

Научные технологии в машиностроении. 2022. №11 (137). С. 16-24.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №11 (137). P. 16-24.

Научная статья
УДК 66.012.3
doi:10.30987/2223-4608-2022-11-16-24

Влияние формы электродов и их расположения на энергетический баланс получения графитового порошка электролизом

Андрей Викторович Купряшов¹, аспирант,
Иван Яковлевич Шестаков², д.т.н.,
Сергей Владимирович Телегин³, к.т.н.

^{1, 2, 3} Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

¹ KupryashovAndrey@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1296-4942>

² yakovlevish@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7759-95159>

³ sey_62@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8171-2370>

Аннотация. Представлена методология расчёта энергетического баланса процесса получения графитового порошка электролизом. Данные энергетического анализа необходимы для оценки энергетической эффективности электрохимического устройства и выявления резервов снижения удельного расхода электроэнергии. Определены закономерности распределения энергии внутри системы электролизёра.

Ключевые слова: энергетический баланс, электрохимическая реакция, удельный расход электроэнергии, тонкодисперсный графитовый порошок

Для цитирования: Купряшов А.В., Шестаков И.Я., Телегин С.В. Влияние формы электродов и их расположения на энергетический баланс получения графитового порошка электролизом // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – №11 (137). – С. 16-24. doi: 10.30987/2223-4608-2022-11-16-24.

Original article

The influence of the shape of the electrodes and arrangement on the energy balance of obtaining graphite powder by electrolysis

Andrey V. Kupriashov¹, postgraduate student,
Igor Ya. Shestakov², Dr.Sc.Tech.,
Sergey V. Telegin³, Can.Sc.Tech.

^{1, 2, 3} Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

¹ KupryashovAndrey@yandex.ru, ² yakovlevish@mail.ru, ³ sey_62@mail.ru

Abstract. the authors present a method for calculating the energy balance of the process of obtaining graphite powder by electrolysis. Energy balance data are important for assessing the energy efficiency of an electrochemical device and identifying reserves for reducing the specific energy consumption. The regularities of energy distribution inside the electrolyzer system are determined.

Keywords: energy balance, electrochemical reaction, specific power consumption, fine graphite powder

For citation: Kupriashov A.V., Shestakov I.Ya., Telegin S.V. The influence of the shape of the electrodes and arrangement on the energy balance of obtaining graphite powder by electrolysis. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 11 (137), pp. 16-24. doi: 10.30987/2223-4608-2022-11-16-24.

Введение

Альтернативным способом получения частиц тонкодисперсного графитового порошка однородной формы является применение методов электрохимического окисления частиц графита [1]. Развитие методологии производства графена электрохимическими способами привело к появлению возможности получения тонкодисперсного графитового порошка, с помощью электрохимического воздействия.

При проектировании электролизёров для производства тонкодисперсного графитового порошка большое значение имеют данные энергетического баланса, которые позволяют точно оценить энергетическую эффективность устройства и выявить резервы для снижения удельного расхода электроэнергии. То есть ко-

$$U = E_a^P - E_k^P + \eta_a - \eta_k + \Delta U_{el} + \Delta U_m + \Delta U_{ed} + \Delta U_c, \quad (1)$$

где $E_a - E_k = E^P$ – напряжение разложения, т.е. разница бестоковых потенциалов анода и катода, В; η_a, η_k – поляризация анода и катода, В; ΔU_{el} – омическое падение напряжения в электролите, В; ΔU_m – омическое падение напряжения в диафрагме, В; ΔU_{ed} – омическое падение напряжения в теле электрода, В; ΔU_c – омическое напряжение в контактах, В.

Энергетический баланс формируется исходя из зависимостей множества физических величин, но наибольшее значение в энергетический вклад вносит значение силы тока и поля температур системы [5].

При электрохимическом синтезе тонкодисперсного графитового порошка в отличие от стандартного процесса получения химического продукта электролизом, не происходит полное разложение и появление новых сложных химических соединений, а происходит лишь электрохимическом расслоении графитового электрода под действием электрического поля и воздействия атомов газообразных соединений кислорода. Поэтому напряжение разложения E^P и показатели поляризации электродов η_i в (1) заменим на показатель – напряжение электрохимической реакции.

Суть энергетического баланса в том, что приход энергии извне равен суммарной энергии процессов внутри электролизера. Учитывая описанное выше можно прийти к уравнению энергетического баланса процесса получения графитового порошка электролизом [6]:

$$E_e = E_s + E_{el} + E_m + E_r + E_{ed} + E_{eh} + E_c, \quad (2)$$

личественная оценка и анализ составляющих энергетического баланса позволяет определить возможности снижения удельных затрат электроэнергии на синтезирование новых химических соединений [2].

Стандартная методика расчёта энергобаланса электролизёров описана в работах [3, 4]. В рамках данной методики, известно, что процессы электрохимического синтеза химических продуктов характеризуются затратами электроэнергии, для определения которых составляется баланс напряжений электрохимического устройства [4].

Постановка задачи

Напряжение на электролизёре определяется по формуле:

где E_e – затраченная энергия внешней сети; энергия внутренних процессов электролизера; E_s – расход энергии на электрохимические реакции; E_{el} – тепловая энергия, выделившаяся в электролите; E_r – потери электроэнергии в электролите; E_m – потери электроэнергии в диафрагме электролизёра; E_{ed} – потери электроэнергии в материале электрода; E_{eh} – потери электроэнергии, идущие на нагрев графитового анода; E_c – потери энергии в контактах.

Уравнение энергетического баланса связывает между собой три категории трансформации энергии:

- 1) изменение полной полезной энергии, выходящей из системы по отношению к полной энергии поступающих в систему;
- 2) полезная работа, совершаемая электрохимической системой (E_s);
- 3) обмен тепловой энергии внутри системы.

Расчёт энергетического баланса для электролизёра с коаксиальным расположением электродов

Графитовый порошок получен электрохимическим методом – анодным окислением кристаллического графита высокопрочного тонкодисперсного плотного марки МПГ-6. Рассмотрено два основных способа получения графитового порошка, с использованием устройства с коаксиальным (рис. 1) и плоскопараллельным расположением электродов (рис. 2).

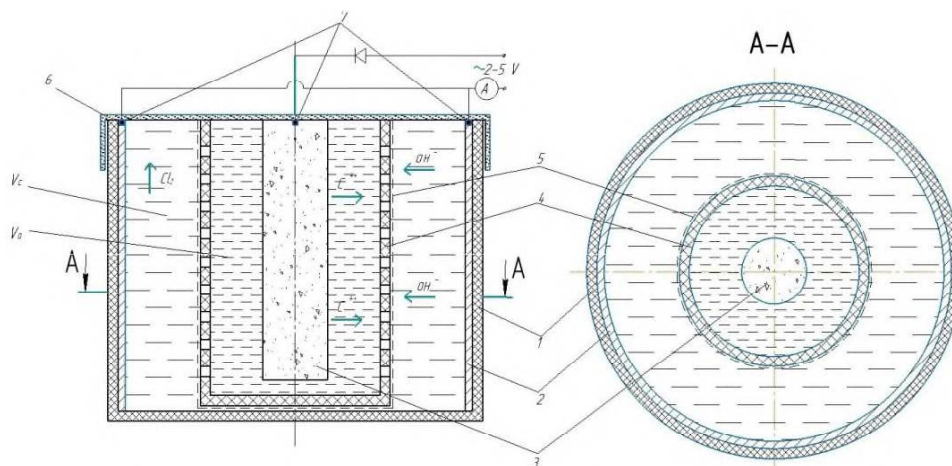


Рис. 1. Принципиальная схема устройства с коаксиальным расположением электродов:

1 – корпус из фторопласта; 2 – катод из нержавеющей стали; 3 – анод из графита; 4 – цилиндрическая перфорированная ёмкость; 5 – диафрагма из дакрона; 6 – пластиковая крышка; 7 – токоподводы; V_c – объём прикатодного пространства; V_a – объём прианодного пространства

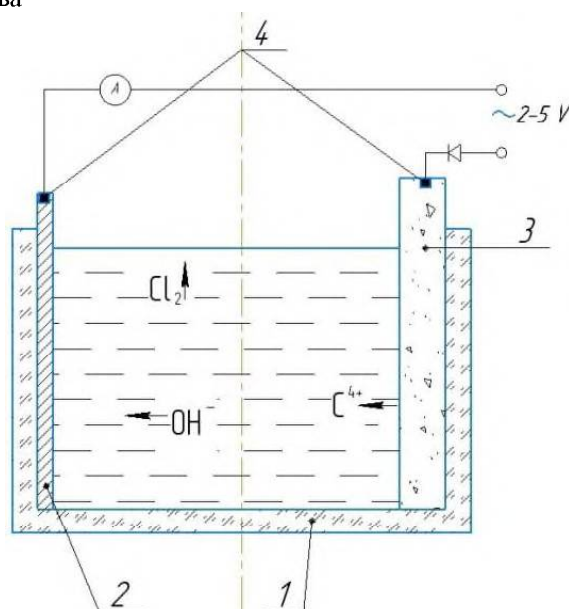


Рис. 2. Принципиальная схема устройства с параллельным расположением электродов:

1 – корпус; 2 – катод из нержавеющей стали; 3 – анод из графита; 4 – токоподводы

Подробно об особенностях, результатах и сути электрохимического метода получения графитового порошка изложено в [7]. Определим особенности методов расположения электродов, с помощью анализа составляющих энергетического баланса.

В качестве примера рассмотрим электрохимический процесс получения порошка графита при коаксиальном расположении электродов с анодом $\varnothing 11$ мм и высотой 93 мм (рис. 3).

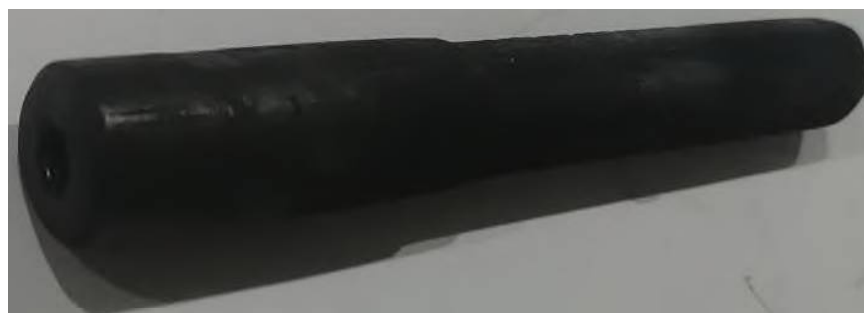


Рис. 3. Графитовый анод цилиндрической формы

Расчёт для случая использования в качестве электролита – 25 %-ного водного раствора хлорида натрия (NaCl).

Тепловая энергия, выделившаяся в электролите:

$$E_{el} = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где c – удельная теплоёмкость электролита, кДж/кг·°C; m – масса электролита, г; $\Delta T = T_k - T_n$ – разность температур электролита, °C; T_k – температура электролита в конце процесса; $T_n = 23,52$ °C – температура электролита в начале процесса; удельная теплоёмкость 25 %-ного водного раствора NaCl равна $c = 3,282$ кДж/кг·°C; масса электролита определяется как:

$$m = \rho \cdot V, \quad (4)$$

где V – объём электролита:

$V = 770$ мл = $0,00077$ м³; ρ – плотность 25 %-ного водного раствора NaCl: $\rho = 1180$ кг/м³.

Масса электролита: $m = 0,0908$ кг. T_k прием равной среднему значению между температурами анолита и католита [8]: $T_k = 23,7$ °C.

Разность температур электролита ΔT : $\Delta T = 0,18$ °C.

Тепловая энергия, выделившаяся в электролите:

$$E_{el} = 3,282 \cdot 0,908 \cdot 0,18 = 0,537 \text{ кДж}.$$

Энергия, связанная с потерями в электролите:

$$E_r = \frac{\Delta U_r^2}{R} \cdot \tau, \quad (5)$$

где ΔU_r – падение напряжения в электролите, В; R – электрическое сопротивление раствора, Ом;

Падение напряжение в электролите:

$$\Delta U_r = I \cdot R \cdot K_g, \quad (6)$$

где I – сила тока по результатам опытов равна $0,169$ А; K_g – коэффициент газонаполнения, прием равным $1,1$ по [8].

При электросинтезе на диафрагменном электролизёре, уравнение падения напряжения в электролите примет вид [8]:

$$\Delta U_r = \frac{j \cdot (l - h) \cdot K_g}{\xi}, \quad (7)$$

где j – плотность тока, $49,65 \cdot 10^{-4}$ А/м²; l – расстояние между электродами равно $4,15$ см; h – расстояние от анода до крайней точки

диафрагмы составляет $2,1$ см.

Падение напряжение в электролите: $\Delta U_r = 0,0525$ В.

Электрическое сопротивление раствора:

$$R = r \cdot \frac{l}{S}, \quad (8)$$

где r – удельное сопротивление, Ом/см; S – площадь поперечного сечения электролита равная 70 см².

Удельное сопротивление величина обратно пропорциональная удельной электропроводности:

$$r = \frac{1}{\xi} \quad (9)$$

Удельная электропроводность 25 %-ного водного раствора хлориданатрия $\xi = 21,35$ см/м [9]:

Удельное сопротивление: $r = 4,684$ Ом/см; электрическое сопротивление раствора:

$$R = 0,2777 \text{ Ом}.$$

Энергия, связанная с потерями в электролите: $E_r = 0,021$ кДж

Потери электроэнергии в диафрагме электролизёра (E_m):

$$E_m = \Delta U_m \cdot I \cdot \tau, \quad (10)$$

где ΔU_m – падение напряжения в диафрагме, В; τ – время электрохимического процесса равно 35 мин.

Падение напряжения в диафрагме [8]:

$$\Delta U_m = \rho_m \cdot v \cdot j \quad (11)$$

где ρ_m – удельное сопротивление диафрагмы, Ом; v – толщина диафрагмы равная $0,002$ м.

Диафрагма представляет из себя пластиковый корпус с большим количеством отверстий, обтянутый лавсаном (или дакроном). Тканевый материал диафрагмы пропитан раствором электролита.

Электрическое сопротивление диафрагмы определяется [8]:

$$\rho_m = \frac{r \cdot \beta^2}{o} \quad (12)$$

где β – коэффициент извилистости пор, т.е. отношение длины пор диафрагмы к толщине пор, $1,5$ – для лавсановых диафрагм [10]; o – пористость диафрагмы, $0,2$ – для лавсановых диафрагм [10].

Электрическое сопротивление диафрагмы: $\rho_m = 0,527$ Ом·м; падение напряжения в диафрагме: $\Delta U_m = 0,0524$ В.

Итак, потери электроэнергии в диафрагме электролизёра (E_m): $E_m = 0,019$ Дж.

Потери электроэнергии в материале электрода (E_{ed}) [10]:

$$E_{ed} = I^2 \cdot R_g \cdot \tau \quad (13)$$

где R_g – сопротивление графитового анода, Ом:

$$R_g = r \cdot \frac{l_a}{S_a} \quad (14)$$

где l_a – длина графитового анода, 0,093 м; S_a – площадь анода, 0,003404 м².

Потери электроэнергии на стальном катоде не учитываются из-за высокой электропроводности металлов [4].

Удельное сопротивление графита: $r = 60 \cdot 10^{-5}$ Ом·м [9].

Сопротивление графитового анода: $R = 0,0164$ Ом.

Потери электроэнергии в материале электрода: $E_{ed} = 0,001$ кДж.

Потери электроэнергии, идущие на нагрев графитового анода (E_{eh}) [10]:

$$E_{eh} = c \cdot m \cdot \Delta T_a \quad (15)$$

где c – удельная теплоёмкость графитового анода, 0,71 кДж/кг · °С [9]; m – масса графитового анода, 0,022 кг; ΔT_a – нагрев графитового анода по результатам опытов, 3,56 °С.

Таким образом, потери электроэнергии, идущие на нагрев графитового анода (E_{eh}): $E_{eh} = 0,056$ кДж.

Потери энергии в контактах E_c [10]:

$$E_c = \Delta U_c \cdot I \cdot \tau \quad (16)$$

где ΔU_c – омическое падение напряжения в контактах, принято оценивать условной величиной, равной 0,05...0,20 В. Примем для расчёта $\Delta U_c = 0,2$ В.

Потери энергии в контактах E_c : $E_c = 0,071$ кДж.

Энергия на химические реакции (E_s) [7]:

$$E_s = E^p \cdot I \cdot \tau \quad (17)$$

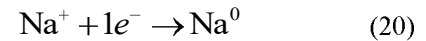
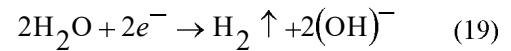
Значения равновесных потенциалов электродов могут быть рассчитаны по изменению изобарно-изотермического потенциала электрохимической реакции, т.е. энтальпия реакции преобразуется в напряжение [10]:

$$E^p = -\frac{\Delta G}{z \cdot F} \quad (18)$$

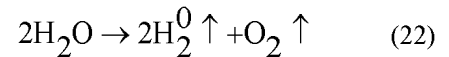
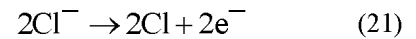
где ΔG – энтальпия реакции, Дж/моль; z – число моль электронов, моль; F – число Фарадея, $F = 26,8$ А·ч/моль (96 500 Кл/моль).

Электрохимический процесс на электродах в водном растворе хлорида натрия описывается уравнениями ниже.

Катодная реакция:



Реакция на аноде:



Напряжение разложения – это минимальное напряжение, при котором происходит электролиз с образованием частиц графитового порошка и выделением H_2 , O_2 . Оно включает поляризацию на электродах и зависит от материала, температуры и давления [6]. При температуре раствора близкой к значению 298 К для катодного процесса $\Delta G = 0$, а для анодного процесса ΔG определяется исходя из энтальпии разложения электролита.

Число молей вещества определяется по формуле:

$$z = \frac{m_s}{M_s} \quad (23)$$

где m_s – масса вещества, г; M_s – молярная масса вещества, г/моль;

Энергия разложения выражается через молярную массу составляющих электролита:

$$E^p = \frac{\Delta G_{\text{H}_2\text{O}}}{\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot F} + \frac{\Delta G_{\text{NaCl}}}{\frac{m_{\text{NaCl}}}{M_{\text{NaCl}}} \cdot F}, \quad (24)$$

где $\Delta G_{\text{H}_2\text{O}} = 237\,000$ Дж – энтальпия разложения H_2O [9]; $\Delta G_{\text{NaCl}} = 766\,000$ Дж – энтальпия разложения NaCl [9]; $m_{\text{H}_2\text{O}} = 681$ г и $m_{\text{NaCl}} = 227$ г – масса воды и соли; $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$ г/моль и $M_{\text{NaCl}} = 58,5$ г/моль – молярная масса воды и соли.

Для 25 %-ого водного раствора хлорида натрия массой 0,908 кг: $E^p = 2,11$ В.

Итого, энергия на химические реакции (E_s):

$$E_s = 2,11 \cdot 0,169 \cdot 35 \cdot 60 = 0,749 \text{ кДж.}$$

Затраченная энергия внешней сети рассчитывается по формуле:

$$E_e = U_e \cdot I \cdot \tau, \quad (25)$$

где U_e – напряжение внешней сети, 4,1 В.

Затраченная энергия внешней сети:
 $E_e = 1,455$ кДж.

Итого, результат энергетического баланса:
 $1,455$ кДж \approx $0,749$ кДж + $0,537$ кДж + $0,021$ кДж +
 $+0,019$ кДж + $0,001$ кДж + $0,056$ кДж + $0,071$ кДж

Значение полной энергии выходящих из системы потоков равно полной энергии поступающих в систему потоков. Энергия на химические реакции (E_s) составляет большую часть совершаемой электрохимической системой полезной работы, выходящей из системы ~ 52 %. Это говорит о высокой эффективности электрохимической системы с коаксиальным расположением электродов, т.к. значительный процент полученной электрической энергии

преобразуется в полезную энергию химической реакции.

Энергия, потраченная на нагрев системы выше, чем все остальные составляющие потерь электроэнергии – $0,168$ кДж. Это говорит о том, что часть электрической энергии по закону сохранения и превращения энергии преобразовывается в тепловую энергию, необходимую для осуществления электросинтеза.

Расчёт энергетического баланса для электролизёра с плоскопараллельным расположением электродов

Рассмотрен электросинтез при плоскопараллельном расположении электродов с графитом шириной 50 мм, длиной 147 мм, толщиной 13 мм (рис. 4).



Рис. 4. Плоский графитовый анод

Также в качестве электролита используется 25 %-ый водный раствор хлорида натрия. Объём электролита V равен $0,00059$ м³. Плотность тока электрохимического процесса j равна $80,458 \cdot 10^{-4}$ А/м². Сила тока электрохимического процесса составляет $0,591$ А.

В установке с плоскопараллельным расположением электродов (рис. 2) отсутствует мембрана между анодным и катодным пространствами, поэтому в (5) потери электроэнергии в диафрагме электролизёра (E_m) отсутствуют.

Исходные данные для анализа: $l = 11$ см – расстояние между электродами; $S = 77$ см² – площадь поперечного сечения электролита; разность температур электролита ΔT :

$\Delta T = 25,55 - 25,21 = 0,34$ °С; $K_g = 1,0$ – коэффициент газонаполнения, для открытой конструкции; $l_a = 0,147$ м – длина графитового анода; $S_a = 0,00735$ м² – площадь анода; $m = 0,1383$ кг – масса графитового анода; $\Delta T_a = 1,25$ °С – нагрев графитового анода; $U_e = 4,1$ В – напряжение внешней сети. Масса электролита $m = 0,696$ кг. Энергия на нагрев электролита $E_{el} = 0,778$ кДж. Электрическое сопротивление раствора: $R = 0,670$ Ом.

Омическое падение напряжения ΔU_r в электролите при плоскопараллельном распо-

ложении электродов рассчитывается по формуле [8]:

$$\Delta U_r = \frac{j \cdot l \cdot K_g}{\xi} \quad (26)$$

Омическое падение напряжения ΔU_r в электролите: $\Delta U_r = 0,41454$ В.

Энергия, связанная с потерями в электролите:

$$E_r = \Delta U_r \cdot I \cdot \tau \quad (27)$$

Для нашего случая: $E_r = 0,514$ кДж.

Сопротивление графитового анода:
 $R = 0,012$ Ом.

Итак, потери электроэнергии в теле электрода: $E_{ed} = 0,01$ кДж.

Потери электроэнергии, полученные в результате нагрева графитового анода:
 $E_{eh} = 0,123$ кДж.

Омическое падение напряжения в контактах (электросети) ΔU_c примем для расчёта $\Delta U_c = 0,2$ В.

Потери энергии в контактах (электросети) E_c : $E_c = 0,248$ кДж.

Для 25 %-ого водного раствора хлорида натрия массой $0,696$ кг: $E^P = 2,753$ В.

Энергия на химические реакции равна:

$$E_s = 3,416 \text{ кДж.}$$

Масса полученного графитового порошка составляет $m = 0,03355$ г.

Затраченная энергия внешней сети:

$$E_e = 5,09$$

Итого, энергетический баланс при плоскопараллельном расположении электродов:

$$5,09 \text{ кДж} \approx 3,416 \text{ кДж} + 0,778 \text{ кДж} + 0,514 \text{ кДж} + 0,01 \text{ кДж} + 0,123 \text{ кДж} + 0,248 \text{ кДж.}$$

Значение полной энергии выходящих из системы потоков равно полной энергии посту-

пающих в систему потоков. Энергия на химические реакции (E_s) составляет большую часть совершаемой электрохимической системой полезной работы, выходящей из системы – 67 %. Это говорит об эффективности электрохимической системы с плоскопараллельным расположением электродов, т.к. значительный процент полученной электрической энергии преобразуется в полезную энергию химической реакции.

Результаты

Результаты энергетического баланса сведены в табл. 1

1. Сводная таблица энергетического баланса

Статьи баланса	Расположение электродов			
	Коаксиальное		Плоскопараллельное	
	Значение энергии, кДж	Массовая доля, %	Значение энергии, кДж	Массовая доля, %
Приходная энергия	1,455	100	5,09	100
Энергия внешнего электрического поля, затрачиваемая на получение графитового порошка (E_e)	1,455	100	5,09	100
Расходная энергия	1,454	100	5,089	100
Электрохимический процесс (E_s)	0,749	51,51	3,416	67,13
Тепловая энергия, выделившаяся в электролите (E_{ei})	0,537	36,93	0,778	15,29
Потери электроэнергии в электролите (E_v)	0,021	1,44	0,514	10,10
Потери электроэнергии в диафрагме электролизёра (E_m)	0,019	1,31	0	0,00
Потери электроэнергии в материале электрода (E_{ed})	0,001	0,07	0,01	0,20
Потери электроэнергии, идущие на нагрев графитового анода (E_{eh})	0,056	3,85	0,123	2,42
Потери энергии в контактах (E_c)	0,071	4,88	0,248	4,87
Небаланс	0,001		0,001	

Для определения влияния способа расположения электродов при электросинтезе необходимо оценить удельные энергозатраты W – затраты энергии на единицу массы получаемого продукта [7]:

$$W = \frac{U_e \cdot I \cdot \tau}{m} \quad (28)$$

В табл. 2 представлено распределение удельных энергозатрат электросинтеза 1 г графитового порошка.

2. Распределение удельных энергозатрат

Статьи баланса	Расположение электродов			
	Коаксиальное		Плоскопараллельное	
	$W, \text{Вт} \times \text{с} \times \text{г}^{-1}$	Массовая доля, %	$W, \text{Вт} \times \text{с} \times \text{г}^{-1}$	Массовая доля, %
Приходная энергия	132,51	100	151,71	100
E_e	132,51	100	151,71	100
Расходная энергия	132,42	100	151,68	100
E_s	68,22	51,51	101,82	67,13
E_{el}	48,91	36,93	23,19	15,29
E_r	1,91	1,44	15,32	10,10
E_m	1,73	1,31	0,00	0,00
E_{ed}	0,09	0,07	0,30	0,20
E_{eh}	5,10	3,85	3,67	2,42
E_c	6,47	4,88	7,39	4,87
Небаланс	0,09		0,03	

Сравнивая результаты расчётов можно сделать вывод о том, что при коаксиальном расположении $\sim 37\%$ расходной энергии преобразуется в тепловую энергию, что свидетельствует о том, что электрохимический процесс получения графитового порошка идет с новым эффектом и по сути электрохимическое устройство может являться нагревателем. Вследствие открытой конструкции электролизёра и свободном выведении газа при плоскопараллельном расположении электродов расходы энергии на тепловую энергию, выделившуюся в электролите меньше, чем при коаксиальном расположении и составляют $\sim 15\%$, поэтому энергия на электрохимический процесс получения тонкодисперсных частиц графита выше. Составляющие расходной энергии: E_{ed} , E_{eh} , E_c , сопоставимы и незначительны для двух методов расположения. Можно сделать вывод о том, что в связи с тем, что плотность тока при плоскопараллельном способе расположения электродов имеет большее значение чем при коаксиальном методе расположения, что потери электроэнергии в электролите E_r имеют высокое значение составляют значимую часть расходной энергии электролизёра $\sim 10\%$.

Заключение

Энергетический баланс электрохимической системы позволяет определить глубину происходящих процессов преобразования одних форм энергии в другие, а также обнаружить неконтролируемые потери энергии. Представленная методика может быть также применена для расчетов энергобалансов при проектировании электролизеров различных типов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Electrochemical** synthesis of multilayer graphene oxide by anodic oxidation of disperse graphite / Yakovlev A.V., Yakovleva E.V. et. al.// Russian Journal Electrochemistry. 2019. Vol. 55. No. 12. P. 1196-1202.
2. **Concept**, design, and energy analysis of an integrated power-to-methanol process utilizing a tubular proton-conducting solid oxide electrolysis cell / Schwabe F., Schwarze L. et. al.// International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 44. Is. 17. P. 12566-12575.
3. **Overall** mass balance evaluation of electrochemical reactors: The case of CO₂ reduction / Blom M.J.W., van Swaaij W.P.M. et. al.// Electrochimica Acta. 2020. Vol. 333. Article number 135460.
4. **Schmidt T.S.** Spurring low-carbon electrosynthesis through energy and innovation policy // iScience. Vol. 24. Article number 102045.
5. **Aulakh D.J., Boulama K.G., Pharoah J.G.** On the reduction of electric energy consumption in electrolysis: A thermodynamic study // International Journal of Hydrogen

Energy, 2021, Vol. 46, Is. 33, P. 17084-17096.

6. Horwood C. Chapter Eleven - Ionic liquids as electrolytes for electrochemistry // *Ionic Liquids in Analytical Chemistry*, 2022, P. 329-342.

7. Kupriashov A.V., Shestakov I.Y. Influence of electrode arrangement method on specific energy consumption and productivity in electrosynthesis of fine graphite powder // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, Vol. 119, P. 7615-7628.

8. Buttler A., Spliethoff H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 82, Part 3, P. 2440-2454.

9. Физическая химия. В 2-х книгах. Учебник для студентов ВУЗов. Книга 2. Электрохимия, химическая кинетика / Г.В. Булидорова, Ю.Г. Галяметдинов и др. – М.: «КДУ», «Университетская книга». – 2016. – 456 с.

10. Мартынова, Т.В., Козюхин, С.А., Артамонова, И.В. Физическая химия и физико-химические методы анализа. – М.: Московский Политех. – 2021. – 309 с.

REFERENCES

1. Yakovlev A.V., Yakovleva E.V., Tseluikin V.N., Krasnov V. V., Mostovoi A. S., Rachmetulina L.A., Frolov I.N. Electrochemical synthesis of multilayer graphene oxide by anodic oxidation of disperse graphite. *Russian Journal Electrochemistry*, 2019, Vol. 55, No. 12, pp. 1196–1202.

2. Schwabe F., Schwarze L., Partmann C., Lippmann W., Hurtado A. Concept, design, and energy analysis of an integrated power-to-methanol process utilizing a tubular proton-conducting solid oxide electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, Vol. 44, Is. 17,

pp. 12566-12575.

3. Blom M.J.W., van Swaaij W.P.M., Mul G., Kersten S.R.A. Overall mass balance evaluation of electrochemical reactors: The case of CO₂ reduction. *Electrochimica Acta*, 2020, Vol. 333, article number 135460.

4. Schmidt T. S. Spurring low-carbon electrosynthesis through energy and innovation policy. *iScience*, Vol. 24, article number 102045.

5. Aulakh D. J., Boulama K. G., Pharoah J. G. On the reduction of electric energy consumption in electrolysis: A thermodynamic study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, Vol. 46, Is. 33, pp. 17084-17096.

6. Horwood C. Chapter Eleven - Ionic liquids as electrolytes for electrochemistry. *Ionic Liquids in Analytical Chemistry*, 2022, pp. 329-342.

7. Kupriashov A.V., Shestakov I.Y. Influence of electrode arrangement method on specific energy consumption and productivity in electrosynthesis of fine graphite powder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, Vol. 119, pp. 7615-7628.

8. Buttler A., Spliethoff H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 82, Part 3, pp. 2440-2454.

9. Bulidorova G. V., Galyametdinov Yu. G., Yaroshevskaya H. M., Barabanov V. P. Physical chemistry. Book 2. Electrochemistry, chemical kinetics. Publ. KDU, The university book, 2016, 456 p.

10. Martynova T.V., Kozuyukhin S.A., Artamonova I.V. Physical chemistry and physical and chemical methods of the analysis, Publ. of the Moscow polytechnical university, 2021, 309 p.

Вклад авторов: Купряшов А.В. – разработка методологии исследования, сбор материала, проведение экспериментов, описание результатов и формулирование выводов исследования, написание статьи; Шестаков И.Я. – идея исследования, научное руководство исследованием; Телегин С.В. – проведение экспериментов, научное редактирование текста статьи.

Contribution of the authors: Kupryashov A.V. – development of research methodology, collection of material, conducting experiments, description of results and formulation of research conclusions, writing an article; Shestakov I.Ya. – idea of research, scientific guidance of research; Telegin S.V. – conducting experiments, scientific editing of the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.06.2022; одобрена после рецензирования 08.07.2022; принята к публикации 18.07.2022.

The article was submitted 29.06.2022; approved after reviewing 08.07.2022; assepted for publication 18.07.2022.