

ПРОВЕРКА УСЛОВИЙ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНА БУГЕРА–ЛАМБЕРТА–БЕРА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ «ТАУНИТ»

И. А. Дьяков, Д. В. Давыдова

*Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; nanogalvanotech@mail.ru*

Ключевые слова и фразы: блестящее покрытие оловом; закон Бугера–Ламберта–Бера; коэффициент пропускания; оптическая плотность; серноокислое лужение; углеродные нанотрубки.

Аннотация: Определение точных значений концентрации углеродных нанотрубок в растворах электролитов требует разработки методов и способов ее измерения. При определенных подходах возможно использование существующих методов, например абсорбционной спектрометрии, учитывающих особенности наноматериалов. Экспериментальное подтверждение выполнения основных законов светопоглощения растворами (суспензиями) электролитов с углеродными нанотрубками позволит применять метод абсорбционной спектрометрии.

Проведена проверка выполнения условий применимости объединенного закона Бугера–Ламберта–Бера в электролитах лужения и Sn–Bi с добавлением углеродных нанотрубок «Таунит». Выявлены причины нелинейной зависимости оптической плотности от концентрации нанотрубок. Предложен способ определения концентрации нанотрубок на интервале 0...1600 мг/л, состоящий в разбавлении чистым электролитом и приведении концентрации нанотрубок в область линейных изменений на интервале 0...100 мг/л.

Введение

Методы абсорбционной спектрометрии позволяют осуществлять анализ элементов в сложных пробах без химического разделения компонентов. Примером таких проб могут служить электролиты для электрохимического осаждения металлов совместно с углеродными нанотрубками (УНТ). Адекватность результатов зависит от выполнения ограничений и условий применимости закона Бугера–Ламберта–Бера. Ранее проводились исследования оптических свойств электролитов никелирования, хромирования, цинкования, лужения и анодного оксидирования [1 – 7]. В процессе исследований отмечены нелинейные зависимости оптической плотности от концентрации УНТ марки «Таунит». Объединенный закон Бугера–Ламберта–Бера предполагает линейную зависимость оптической плотности от концентрации раствора. Таким образом, требуется уточнить условия применимости методов абсорбционной спектрометрии для измерения концентраций нанотрубок в электролитах.

Цель работы: проверка ограничений и условий применимости объединенного закона Бугера–Ламберта–Бера при измерениях концентраций УНТ «Таунит» в водных растворах электролитов на примере процесса лужения.

Методика измерения оптических свойств электролита

Исследования проводились с использованием фотоэлектрического фотометра КФК-3 [8, 9]. Абсолютная погрешность измерений не превышала 0,5 %. Рабочая длина кювет составляла 10×10 мм. Рабочая длина волны для обоих электролитов 450 нм.

Состав сульфатного электролита (блестящее покрытие оловом): сульфат олова SnSO_4 – 35 г/л; серная кислота H_2SO_4 – 180 г/л; формалин 40%-й CH_2O – 6 мл/л; блескообразующая добавка «ЭКОМЕТ-Л6» – 45 мл/л.

Для покрытия сплавом Sn–Bi применяли электролит следующего состава: сульфат олова SnSO_4 – 35 г/л; сульфат висмута $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – 1,5 г/л; серная кислота H_2SO_4 – 180 г/л; формалин 40%-й CH_2O – 6 мл/л; блескообразующая добавка «ЭКОМЕТ-Л6» – 45 мл/л.

Концентрация УНТ «Таунит» [10] изменялась в диапазоне от 0 до 1600 мг/л с переменным шагом. Использовался следующий ряд концентраций: 0, 50, 70, 100, 400, 500, 700, 1000, 1300 и 1600 мг/л. Способ ввода – ультразвуковое диспергирование с параметрами: частота 22 кГц, амплитуда 80 мкм, интенсивность звука 786 Вт/см^2 .

Основной закон светопоглощения (Бугера–Ламберта–Бера) связывает уменьшение интенсивности света при прохождении через слой светопоглощающего вещества [11, 12]. Как правило, степень светопоглощения линейно зависит от концентрации вещества. На рисунке 1 показаны экспериментальные зависимости изменения оптической плотности электролитов лужения Sn и Sn–Bi по мере увеличения концентрации УНТ «Таунит». Очевидно, что полученные зависимости далеки от линейных, особенно для электролита Sn–Bi. Если для электролита лужения определение концентрации нанотрубок по измеренному значению оптической плотности не вызывает затруднений, даже при наличии нелинейности, то для электролита Sn–Bi решение неоднозначно. Например, если $E = 2$ бела (Б), то возможны несколько концентраций нанотрубок: 250, 530, 910, 1560 мг/л.

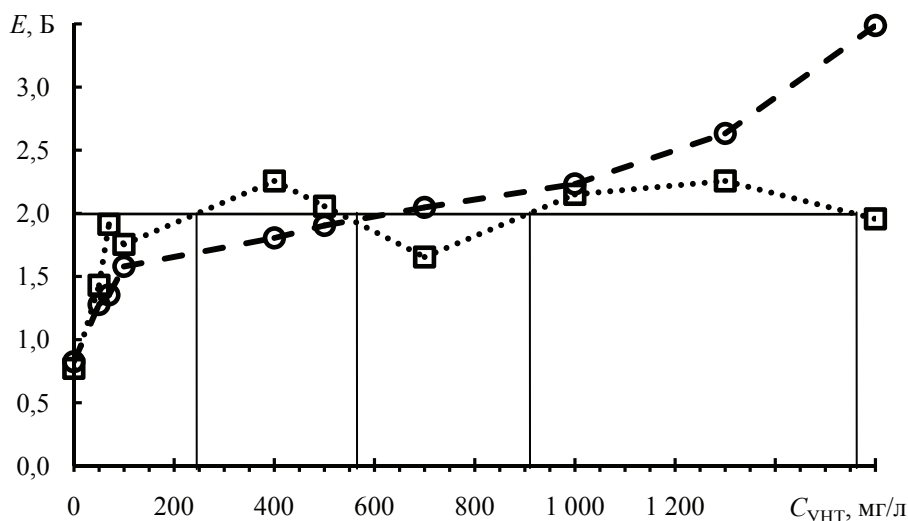


Рис. 1. Зависимость оптической плотности электролитов лужения и Sn–Bi от концентрации УНТ «Таунит»:
—○— Sn;□..... Sn–Bi

Следовательно, можно сформулировать два вопроса, ответы на которые позволят решить задачу измерения концентрации УНТ в электролитах:

- 1) Выполняется ли закон Бугера–Ламберта–Бера для электролитов?
- 2) Выполняется ли закон Бугера–Ламберта–Бера для водных суспензий УНТ «Таунит»?

Оба вопроса основаны на том, что компоненты электролитов лужения растворимы в воде, а УНТ нерастворимы. При этом закон аддитивности светопоглощения позволяет применять в растворах несколько окрашенных веществ, каждое из которых вносит свой вклад в результирующее значение оптической плотности E

$$E = E_э + E_{УНТ} \text{ или } E = l(\epsilon_э c_э + \epsilon_{УНТ} c_{УНТ}),$$

где $E_э$, $E_{УНТ}$ – оптические плотности электролита и суспензии УНТ соответственно; $\epsilon_э$ и $\epsilon_{УНТ}$ – молярные коэффициенты поглощения электролита и УНТ соответственно; $c_э$ и $c_{УНТ}$ – концентрации растворов электролита и УНТ соответственно; l – толщина светопоглощающего слоя.

Для ответа на первый вопрос проведены серии экспериментов с электролитами, не содержащими УНТ. Электролиты разбавляли дистиллированной водой и измеряли оптическую плотность. На рисунке 2 по горизонтальной оси располагаются данные о степени разбавления электролита $K_э$. Значение 100 % говорит о том, что электролит не разбавлен, ионный состав соответствует рабочим концентрациям. Значение 80 % говорит о том, что электролит разбавлен на 20 % дистиллированной водой и т.д. Неразбавленный электролит имеет наибольшую оптическую плотность. Линии тренда показывают линейную зависимость оптической плотности обоих электролитов от концентрации при условии, что линии выходят из начала координат. Незначительные отклонения экспериментальных данных от прямой линии, очевидно, связаны с точностью приготовления проб. Несомненно, что объединенный закон Бугера–Ламберта–Бера для электролитов без добавленных в них УНТ выполняется.

Следующая серия экспериментов направлена на изучение влияния концентрации УНТ на оптическую плотность водной суспензии. Суть экспериментов состояла в том, что в дистиллированную воду добавляли УНТ и диспергировали ультразвуком. Постепенно увеличивая концентрацию нанотрубок, измеряли оптическую плотность суспензии. Предварительно провели исследования оптической характеристик дистиллированной воды, участвующей в экспериментах, на различных длинах волн (рис. 3).

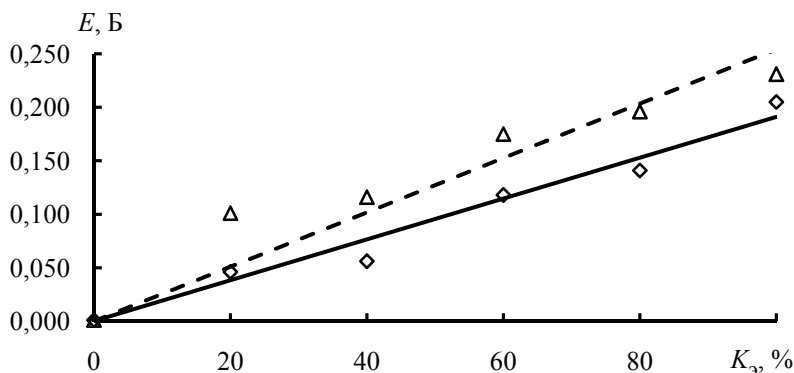


Рис. 2. Зависимость оптической плотности электролитов лужения (\diamond) и Sn–Bi (Δ) от степени разбавления дистиллированной водой

Как видно из графиков рис. 3, дистиллированная вода однократной перегонки имеет прозрачность близкую к 100 % (от 97,2 до 99,3 %) и низкую оптическую плотность (от 0,0001 до 0,01). Для рабочей длины волны электролитов 450 нм дистиллированная вода имеет оптическую плотность равную 0,001 Б. Таким образом влияние дистиллированной воды на оптическую плотность суспензии в целом незначительно.

На рисунке 4 приведены экспериментальные данные изменения оптической плотности водной суспензии УНТ для различных длин волн. Зависимость оптической плотности от концентрации на рабочей длине волны 450 нм показана сплошной линией, для остальных длин волн – штриховой. Алгоритм изменения оптической плотности для всех длин волн практически одинаковый. Оптическая плотность растет пропорционально росту концентрации нанотрубок, на интервале от 0 до 100 мг/л, график выходит из начала координат. Дальнейшее увеличение концентрации нанотрубок приводит к появлению нелинейности и волнообразному изменению оптической плотности в области предельных значений E (см. рис. 4, а).

Если сравнить зависимость оптической плотности электролита Sn–Bi (см. рис. 1) и зависимость оптической плотности водной суспензии от концентрации УНТ (см. рис. 4, а) на рабочей длине волны 450 нм, то можно заметить схожее поведение графиков функций. Это линейный рост оптической плотности в интервале концентраций нанотрубок до 100 мг/л и волнообразное изменение в интервале от 100 до 1600 мг/л. Становится очевидным, что на условия применимости закона Бугера–Ламберта–Бера в водных растворах электролитов влияет концентрация УНТ.

Практическое применение закона Бугера–Ламберта–Бера связано со следующими ограничениями:

- 1) закон справедлив для монохроматического света;
- 2) параллельность пучка света;
- 3) температура раствора должна быть постоянной в пределах нескольких градусов;
- 4) молярный коэффициент поглощения ϵ зависит от показателя преломления среды;
- 5) уравнение $E = l\epsilon c$ выполняется для систем, в которых светопоглощающими центрами являются частицы одного сорта.

Выполнение ограничений 1–3 обусловлено принципом работы прибора КФК-3 и условиями проведения эксперимента. Данные ограничения не влияют на возникновение нелинейности. Ограничение 4 может быть причиной отклонения

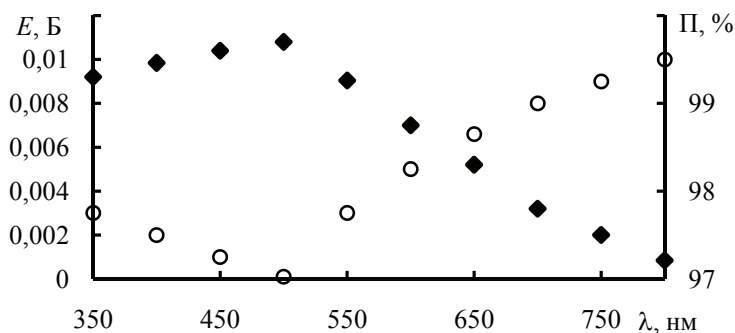
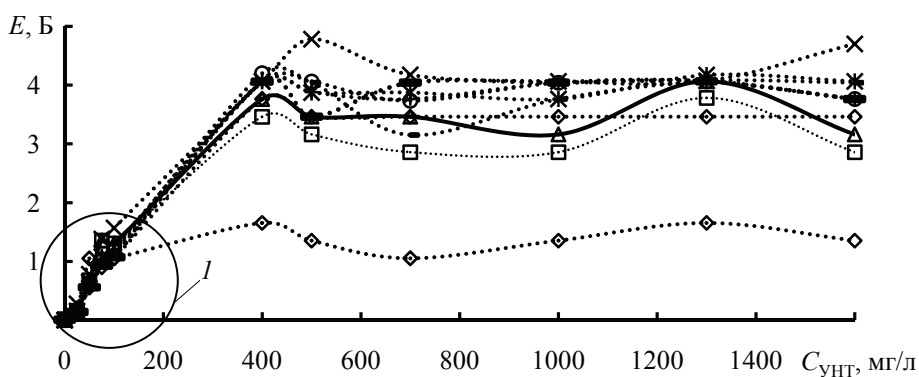
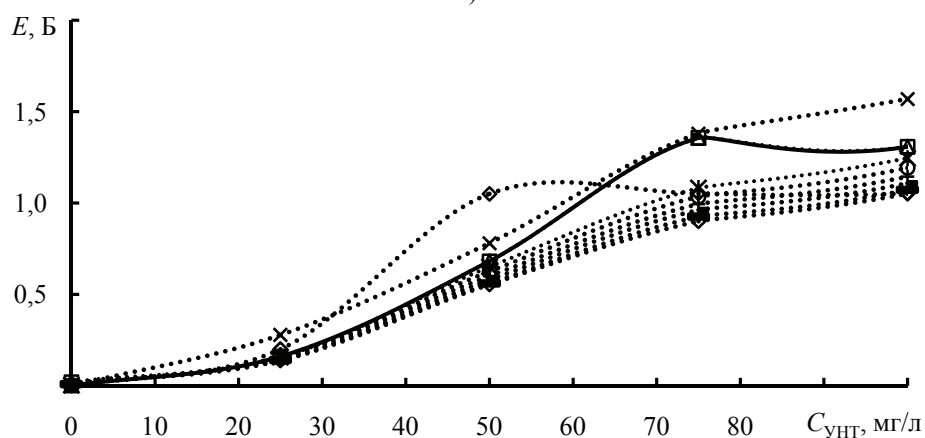


Рис. 3. Зависимости оптической плотности и прозрачности дистиллированной воды от длины волны λ :

○ – оптическая плотность; ◆ – коэффициент пропускания



a)



б)

Рис. 4. Зависимости оптической плотности водной суспензии от концентрации углеродных нанотрубок:

a – полного диапазона; *б* – части *I*;

--- — 750 нм; ---□--- — 400 нм; ---×--- — 500 нм; ---⊙--- — 600 нм; ---+--- — 700 нм;
 ---◇--- — 350 нм; ---△--- — 450 нм; ---*--- — 550 нм; ---+--- — 650 нм; ---◇--- — 800 нм

от закона и приводит к возникновению нелинейности в связи с изменением показателя преломления в высококонцентрированном растворе. В наших экспериментах пороговое значение концентрации нанотрубок составляет 100 мг/л. Очевидно, что и ограничение 5 является причиной отклонения от закона. Углеродные нанотрубки «Таунит» не растворяются в электролите, к тому же они непрозрачны для света. Ультразвуковое диспергирование нарушает межмолекулярное взаимодействие УНТ, и пока их концентрация в растворе невелика, нанотрубки находятся во взвешенном состоянии. При уменьшении расстояния между нанотрубками (увеличении концентрации) некоторая их часть слипается (агломерируется) и наблюдается резкое изменение оптической плотности. Таким образом, основными причинами отклонения от закона Бугера–Ламберта–Бера следует считать действие ограничений 4 и 5.

Следует заметить, что улучшение некоторых функциональных свойств покрытий достигается при высоких концентрациях нанотрубок, поэтому необходим способ измерения концентрации посредством измерения оптической плотности.

Предложено использовать метод абсорбционной спектроскопии, изменив подготовку раствора (суспензии). Исходя из того что в диапазоне концентраций

0...100 мг/л выполняется закон Бугера–Ламберта–Бера, а в исследуемом растворе концентрация нанотрубок выше, раствор возможно привести в заданный диапазон методом разбавления, то есть уменьшить концентрацию нанотрубок в N раз. Кратность разбавления рассчитывается, исходя из рабочей концентрации исследуемого раствора. Например, если для покрытия наилучшей считается концентрация нанотрубок 400 мг/л, то после отбора пробы ее следует разбавить ($N = 400/100 = 4$) в 4 раза. В качестве растворителя следует применять чистый электролит, соответствующий процессу. Например, если выполняется лужение в электролите состава: SnSO_4 – 35 г/л; $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – 1,5 г/л; H_2SO_4 – 180 г/л; 40 % CH_2O – 6 мл/л; «ЭКОМЕТ-Л6» – 45 мл/л; УНТ «Таунит» – 400 мг/л, то растворителем будет электролит такого же состава, но без УНТ «Таунит». Далее раствор (суспензия) подвергается ультразвуковому диспергированию и измеряется его оптическая плотность. Полученное значение E однозначно определяет концентрацию нанотрубок, значение которой затем умножается на коэффициент разбавления N и получается концентрация нанотрубок в исследуемом электролите.

Проверим закон аддитивности светопоглощения, например для концентрации нанотрубок 100 мг/л. По данным экспериментов оптическая плотность чистого электролита Sn–Bi на длине волны 450 нм равна 0,231 Б ($E_э = 0,231$ Б), оптическая плотность водной суспензии УНТ составляет 1,308 Б ($E_{\text{УНТ}} = 1,308$ Б) и оптическая плотность дистиллированной воды равна 0,001 Б ($E_в = 0,001$ Б). Суммарная оптическая плотность, с учетом дистиллированной воды $E = E_э + E_{\text{УНТ}} + E_в = 0,231 + 1,308 + 0,001 = 1,54$ Б. По данным графика (см. рис. 1) оптическая плотность электролита Sn–Bi с концентрацией нанотрубок 100 мг/л составляет 1,75 Б. Абсолютная погрешность на верхней границе области допустимых концентраций составляет 0,21 Б.

Заключение

Проверено соблюдение объединенного закона Бугера–Ламберта–Бера в электролитах лужения и Sn–Bi с добавлением УНТ «Таунит». Выяснено, что закон справедлив для электролитов без добавления нанотрубок.

Рассмотрено выполнение закона Бугера–Ламберта–Бера в водных суспензиях УНТ «Таунит». Установлено, что закон действует при концентрации нанотрубок, не превышающей 100 мг/л. При увеличении концентрации нанотрубок от 100 до 1600 мг/л вступают в силу ограничения закона, приводящие к отклонению зависимости от линейной.

Установлены причины нелинейной зависимости оптической плотности от концентрации нанотрубок в электролите и водной суспензии. Первая причина – изменение показателя преломления в высококонцентрированном растворе; вторая – светопоглощающими центрами являются частицы различного сорта. Одновременно с этим УНТ являются непрозрачными и способны к слипанию при концентрации выше 100 мг/л.

Предложен способ определения концентрации нанотрубок в интервале 0...1600 мг/л. Способ состоит в разбавлении суспензии чистым электролитом и приведении концентрации нанотрубок к значению меньшему 100 мг/л. Кратность разведения зависит от концентрации нанотрубок, считающейся оптимальной для гальванического процесса. Для вычисления искомой концентрации полученное посредством измерения оптической плотности значение концентрации (0...100 мг/л) умножается на степень разведения.

Список литературы

1. Дьяков, И. А. Оптические методы измерения концентрации углеродного наноматериала «ТАУНИТ» в растворах электролитов / И. А. Дьяков, Ю. В. Литовка, О. А. Кузнецова, А. Г. Ткачёв // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 2. – С. 35 – 38.
2. Наномодифицированные хромовые гальванические покрытия / Ю. В. Литовка [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2011. – Т. XIX, № 4. – С. 29 – 33.
3. Технологии получения наномодифицированных гальванических покрытий / Ю. В. Литовка [и др.] // Мир гальваники. – 2011. – № 3. – С. 25 – 28.
4. Интенсификация теплоотдачи на алюминиевых поверхностях путем оксидирования их наномодифицированными электролитами / А. А. Гравин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 928 – 935.
5. Гравин, А. А. Исследование процесса нанесения модифицированных электрохимических оксидных покрытий и их влияние на теплоотдачу / А. А. Гравин, Ю. В. Литовка // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 813 – 820.
6. Симагин, Д. Н. Процесс получения наномодифицированных цинковых покрытий с повышенной равномерностью / Д. Н. Симагин, Ю. В. Литовка // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 886 – 889.
7. Дьяков, И. А. К вопросу математического моделирования оптических свойств электролитов лужения / И. А. Дьяков, Д. В. Давыдова, Р. Ю. Мухин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 329 – 335.
8. Фотометры фотоэлектрические КФК-3. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.med-technika.com/catalog/img/kfk-3_instruction.pdf (дата обращения: 19.05.2014 г.).
9. ГОСТ 8.588–2006. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений оптической плотности материалов. – Введ. 2007–09–09. – М. : Стандартинформ, 2007. – 11 с.
10. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачёв. – М. : Машиностроение, 2008. – 297 с.
11. Булатов, М. И. Практическое руководство по фотоколориметрическим и спектро-фотометрическим методам анализа / М. И. Булатов, И. П. Калинин. – Л. : Химия, 1986. – 432 с.
12. Еремин, В. В. Основы физической химии : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. Теория / В. В. Еремин, С. И. Каргов, И. А. Успенская. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 320 с.

Checking Conditions of Applicability of Bouguer–Lambert–Beer Law in Aqueous Electrolyte Solutions with Carbon Nanotubes “Taunit”

I. A. Dyakov, D. V. Davydova

*Department “Automated Systems of Decision Support”, TSTU;
nanogalvanotech@mail.ru*

Key words and phrases: Bouguer–Lambert–Beer law; carbon nanotubes; optical density; shiny tin plating; sulfate tin plating; transmittance.

Abstract: Determination of the exact values of the concentration of carbon nanotubes in electrolyte solutions requires the development of methods and ways of measuring it. In certain approaches you can use the existing methods, such as absorption

spectroscopy, taking into account the features of nanomaterials. Experimental confirmation of the basic laws light absorption by solutions (suspensions) electrolytes with carbon nanotubes will allow applying the method of absorption spectroscopy.

We verified the conditions of applicability of the combined Bouguer–Lambert–Beer Law in the electrolytes of tinning and tin-bismuth with the addition of carbon nanotubes “Taunit”. The causes of non-linear dependence of the optical density on the concentration of nanotubes have been identified. A method for determining the concentration of nanotubes in the interval 0...1600 mg/l, comprising dilution of pure electrolyte concentration of nanotubes and making linear changes in the range of 0...100 mg/l, has been proposed.

References

1. D'yakov I.A., Litovka Yu.V., Kuznetsova O.A., Tkachev A.G. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2013, vol. 79, no. 2, pp. 35-38.
2. Litovka Yu.V., D'yakov I.A., Kuznetsova O.A., Tkachev A.G., Popov D.Yu., Stolyarov R.A. *Electroplating & Surface Treatment*, 2011, vol. XIX, no. 4, pp. 29-33.
3. Litovka Yu.V., D'yakov I.A., Kuznetsova O.A., Tkachev A.G., Popov D.Yu., Stolyarov R.A. *Mir gal'vaniki*, 2011, no. 3, pp. 25-28.
4. Gravin A.A., Litovka Yu.V., Tugolukov E.N., Tkachev A.G., D'yakov I.A., Pakhomov A.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 928-935.
5. Gravin A.A., Litovka Yu.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 813-820.
6. Simagin D.N., Litovka Yu.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 886-889.
7. D'yakov I.A., Davydova D.V., Mukhin R.Yu. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 329-335.
8. http://www.med-texnika.com/catalog/img/kfk-3_instruction.pdf (accessed 19 May 2014).
9. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ISC), *GOST 8.588-2006: Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Gosudarstvennaya poverochnaya skhema dlya sredstv izmerenii opticheskoi plotnosti materialov* (Russian Interstate Standards. GOST 8.588-2006: State system for ensuring the uniformity of measurements. State verification schedule for measuring the optical density of materials), Moscow: Standartinform, 2007, 11 p.
10. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* (Carbon nanomaterials. Production, Properties, Application), Moscow: Mashinostroenie, 2008, 297 p.
11. Bulatov M.I., Kalinkin I.P. *Prakticheskoe rukovodstvo po fotokolorimetriceskim i spektro-fotometriceskim metodam analiza* (A Practical Guide to photolorimetry and spectro-photometric methods of analysis), Leningrad: Khimiya, 1986, 432 p.
12. Eremin V.V., Kargov S.I., Uspenskaya I.A. *Osnovy fizicheskoi khimii* (Fundamentals of Physical Chemistry), Moscow: BINOM. Laboratoriya znanii, 2013, 320 p.

Prüfung der Bedingungen der Anwendbarkeit des Gesetzes von Buger–Lambert–Beer in den Wasserlösungen der Elektrolyten mit den Kohlenstoffnanoröhren “Taunit”

Zusammenfassung: Die Bestimmung der genauen Bedeutungen der Konzentration der Kohlenstoffnanoröhre in den Lösungen der Elektrolyten fordert die Entwicklung der Methoden und der Weisen ihrer Messung. Bei einem bestimmten

Herangehen ist die Nutzung der existierenden Methoden möglich, zum Beispiel, der absorbierenden Spektrometrie, berücksichtigend die Besonderheiten der Nanostoffe. Die experimentale Bestätigung der Ausführung der Hauptgesetze der Lichtaufnahme von den Lösungen (den Suspensionen) der Elektrolyten mit den Kohlenstoffnanoröhren erlaubt die Methode der absorbierenden Spektrometrie zu verwenden.

Es ist die Prüfung der Erfüllung der Bedingungen der Anwendbarkeit des vereinigten Gesetzes von Buger–Lambert–Beer in den Elektrolyten des Verzinnens und das Zinn–Wismut mit der Ergänzung der Kohlenstoffnanoröhre “Taunit” erfüllt. Es sind die Gründe der nichtlinearen Abhängigkeit der optischen Dichte von der Konzentration der Nanoröhre aufgeklärt. Es ist die Weise der Bestimmung der Konzentration der Nanoröhre auf dem Intervall von 0...1600 Mg/l angeboten. Sie besteht im Auflösen vom reinen Elektrolyt und in der Anführung der Konzentration der Nanoröhre ins Gebiet der linearen Veränderungen auf dem Intervall von 0...100 Mg/l.

Contrôle des conditions de l'applicabilité de la loi Bouguer–Lambert–Beer dans les solutions d'eau des électrolytes avec des nanotubes carboniques “Taounit”

Résumé: La définition des valeurs exactes de la concentration dans les solutions des électrolytes exige l'élaboration des méthodes et des moyens de mesure. L'affirmation expérimentale de la réalisation des lois essentielles de l'absorption de la lumière par les solutions (suspensions) des électrolytes avec des nanotubes carboniques permet d'appliquer la méthode de la spectrométrie à absorption.

Est effectué le contrôle des conditions de l'applicabilité de la loi Bouguer–Lambert–Beer dans les électrolytes d'étainage et étain-bismouth avec l'addition des nanotubes carboniques “Taounit”. Est proposé le moyen de la définition de la concentration des nanotubes dans une intervalle de 0...1600 mg/l.

Авторы: *Дьяков Игорь Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; *Давыдова Дарья Валентиновна* – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
