напряжением, емкостью, максимальной электрической работой, энергией Гиббса.

2. Термодинамические характеристики гальванического элемента

Если в элементе токообразующая реакция протекает изотермически и обратимо, то работу такого элемента можно охарактеризовать не только энергией Гиббса, но и тепловым эффектом, изменением энтропии и константой равновесия (ΔG , ΔH , ΔS , K) этой реакции.

Энергия Гиббса, тепловой эффект, изменение энтропии и константа равновесия (ΔG , ΔH , ΔS , K) протекающей в гальваническом элементе электрохимической реакции являются его термодинамическими характеристиками.

Так как $\Delta G = RT \ln K$, где T – абсолютная температура, то

$$RT \ln K = z \cdot F \cdot \Delta E^0 \quad (5)$$

где $z = n \cdot m$ – число молей электронов, участвующих в электрохимической реакции рассмотренного выше гальванического элемента.

Пользуясь уравнением (5), легко рассчитать константу равновесия K электрохимической реакции для стандартных условий:

$$K = e^{\frac{zF\Delta E^0}{RT}} \quad (6)$$

Константу равновесия электрохимической реакции, в которой активности участников реакции отличаются от 1, можно рассчитать по формуле:

$$K = e^{\frac{zF\Delta E}{RT}} \quad (7)$$

Чем больше константа равновесия K , тем более полно протекает реакция при температуре T (выход продуктов реакции больше или степень превращения веществ выше, более высокая удельная энергия гальванического элемента).

Запишем уравнение, объединяющее первый и второй законы термодинамики через энтальпию [1], и преобразуем его:

$$dH = TdS + Vdp, \quad (8)$$

$$dH - TdS = Vdp, \quad (9)$$

$$dH - TdS - SdT = -SdT + Vdp, \quad (10)$$

$$d(H - TS) = -SdT + Vdp, \quad (11)$$

Из формулы (11) очевидно, что в левой части уравнения представлен дифференциал энергии Гиббса ($G = H - TS$).

Тогда

$$dG = -SdT + Vdp, \quad (12)$$

т.е. $G = f(T, p)$ - её полный дифференциал:

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_T dp,$$

следовательно,

$$S = - \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p \quad (13)$$

Если подставить уравнение (13) в уравнение Гиббса $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, справедливое для изобарно-изотермических условий, то получим уравнение Гиббса-Гельмгольца:

$$\Delta G = \Delta H + T \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right)_p \quad (14)$$

Из уравнения (3) выразим ЭДС гальванического элемента:

$$\Delta E = - \frac{\Delta G}{zF} \quad (15)$$

Исходя из уравнений (14) и (15), можно получить выражение для ЭДС гальванического элемента:

$$\Delta E = - \frac{\Delta H}{zF} + T \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p \quad (16)$$

Тепловой эффект электрохимической реакции можно выразить из уравнения (16):

$$\Delta H = -zF \left[\Delta E - T \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p \right]. \quad (17)$$

Исходя из уравнений (3) и (13) можно получить выражение для вычисления изменения энтропии в ходе электрохимической реакции:

$$\Delta S = zF \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p. \quad (18)$$

Из уравнения (18) следует, что

$$\frac{\Delta S}{zF} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p. \quad (19)$$

В гальванических элементах, работа которых не связана с выделением или поглощением газов, изменения объема малы и можно пренебречь разницей между ΔH и ΔU . Тогда уравнение (17) принимает вид:

$$-\frac{\Delta U}{zF} = \left[\Delta E - T \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p \right]. \quad (20)$$

Величина $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p$ называется *температурным коэффициентом*

ЭДС гальванического элемента. Температурный коэффициент $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p$ может быть определен по зависимости ЭДС гальванического элемента от температуры. Величина $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p$ может быть положительной, отрицательной и равной нулю в зависимости от природы гальванического элемента [4].

При $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p = 0$, т. е. когда ЭДС элемента не зависит от температуры, $\Delta E = -\frac{\Delta U}{zF}$. В этом случае работа элемента происходит целиком за счет убыли внутренней энергии системы без выделения или поглощения теплоты.

При $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T} \right)_p < 0$, т.е. когда ЭДС элемента уменьшается с повышением температуры, работа элемента совершается тоже за счет убыли внутренней энергии системы, но сопровождается выделением тепло-

ты. В этом случае работа элемента и расход энергии на нагревание окружающей среды осуществляется за счет убыли внутренней энергии системы.

При $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T}\right)_P > 0$, т.е. когда ЭДС элемента возрастает с повышением температуры, элемент работает с поглощением теплоты. В этом случае соотношения $\Delta E = -\frac{\Delta U}{zF}$ и $T\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T}\right)_P$ определяют характер работы и направление изменения внутренней энергии системы:

$$1) \Delta E = T\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T}\right)_P, \text{ внутренняя энергия работающего элемента при}$$

постоянной температуре не изменяется: $\Delta U = 0$. Работа элемента совершается целиком за счет теплоты, поглощаемой из окружающей среды;

$$2) \Delta E > T\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T}\right)_P, \text{ внутренняя энергия элемента при его работе}$$

убывает, $\Delta U < 0$, и работа совершается частично за счет убыли внутренней энергий и частично за счет поглощения теплоты извне;

$$3) \Delta E < T\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T}\right)_P \text{ внутренняя энергия элемента при его работе воз-}$$

растает, $\Delta U > 0$, т.е. элемент поглощает теплоту в количестве, превышающем совершаемую им работу. Избыток поглощенной теплоты идет на повышение внутренней энергии системы. Здесь работа совершается, и процесс протекает самопроизвольно, несмотря на эндотермичность химической реакции.

Величина $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T}\right)_P$ приближенно может быть вычислена по формуле

$$\frac{d\Delta E}{dT} = \frac{\Delta E_2 - \Delta E_1}{T_2 - T_1}. \quad (21)$$

где ΔE_1 и ΔE_2 — значения ЭДС гальванического элемента при температурах T_1 и T_2 . Расчет будет тем точнее, чем меньше отличаются между собой температуры T_1 и T_2 , т.к. зависимость $\Delta E = f(T)$ является линейной только для небольших интервалов температур.

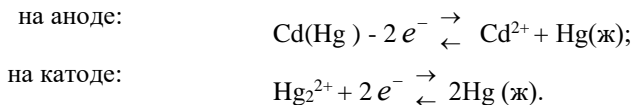
Таким образом, величина *температурного коэффициента ЭДС* гальванического элемента может быть положительной, отрицательной и равной нулю в зависимости от природы гальванического элемента. Если в элементе токообразующая реакция протекает изотермически и обратимо, то работу такого элемента можно охарактеризовать *энергией Гиббса, тепловым эффектом, изменением энтропии и константой равновесия* (ΔG , ΔH , ΔS , K) этой реакции. Каждой окислительно-восстановительной реакции можно сопоставить ту или иную электрохимическую цепь (обратимый гальванический элемент), и, измеряя напряжение этой цепи, найти термодинамические характеристики процесса.

3. Измерение ЭДС гальванического элемента

Изменение термодинамических величин электрохимических реакций весьма точно можно определить, измеряя электродвижущие силы гальванических элементов, в которых протекают эти реакции. При измерении ЭДС с помощью обыкновенного вольтметра через электроды протекает ток, вырабатываемый элементом, что приводит к сдвигу потенциалов электродов от равновесных значений. Измерение ЭДС гальванического элемента в условиях равновесия, протекающей на его электродах окислительно-восстановительной реакции, достигается применением *компенсационного метода Поггендорфа*. Суть компенсационного метода заключается в уравнивании (компенсации) ЭДС исследуемого гальванического элемента с помощью ЭДС аккумулятора, включенного в измерительную цепь. В момент равенства ЭДС, их противоположный знак приводит к тому, что через гальванометр течет ток бесконечно малой величины. Для измерения необходимо иметь некоторый эталон ЭДС. В качестве эталонного гальванического элемента используют *стандартный* (ранее называемый *нормальным*) *гальванический элемент Вестона*, имеющий постоянную и воспроизводимую величину ЭДС.



Здесь анод - амальгама кадмия, а катод - металлическая ртуть. При замыкании цепи протекают полуреакции:



ЭДС элемента Вестона при температуре 293 К составляет 1,0183 В и очень слабо зависит от температуры [2]. Для точного измерения ЭДС гальванического элемента применяют *высокоомный потенциометр Р-307*, вид лицевой панели которого показан на рис. 1.

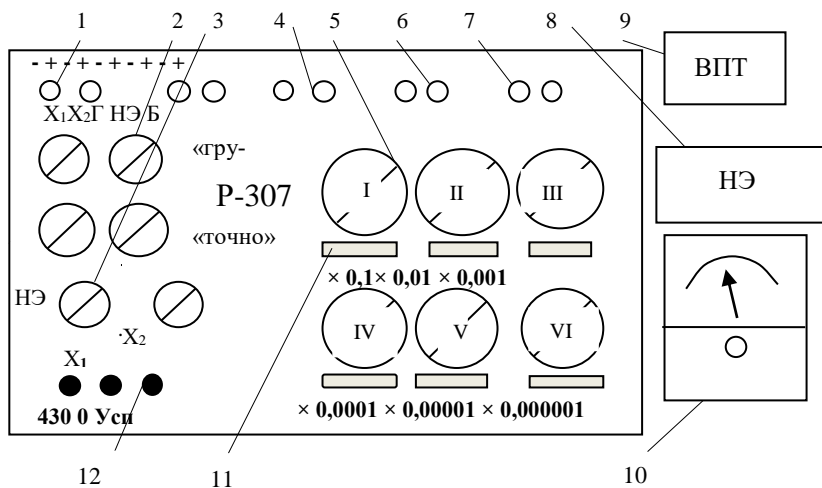


Рис. 1. Вид лицевой панели потенциометра Р-308: 1 – гнезда «X₁» и «X₂» для подключения электродов гальванического элемента; 2 – ручки сопротивлений «грубо» «точно» для калибровки потенциометра; 3 – переключатель работы потенциометра на стандартный (НЭ) или исследуемый элемент «НЭ» или «X₂»; 4 - гнезда «Г» для подключения гальванометра; 5 - ручки сопротивлений (декады) с окнами для измерения численных значений ЭДС; 6 - гнезда «X₁» для подключения стандартного элемента Вестона; 7 - гнезда «Б» и для подключения аккумулятора; 8 - стандартный элемент Вестона; 9 – выпрямитель переменного тока; 10 - гальванометр; 11 – окна цифровых значений ЭДС; 12 - кнопки замыкания измерительной цепи «430» и «0» и успокоения колебаний стрелки гальванометра «Успокоения».

Работа прибора основана на принципе компенсации, когда в момент измерения ЭДС ток в цепи исследуемого гальванического элемента имеет бесконечно малую величину (ноль на нуль-инструменте (гальванометре)). Собирая измерительную схему, присоединяют к клеммам «Б» батарею или выпрямитель на 2,5 – 3,5 В, к клеммам «НЭ» - стандартный элемент Вестона. Гальванометр присоединяют к соответствующим клеммам «Г». После этого подключают потенциометр через выпрямитель к электрической сети. На измерительные ручки (5) потенциометра подается от выпрямителя рабочий ток, обеспе-

чивающий на суммарном сопротивлении этих ручек напряжение, равное ЭДС элемента Вестона, т.е. 1,0186 В.

Измерительные ручки называют *декадами*, так как каждая из них имеет 10 положений. Каждое из положений первой декады (I), обеспечивает сопротивление, которое умноженное на рабочий ток, дает компенсационное значение ЭДС, равное 0,1 В.

Следовательно, ручка (I), позволяет компенсировать от 0,1 до 1 В. Декада (II) позволяет компенсировать от 0,01 до 0,1 В и т.д. Поэтому измеренное цифровое значение ЭДС, указанное в окошке для первой декады, следует умножать на 0,1, для второй – на 0,01 и т.д. При измерении исследуемый гальванический элемент подключают к зажиму X₁, учитывая знаки полярности «+» и «-», на панели прибора и подключаемом гальваническом элементе. Ручками декад переключателей I – VI проводят уравнивание измеряемой ЭДС при последовательном увеличении чувствительности, добиваясь отсутствия тока в цепи при кратковременном замыкании кнопкой «0». Значение измеряемой величины считывается по цифрам в окошечках.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18	Термодинамика гальванического элемента
-----------------------------	--

Цель работы – изучение влияния температуры на термодинамические характеристики гальванического элемента.

Для изучения влияния температуры на термодинамические характеристики гальванического элемента необходимо решить следующие задачи. Во-первых, собрать указанный в задании гальванический элемент и измерить его ЭДС при разных температурах. Во-вторых, определить температурный коэффициент $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T}\right)_P$ и рассчитать изменения термодинамических функций ΔG , ΔH , ΔS электрохимической реакции.

Приборы и реактивы

1. Платиновые электроды с соединительными проводами (2 шт.).
2. Большие стеклянные пробирки с широким горлом (2 шт.).
3. Термостат.
4. Потенциометр Р-308.
5. Выпрямитель переменного тока.

6. Стандартный элемент (элемент Вестона).
7. Растворы солей для приготовления гальванического элемента.
8. Стеклоанная трубка солевого мостика.
9. Насыщенный раствор КСl.
10. Фильтровальная бумага для изготовления пробок солевого мостика.

Ход выполнения работы

1. Используя таблицу стандартных электродных потенциалов [3], запишите электрохимическую цепь указанного в задании гальванического элемента, уравнения протекающих на электродах полуреакций, токообразующей реакции и определите z . Рассчитайте стандартную величину ЭДС исследуемого элемента и найдите константу равновесия K_a протекающей в нем реакции.

2. Соберите гальванический элемент. Для этого в две большие пробирки с широким горлом налейте соответствующие водные растворы солей заданной концентрации. Опустите в растворы платиновые электроды. Поместите пробирки с электродами в гнезда крышки термостата. Изготовьте солевой (электролитический) мостик, заполнив П-образную стеклянную трубку насыщенным раствором КСl. В отверстия стеклянной трубки нужно вставить пробки из фильтровальной бумаги так, чтобы в солевом мостике не было пузырьков воздуха. Соедините пробирки солевым мостиком, подключите исследуемый гальванический элемент к зажиму X_1 потенциометра Р-308, учитывая знаки полярности «+» и «-», на лицевой панели прибора и подключаемом гальваническом элементе.

3. Подключите вилки сетевых шнуров источника постоянного тока (батареи) и термостата к сети ~ 220 В. На лицевой панели источника тока включите тумблер «Вкл.». Измерьте ЭДС собранного гальванического элемента в интервале температур, указанном в задании, повышая температуру воды в термостате. Температура воды в термостате точно измеряется с помощью отдельного термометра. Запишите измеренные значения ЭДС и соответствующие им температуры. По окончании измерений тумблер, расположенный на лицевой панели источника тока, переведите в положение «Выкл.». Отключите вилки сетевых шнуров источника постоянного тока и термостата от сети ~ 220 В.

4. Постройте график зависимости $\Delta E = f(T)$ и определите температурный коэффициент $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T}\right)_P$. Рассчитайте изменения термодинамических функций ΔG , ΔH , ΔS и K_a электрохимической реакции по формулам, приведенным в теоретической части. Экспериментальные данные и расчетные величины представьте в таблице 1.

5. Оформите отчет о проведенной работе. Отчет должен содержать: задание, принципиальную схему компенсационного способа Потендорфа, список используемых вами приборов, реактивов, электрохимическую цепь исследуемого гальванического элемента, уравнения электродных процессов, график зависимости $\Delta E = f(T)$, формулы, расчеты, таблицу и выводы.

Таблица 1.

Экспериментальные данные и термодинамические характеристики гальванического элемента

№ опыта	T, К	E, В	$\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial T}\right)_P$, В К ⁻¹	ΔG , Дж/моль	A_{mp} , Дж/моль	ΔH , Дж/моль	ΔS , Дж/мольК	K_a

Контрольные вопросы

1. Как связаны между собой энергия Гиббса электрохимической реакции и ЭДС гальванического элемента?
2. Как можно рассчитать ΔG , ΔH , ΔS электрохимической реакции?
3. Как ЭДС гальванического элемента зависит от температуры?
4. Как определить температурный коэффициент ЭДС?
5. Как связаны между собой знак температурного коэффициента и природа электрохимической реакции, протекающей в гальваническом элементе?
6. Каков принцип действия потенциометра Р-307?
7. Чему равна энтропия реакции $Cd + 2AgCl = CdCl_2 + 2Ag$, обратимо протекающей в гальваническом элементе при 298 К, если его стандартная ЭДС равна 0,6753 В, а стандартные энтальпии образования $CdCl_2$ и $AgCl$ равны -389,7 и -126,9 кДж моль⁻¹ соответственно?
9. Чему равны энтальпия и энтропия реакции $CuSO_4 + Zn = ZnSO_4 + Cu$, обратимо протекающей в гальваническом элементе, если ЭДС элемента равна 1,0960 В при 273 К и 1,0961 В при 276 К?

10. Чему равна ЭДС элемента, в котором обратимо протекает реакция $\text{Pb} + 2\text{AgCl} = \text{PbCl}_2 + 2\text{Ag}$ при 293,2 К, если при 298,2 К она равна 0,4901 В. Энтальпию реакции равна – 105,1 кДж моль⁻¹.

11. Чему равны энтальпия, энтропия реакции, протекающей в гальваническом элементе $\text{Pb}|\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2||\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2|\text{Cu}$ при 298 К, если ЭДС элемента при 298 К равна 0,4805 В и температурный коэффициент равен $4,1 \cdot 10^{-4}$. Чему равна максимальная полезная работа, совершаемая элементом при этой температуре.

12. Как записать электрохимическую цепь, с помощью которой можно совершить электрическую работу 295290 кДж/моль. Напишите катодный и анодный процессы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еремин В.В., Каргов С.И., Успенская И.А., Кузьменко Н.Е., Лунин В.В. Основы физической химии: учебное пособие: Ч. 1. -М.: БИНОМ, 2013. – 320 с.
2. Практические работы по физической химии: учеб. пособие для вузов / А.А. Равдель, А.М. Пономарева; под ред. К.П. Мищенко. - М.: Высш. шк., 2002 - 384 с.
3. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. - М.: Химия, 2002. - 327 с.
4. Физическая химия: практикум / Ю.В. Рублинецкая, Н.А. Расцепкина, Б.М. Стифатов, Е.О. Ильиных, В.В. Слепушкин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – 200 с. ISBN 978-5-7964-2178-9.
5. Физическая химия металлургических производств: Курс лекций /В.В. Слепушкин, Ю.В. Рублинецкая, М.А. Лосева; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2004. – 112 с. ISBN 5-7064-0595-0.

Термодинамика гальванического элемента

Составители: *РУБЛИНЕЦКАЯ Юлия Вячеславовна*
РАСЦЕПКИНА Наталья Афанасьевна
СТИФАТОВ Борис Михайлович
ИЛЬИНЫХ Елена Олеговна

Печатается в авторской редакции
Компьютерная верстка Стифатов Б.М.

Подп. в печать 08.04.19
Формат 60x84 1/16. Бум. типор. №2
Усл. п. л. 0,94. Уч.-изд. л. 0,87
Тираж 50 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100. г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус.

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
443100. г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус №8.