

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ 7,7'-ДИОКСО-7Н, 7'Н-3, 3'-БЕНЗИМИДАЗО[2,1-а]
БЕНЗО[de]ИЗОХИНОЛИНА-4, 4'-ДИКАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ С ДИТИОНИТОМ НАТРИЯ
В ВОДНО-ЩЕЛОЧНОМ РАСТВОРЕ**

Ю.В. Поленов, Е.В. Егорова

Юрий Владимирович Поленов (ORCID 0000-0002-9252-9926)*, Елена Владимировна Егорова (ORCID 0000-0001-7523-4045)

Кафедра физической и коллоидной химии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: polyurij@yandex.ru *, egorova306@yandex.ru

С использованием метода спектрофотометрии исследовано взаимодействие 7,7'-диоксо-7Н, 7'Н-3, 3'-бензимидазо[2,1-а]бензо[de]изохинолина-4, 4'-дикарбоновой кислоты с дитионитом натрия в водно-щелочном растворе в аэробных и анаэробных условиях. Обнаружено, что в начальной стадии процесса наблюдается чрезвычайно быстрое образование тетрааниона за счет присоединения двух электронов. В дальнейшем, в зависимости от условий проведения реакции (аэробная, анаэробная атмосфера, малые или большие концентрации восстановителя), наблюдается переход тетрааниона в исходное соединение за счёт его окисления кислородом воздуха или сульфит-анионом, образующимся из дитионита, а также при достаточно больших концентрациях восстановителя возможна последующая химическая стадия циклизации с отщеплением двух карбоксильных групп от восстановленной формы исходного соединения. Установлено, что продуктом химической циклизации является N,N'-ди(бензимидазол)димида перилентетракарбоновой кислоты, который был выделен из раствора в твердом состоянии. Проанализирован его элементный состав, получены ИК- и электронный спектры поглощения. На обратимый характер начальной стадии взаимодействия 7,7'-диоксо-7Н, 7'Н-3, 3'-бензимидазо[2,1-а]бензо[de]изохинолина-4, 4'-дикарбоновой кислоты с дитионитом натрия указывает тот факт, что в аэробных условиях концентрация промежуточного продукта, присутствующего в виде тетрааниона, убывает быстрее, чем анаэробной атмосфере. Переход восстановленной формы исходного соединения в невосстановленную наблюдается также при барботаже воздуха через реакционную смесь. Методом циклической вольтамперометрии установлено, что обратимое восстановление исходного соединения возможно также за счет электрохимической реакции, протекающей на углесталловом электроде в водно-щелочном растворе. Анализ вольтамперных зависимостей показал, что в электродной реакции принимает участие два электрона.

Ключевые слова: N,N'-замещенные диимида бинафтилгексакарбоновой кислоты, производные диимида перилентетракарбоновой кислоты, дитионит натрия, циклизация, циклическая вольтамперометрия

**INTERACTION OF 7,7'-DIOXO-7H, 7' H-3, 3' -BENZIMIDAZO[2,1-a]BENZO[de]ISOQUINOLINE-4,
4' -DICARBOXYLIC ACID WITH SODIUM DITHIONITE IN WATER-ALKALINE SOLUTION**

Yu.V. Polenov, E.V. Egorova

Yuri V. Polenov (ORCID 0000-0002-9252-9926)*, Elena V. Egorova (ORCID 0000-0001-7523-4045)

Department of Physical and Colloidal Chemistry, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Shere-metevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: polyurij@yandex.ru *, egorova306@yandex.ru

Using the spectrophotometric method, the interaction of 7,7'-dioxo-7H, 7' H-3, 3'-benzimidazo[2,1-a]benzo[de]isoquinoline-4, 4' -dicarboxylic acid with sodium dithionite in an aqueous-alkaline solution in aerobic and anaerobic conditions has been studied. It is found, that in the initial stage of process very rapidly formation of a tetraanion is observed due to the addition of two electrons. In the future, depending on the conditions of the reaction (aerobic, anaerobic atmosphere, small or large concentrations of the reducing agent), the tetraanion transition to the initial compound is observed due to its oxidation with air oxygen or sulfite anion formed from dithionite anions, as well as at sufficiently high concentrations of the reducing agent. A subsequent chemical stage of cyclization is possible with the cleavage of two carboxyl groups from the reduced form of the initial compound. It has also been established that the cyclization product is N,N'-di(benzimidazole)diimides of perilen-tetracarboxylic acid, which is isolated from a solution in a solid state. Its elemental composition is analyzed, IR- and electronic absorption spectra were obtained. The reversible nature of the initial stage of the interaction of 7, 7'-dioxo-7H, 7' H-3, 3'-benzimidazo[2,1-a]benzo[de]isoquinoline-4,4'-dicarboxylic acid with sodium dithionite is indicated by the fact that under aerobic conditions the concentration of the intermediate product present in the form of tetraanion decreases faster than the anaerobic atmosphere. The transition of the reduced form of the initial compound to the original, non-restored one is also observed during bubbling of air through the reaction mixture. It has been established by cyclic voltammetry that reversible reduction of the initial compound is also possible due to an electrochemical reaction occurring on a carbon-metal electrode in an aqueous-alkaline solution. The analysis of the voltage dependences showed that two electrons participate in the electrode reaction.

Keywords: N,N'-substituted diimide of binafthylhexacarboxylic acid, derivatives of perilentetracarboxylic acid diimide, sodium dithionite, cycling, cyclic voltammetry

Для цитирования:

Поленов Ю.В., Егорова Е.В. Взаимодействие 7,7'-диоксо-7H, 7' H-3, 3'-бензимидазо[2,1-a] бензо[de]изохинолина-4, 4'-дикарбоновой кислоты с дитионитом натрия в водно-щелочном растворе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 6. С. 80–87. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.7056.

For citation:

Polenov Yu.V., Egorova E.V. Interaction of 7,7'-dioxo-7H, 7' H-3, 3'-benzimidazo[2,1-a]benzo[de]isoquinoline-4, 4' -dicarboxylic acid with sodium dithionite in water-alkaline solution. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 6. P. 80–87. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.7056.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом изучения в настоящей работе является соединение, имеющее номенклатурное название 7,7'-диоксо-7H,7' H-3,3'-бензимидазо[2,1-a] бензо[de]изохинолин-4,4'-дикарбоновой кислоты, которое относится к классу N,N'-замещенных диимидов бинафтилгексакарбоновой кислоты. Последние известны в текстильной химии под общим названием кубогены и с серосодержащими восстановителями, такими как гидроксиметансульфинат натрия, диоксид тиомочевины, дитионит натрия, образуют в водно-щелочных растворах диимидзамещенные перилентетракарбоновой кислоты [1-4]. Диимиды перилентетракарбоновых кислот в настоящее время широко используются в преобразователях солнечной энергии [5-9], биосенсорах [10-13], лазерной технике [14-17]. В работе [18] показано, что продукт восстановительной циклизации 7,7'-диоксо-7H,7' H-3,3'-бензимидазо [2,1-a] бензо[de]изохинолин-4,4'-дикарбоновой кислоты

обладает высокой фотоактивностью по сравнению с другими изученными периленовыми производными, что позволяет использовать его в качестве фоторезистивного материала.

В работе [1] изучалась восстановительная циклизация N,N'-дизамещенных 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты под действием дитионита натрия, гидроксиметансульфината натрия и диоксида тиомочевины. Показано, что при восстановлении исследуемых соединений на первой стадии образуется анион-радикал, который циклизуется с образованием связи между атомами углерода в положениях 8 и 8' в анион-радикал перилентетракарбоновой кислоты. Последний либо отщепляет карбоксигруппы и образует дианион, либо восстанавливается дальше и превращается в дианион 13,14-дикарбокси-13,14-дигидродизамещенного диимид перилентетракарбоновой кислоты. При этом состав и выход продуктов реакции зависят от природы восстановителя.

В работах [2, 4, 19] исследован стехиометрический механизм реакции восстановительной циклизации кубогенов с хлорфенильным и 3,5-диметилфенильным заместителями при атомах азота при взаимодействии с диоксидом тиомочевины. Показано, что состав и количество промежуточных и конечных продуктов циклизации зависят от концентрации восстановителя и наличия в растворе кислорода воздуха, что связано с образованием из молекул восстановителя различных по природе восстановительных интермедиатов. В частности, в анаэробной атмосфере восстановительной активностью обладают анионы сульфокислоты, образующиеся при разрыве связи углерод – сера в молекуле диоксида тиомочевины. В аэробной атмосфере упомянутые анионы взаимодействуют с кислородом воздуха и образуют дитионат-анионы. Последние способны диспропорционировать с образованием анион-радикалов диоксида серы [20-23]. Реакционная способность перечисленных частиц различна и влияет на состав как промежуточных, так и конечных продуктов изучаемых реакций.

В цитируемых работах, посвященных изучению механизма восстановительной циклизации кубогенов [1-4], отмечается, что на первой стадии реакции взаимодействия кубогенов с сероокислородными восстановителями образуется промежуточный продукт, который невозможно выделить из раствора и полностью идентифицировать. Предполагается, что он является либо дианионом, либо анион-радикальной частицей исходной молекулы кубогена.

Целью настоящей работы являлось изучение стехиометрического механизма реакции взаимодействия 7,7'-диоксо-7Н,7'Н-3,3'-бензимидазо[2,1-а]бензо[de]изохинолин-4,4'-дикарбоновой кислоты с дитионатом натрия в различных условиях ее проведения. Выбор кубогена обусловлен наличием в его молекуле двух, а не четырех карбонильных групп, что уменьшает количество побочных продуктов реакции. Что касается восстановителя, дитионата натрия, согласно данным литературы, он обладает достаточно хорошей селективностью в отношении продуктов циклизации кубогенов – периленовых производных. Так, в работе [1] для кубогена с диметилфенильным заместителем при атомах азота выход продукта циклизации составлял 35-50%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходный образец кубогена получен и очищен сотрудниками Государственного научного центра «НИОПИК» (Москва).

В качестве восстановителя использовали дитионат натрия компании «ALBITE SRL», Италия, с содержанием основного вещества 89,2%.

Масс-спектр регистрировали на время-пролетном масс-спектрометре Shimadzu Axima Confidence (MALDI-TOF). Инфракрасный спектр снимали на ИК Фурье-спектрометре TENSOR II (Bruker AXS Gmbb). Элементный анализ проводили на анализаторе углерода, водорода, азота, серы и кислорода с электронными микровесами FLASH EA1112 Termo Quest.

Спектральные исследования проводили на кафедре физической и коллоидной химии ИГХТУ с использованием спектрофотометра марки LEKISS 2110 UV (Финляндия) и кварцевых кювет.

Для получения циклических вольтамперных зависимостей использовали вольтамперметрический анализатор Экотест-ВА (Россия) с трехэлектродной системой, состоящей из вращающегося углесталлового рабочего электрода, вспомогательного – импрегнированного графитового и насыщенного хлоридсеребряного электрода сравнения ЭВЛ-1М4.

Навеску 7,7'-диоксо-7Н,7'Н-3,3'-бензимидазо[2,1-а]бензо[de]изохинолин-4,4'-дикарбоновой кислоты (далее кубоген сине-фиолетовый) массой 0,003 г растворяли в 50 мл 0,13 М раствора гидроксида натрия. В мерной колбе на 50 мл растворяли дитионат натрия и доводили до метки дистиллированной водой. Полученные растворы смешивали и наливали в кювету спектрофотометра. При проведении реакции в анаэробных условиях через приготовленные растворы перед их смешением в течение 5-7 мин продували аргон. Все опыты проводили при комнатной температуре, равной 300 К.

N,N'-ди(бензимидазол)диимид-3,4,9,10-перилентетракарбоновой кислоты (далее периленовый сине-фиолетовый). Осадки фиолетового цвета, образующиеся в ряде опытов, после окончания реакции и выдержки реакционной массы на воздухе отфильтровывали, сушили и анализировали. ИК спектр, ν , см^{-1} : 800-750 с ($\text{C-H}_{\text{бензимидазол}}$), 1642 с (C=O), 1722 с (C=O), 1665 с ($\text{C-N}_{\text{имид}}$), 792 с, 1260 с, 1460 с (перилен). Электронный спектр поглощения (водно-щелочной раствор), λ_{max} , нм [lg ϵ]: 330 [3,51], 421 [3,85]. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %) 536,54 (99). Найдено, %: С 80,37; Н 3,13; N 10,50.

$\text{C}_{36}\text{H}_{16}\text{N}_4\text{O}_2$. Вычислено, %: С 80,58; Н 3,01; N 10,44.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ электронных спектров поглощения реакционной системы при взаимодействии кубогена сине-фиолетового с дитионитом натрия в водно-щелочном растворе показал, что во всех случаях при смешении исходных реагентов наблюдается гипсохромное смещение полосы поглощения, имеющей максимум при 330 нм, которая отвечает исходному соединению, и появление более интенсивной полосы с максимумом при 317 нм. В ходе реакции интенсивность последней уменьшается во времени, и, при определенных условиях эксперимента, появляются полосы поглощения с максимумами в диапазоне длин волн от 500 до 600 нм (рис. 1). Причем при малых концентрациях восстановителя, порядка 10^{-4} моль/л, появления последних не наблюдается ни в аэробной, ни в анаэробной атмосфере.

Согласно данным литературы [1-4, 13, 14] полосы поглощения, имеющие максимумы от 500 до 600 нм, характерны для N,N'-замещенных диимидов перилентетракарбоновой кислоты.

В экспериментальной части работы приведен анализ состава соединения **4** (схема), который показал, что оно действительно является периленовым производным – продуктом циклизации кубогена сине-фиолетового. Необходимо отметить, что

последний образуется при концентрациях восстановителя порядка 10^{-3} моль/л и выше в результате химической циклизации соединения **2**, имеющего максимум поглощения при 317 нм, так как на электронных спектрах наблюдается изобестическая точка. В дальнейшем происходит окисление дианиона **3** кислородом воздуха и образование твердого продукта **4**.

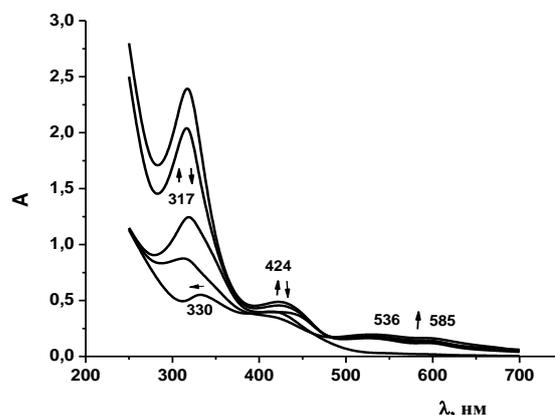


Рис. 1. Изменение электронных спектров поглощения при взаимодействии кубогена сине-фиолетового с дитионитом натрия в аэробных условиях в водно-щелочном растворе.

$$C_{\text{NaOH}} = 0,13 \text{ моль/л}; C_{\text{восст}} = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}; \\ C_{\text{куб}} = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л}; T = 300 \text{ К}$$

Fig. 1. Changes in the electronic absorption spectra during the interaction of blue-violet cubogen with sodium dithionite under aerobic conditions in an aqueous-alkaline solution. $C_{\text{NaOH}} = 0.13 \text{ mol/l}$; $C_{\text{Red}} = 1.84 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$; $C_{\text{Cub}} = 3.9 \cdot 10^{-5} \text{ mol/l}$; $T = 300 \text{ K}$

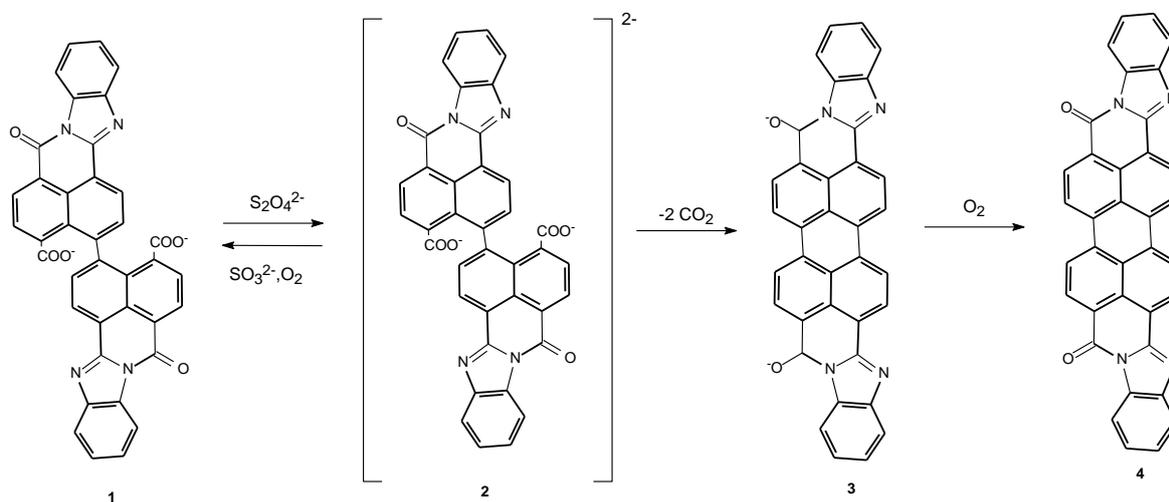


Схема. Стехиометрический механизм реакции взаимодействия 7,7'-диоксо-7Н, 7' Н-3, 3'-бензимидазо[2,1-а]бензо[де]изохинолин-4, 4'-дикарбоновой кислоты в водно-щелочном растворе с дитионитом натрия

Scheme. Stoichiometric mechanism of the reaction of 7,7'-dioxo-7H, 7' H-3, 3'-benzimidazo[2,1-a]benzo[de]isoquinoline-4,4'-dicarboxylic acid in an aqueous alkaline solution with sodium dithionite

Состав промежуточного продукта **2**, образующегося на начальной стадии циклизации кубогена, установить достаточно сложно, так как выделить указанное вещество в твердом состоянии не

удается. В работе [1] предполагается, что при взаимодействии кубогена, имеющего в качестве заместителей при атомах азота диметилфенильные

группы, с диоксидом тиомочевина подобный продукт является анион-радикалом. Данный вывод сделан на основании спектра ЭПР раствора. Однако факт образования анион-радикала можно подвергнуть сомнению по причине того, что восстановительными свойствами в растворах диоксида тиомочевина обладают анионы сульфоксиловой кислоты, которые образуются при разрыве связи углерод–сера исходной молекулы. Указанные интермедиаты во всех известных редокс-реакциях являются двухэлектронными восстановителями. В случае изучаемой нами системы в спектре ЭПР отсутствовали какие-либо сигналы, и, так как дитионит натрия во многих реакциях окисляется до сульфита, можно предположить, что промежуточным продуктом восстановления кубогена сине-фиолетового является именно тетраанион **2** (схема 1). Заряд последнего объясняется тем, что исходный кубоген в водно-щелочном растворе присутствует в виде дианиона и присоединяет два электрона в результате редокс-реакции с дитионитом.

Как было указано ранее, при малых концентрациях дитионита циклизация промежуточного продукта **2** не происходит. При смешивании растворов кубогена и восстановителя наблюдается быстрое его образование, скорость которого не удалось зарегистрировать даже на установке, предназначенной для изучения кинетики быстрых реакций.

С течением времени интенсивность спектральной полосы с максимумом 317 нм медленно уменьшается, и, в конечном итоге, спектр поглощения трансформируется в исходный спектр кубогена с максимумами при 330 и 420 нм. В анаэробной атмосфере концентрация тетрааниона может оставаться постоянной в течение нескольких суток. В аэробной атмосфере заметное уменьшение концентрации наблюдается через несколько часов после смешения растворов. Кроме того, пропускание воздуха через реакционную смесь ускоряет процесс уменьшения концентрации анионов **2**. Указанные закономерности позволяют сделать вывод об обратимом характере стадии образования тетраанионов. При проведении реакции в анаэробной атмосфере частицами, которые способствуют переходу тетраанионов в исходную форму кубогена (дианионы), являются, по-видимому, продукты окисления дитионита – сульфит-анионы.

Для подтверждения возможности обратимого превращения кубогена в восстановленную форму – тетраанион проведены опыты по исследованию электрохимических процессов, протекающих в водно-щелочном растворе кубогена сине-фиолетового на углесталловом электроде. Для

этого получали, как это описано в экспериментальной части работы, циклические вольтамперограммы (ЦВА), представленные на рис. 2.

На ЦВА наблюдаются два пика, отвечающие катодному и анодному процессам превращения кубогена. Из зависимости, приведенной на рис. 3, можно сделать вывод о том, что соотношение токов анодных и катодных пиков при всех скоростях развертки потенциала примерно равно единице, что является одним из критериев обратимости электрохимической реакции.

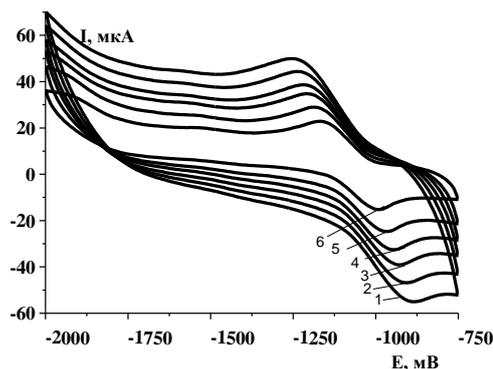


Рис. 2. Влияние скорости развертки потенциала (скорости сканирования) на вольтамперные кривые. v , мВ/с: 1- 20; 2- 40; 3- 60; 4- 80; 5- 100; 6- 120
Fig. 2. The effect of the potential sweep rate (scanning speed) on the voltage curves. v , mV/s: 1- 20; 2-40; 3-60; 4-80; 5-100; 6-120

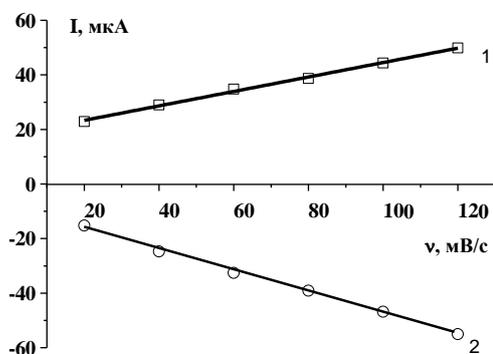


Рис. 3. Зависимости токов анодных (1) и катодных (2) пиков от скорости развертки потенциала
Fig. 3. Dependences of the currents of the anode (1) and cathode (2) peaks on the potential sweep rate

Другим подтверждением данного вывода служит линейная зависимость между значениями токов катодных пиков (I_p , мкА) и корнем квадратным скорости развертки потенциала (v , В·с⁻¹), которая описывается уравнением:

$$I_p = 0,634\sqrt{v} \quad (1)$$

Эта же зависимость свидетельствует о том, что лимитирующей стадией электрохимической реакции является стадия диффузии реагента к твердой поверхности электрода.

Известно [24], что величина пика прямого сканирования для обратимой циклической вольтамперограммы теоретически описывается уравнением Рэндлса–Шевчика:

$$I_p = 0,4463(nF)^{3/2} \left[\frac{Dv}{RT} \right]^{1/2} CS \quad (2)$$

где I_p выражается в мА; n – общее число электронов, участвующих в электродной реакции; S – площадь поверхности электрода, которая в нашем случае равнялась $0,071 \text{ см}^2$ при диаметре электрода 3 мм; C – концентрация электроактивного вещества (моль·л⁻¹); D – коэффициент диффузии электроактивного вещества (см²·с⁻¹); v – скорость сканирования (В·с⁻¹).

По угловому коэффициенту зависимости (1) было вычислено общее число электронов, участвующих в электродной реакции, которое оказалось равным двум. Коэффициент диффузии кубогена рассчитывали теоретически по уравнению Вильке-Чанга, приведенному в литературе [25]:

$$D = \frac{7,4 \cdot 10^{-10} T X_{\Gamma}}{\mu V_D^{0,5}} \quad (3)$$

где T – абсолютная температура, X – параметр ассоциации, характеризующий растворитель (для водного раствора равен 2,6), M_{Γ} – молярная масса растворителя, μ – вязкость раствора, V_D – молярный объем диффундирующего растворенного вещества, рассчитанный по атомным инкрементам. Рассчитанное значение коэффициента диффузии оказалось равным $8,9 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$.

Таким образом, представленные данные показывают возможность обратимого восстанов-

ления кубогена сине-фиолетового в водно-щелочном растворе на углеситалловом электроде, при этом в электродной реакции принимают участие два электрона.

ВЫВОДЫ

Полученные в работе экспериментальные данные позволили предложить схему стехиометрического механизма реакции взаимодействия кубогена сине-фиолетового с дитионитом натрия в водно-щелочном растворе. Она включает в себя обратимое редокс-образование тетраанионов исходного кубогена и, при концентрациях восстановителя порядка 10^{-4} моль/л и более, циклизацию, в результате которой образуется производное диимида перилентетракарбоновой кислоты. Доказано образование тетраанионов в водно-щелочном растворе кубогена также в результате обратимой электрохимической двухэлектронной реакции на углеситалловом электроде.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was conducted using the resources of the Center for the Collective Use of Scientific Equipment of the ISUCT.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шулепова О.И., Рябинин В.А., Стариченко В.Ф., Ворожцов Г.Н. Механизм восстановительной циклизации N,N'-дизамещенных диимида 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты в водной щелочной среде. *Журн. орг. химии*. 1993. Т. 29. № 5. С. 1001-1010. DOI: 10.1002/chin.199420064.
2. Polenov Yu.V., Nikitin K.S., Egorova E.V., Patrusheva D.A. Взаимодействие 2,2'-ди(4-хлорфенил)-1,1',3,3'-тетраоксо-2,2',3,3'-тетрагидро-1H,1'H-6,6'-би(бензо[de]изохинолин)-7,7'-дикарбоновой кислоты с диоксидом тиомочевина в водно-щелочном растворе. *Журн. общ. химии*. 2021. № 4. С. 550-555. DOI: 10.31857/S0044460X21040090.
3. Polenov Yu.V., Budanov V.V. Редокс-превращения при восстановительной циклизации диангида и диимида динафтилгексакарбоновой кислоты под действием ронгалита и дитионита натрия. *Журн. прикл. химии*. 1996. Т. 69. № 12. С. 2022-2025.
4. Polenov Yu.V., Nikitin K.S., Egorova E.V., Patrusheva D.A. Взаимодействие 2,2'-ди(3,5-диметилфенил)-1,1',3,3'-тетраоксо-2,2',3,3'-тетрагидро-1H,1'H-6,6'-би(бензо[de]изохинолин)-7,7'-дикарбоновой кислоты с диоксидом тиомочевина в водно-щелочном растворе. *Изв.*

REFERENCES

1. Shulepova O.I., Ryabinin V.A., Starichenko V.F., Vorozhtsov G.N. Mechanism of reducing cyclization of N,N'-disubstituted 1,1'-binaftyl diimide-4,4',5,5',8,8'-hexacarboxylic acid in an aqueous alkaline medium. *Zhurn. Org. Khim.* 1993. V. 29. N 5. P. 1001-1010. (in Russian). DOI: 10.1002/chin.199420064.
2. Polenov Y.V., Nikitin K.S., Egorova E.V., Patrusheva D.A. Reaction of 2,2'-di(4-chlorophenyl)-1,1',3,3'-tetraoxo-2,2',3,3'-tetrahydro-1H,1'H-6,6'-di(benzo[de]isoquinoline)-7,7'-dicarboxylic acid with thiourea dioxide in water-alkaline solution. *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. N 4. P. 631-635. DOI: 10.1134/S1070363221040095.
3. Polenov Yu.V., Budanov V.V. Redox transformations in reductive cyclization of binaphthylhexacarboxylic acid dianhydride and diimide under the action of rongalite and sodium dithionite. *Russ. J. Appl. Chem.* 1996. V. 69. N 12. P. 1837-1840.
4. Polenov Yu.V., Nikitin K.S., Egorova E.V., Patrusheva D.A. Interaction of 2,2'-di(3,5-dimethylphenyl)-1,1',3,3'-tetraoxo-2,2',3,3'-tetrahydro-1H,1'H-6,6'-di(benzo[de]isoquinoline)-7,7'-dicarboxylic acid with thiourea dioxide in water-alkaline solution. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 9. P. 47-54 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6639.

- вузов. *Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 47-54. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6639.
- Alessio P., Braunger M.L., Aroca R.F., Olivati C.A., Constantino C.J.L. Supramolecular Organization-Electrical Properties Relation in Nanometric Organic Films. *J. Phys. Chem. C*. 2015. V. 119. N 21. P. 12055 - 12064. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b03093.
 - Canto-Aguilar E.J., Gutiérrez-Moreno D., Sastre-Santos A., Morikawa D., Abe M., Fernández-Lázaro F., Oskam G., Mori S. Identification of the loss mechanisms in TiO₂ and ZnO solar cells based on blue, piper-idinyl-substituted, mono-anhydride perylene dyes. *Electrochim. Acta*. 2020. V. 355. Art. 136638. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136638.
 - Deng M., Zhang G., Yu L., Xu X., Peng Q. Noncovalent interaction enables planar and efficient propeller-like perylene diimide acceptors for polymer solar cells. *Chem. Eng. J*. 2021. V. 426. N 12 Art. 131910. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131910.
 - Echeverry C.A., Cotta R., Insuasty A., Ortíz A., Martín N., Echegoyen L., Insuasty B. Synthesis of novel light harvesters based on perylene imides linked to triphenylamines for Dyes Sensitized Solar Cells. *Dyes Pigments*. 2018. V. 153. P. 182-188.
 - Singh R., Kim M., Lee J.-J., Ye T., Keivanidis P.E., Cho K. Excimer formation effects and trap-assisted charge recombination loss channels in organic solar cells of perylene diimide dimer acceptors. *J. Mater. Chem. C*. 2020. N 8. P. 1686-1696.
 - Georgiev N.I., Sakr A.R., Bojinov V.B. Design and synthesis of novel fluorescence sensing perylene diimides based on photoinduced electron transfer. *Dyes Pigments*. 2011. V. 91. N 3. P. 332-339. DOI: 10.1016/j.dyepig.2011.04.015.
 - Lv Z., Liu J., Bai W., Yang S., Chen A. A simple and sensitive label-free fluorescent approach for protein detection based on a Perylene probe and aptamer. *Biosens. Bioelectron*. 2015. V. 64. P. 530-534. DOI: 10.1016/j.bios.2014.09.095.
 - Sekida S., Kameyama T., Koga T., Hadano S., Watanabe S., Niko Y. Highly lipophilic and solid emissive N-annulated perylene bisimide synthesis for facile preparation of bright and far-red excimer fluorescent nano-emulsions with large Stokes shift. *J. Photoch. Photobio. A*. 2018. V. 364. P. 16-21. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2018.05.023.
 - Rostami-Tapeh-Esmail E., Golshan M., Salami-Kalajahi M., Roghani-Mamaqani H. Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic diimide and its derivatives: Synthesis, properties and bio-applications. *Dyes Pigments*. 2020. V. 180. Art. 108488 DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108488.
 - Szukalska A., Szukalski A., Stachera J., Zajac D., Chrzumnicka E. Martynski M., Mysliwiec J. Perylene-Based chromophore as a versatile dye for light amplification. *Materials*. 2022. V. 15(3). N 980. DOI:10.3390/ma15030980.
 - Zhang F., Ma Y., Chi Y., Yu H., Li Y., Jiang T., Wei X., Shi J. Self-assembly, optical and electrical properties of perylene diimide dyes bearing unsymmetrical substituents at bay position. *Sci. Rep*. 2018. V. 8 (1). N. 8208. DOI: 10.1038/s41598-018-26502-5.
 - Aivali S., Tsimpouki L., Anastasopoulos C., Kallitsis J.K. Synthesis and Optoelectronic Characterization of Perylene Diimide-Quinoline Based Small Molecules. *Molecules*. 2019. V. 24(23). N 4406. DOI:10.3390/molecules24234406.
 - Huang C., Barlow S., Marder S.R. Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic Acid Diimides: Synthesis, Physical Properties, and Use in Organic Electronics. *J. Org. Chem*. 2011. V. 76. P. 2386-2407. DOI: 10.1021/jo2001963.
 - Alessio P., Braunger M.L., Aroca R.F., Olivati C.A., Constantino C.J.L. Supramolecular Organization-Electrical Properties Relation in Nanometric Organic Films. *J. Phys. Chem. C*. 2015. V. 119. N 21. P. 12055 - 12064. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b03093.
 - Canto-Aguilar E.J., Gutiérrez-Moreno D., Sastre-Santos A., Morikawa D., Abe M., Fernández-Lázaro F., Oskam G., Mori S. Identification of the loss mechanisms in TiO₂ and ZnO solar cells based on blue, piper-idinyl-substituted, mono-anhydride perylene dyes. *Electrochim. Acta*. 2020. V. 355. Art. 136638. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136638.
 - Deng M., Zhang G., Yu L., Xu X., Peng Q. Noncovalent interaction enables planar and efficient propeller-like perylene diimide acceptors for polymer solar cells. *Chem. Eng. J*. 2021. V. 426. N 12 Art. 131910. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131910.
 - Echeverry C.A., Cotta R., Insuasty A., Ortíz A., Martín N., Echegoyen L., Insuasty B. Synthesis of novel light harvesters based on perylene imides linked to triphenylamines for Dyes Sensitized Solar Cells. *Dyes Pigments*. 2018. V. 153. P. 182-188.
 - Singh R., Kim M., Lee J.-J., Ye T., Keivanidis P.E., Cho K. Excimer formation effects and trap-assisted charge recombination loss channels in organic solar cells of perylene diimide dimer acceptors. *J. Mater. Chem. C*. 2020. N 8. P. 1686-1696.
 - Georgiev N.I., Sakr A.R., Bojinov V.B. Design and synthesis of novel fluorescence sensing perylene diimides based on photoinduced electron transfer. *Dyes Pigments*. 2011. V. 91. N 3. P. 332-339. DOI: 10.1016/j.dyepig.2011.04.015.
 - Lv Z., Liu J., Bai W., Yang S., Chen A. A simple and sensitive label-free fluorescent approach for protein detection based on a Perylene probe and aptamer. *Biosens. Bioelectron*. 2015. V. 64. P. 530-534. DOI: 10.1016/j.bios.2014.09.095.
 - Sekida S., Kameyama T., Koga T., Hadano S., Watanabe S., Niko Y. Highly lipophilic and solid emissive N-annulated perylene bisimide synthesis for facile preparation of bright and far-red excimer fluorescent nano-emulsions with large Stokes shift. *J. Photoch. Photobio. A*. 2018. V. 364. P. 16-21. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2018.05.023.
 - Rostami-Tapeh-Esmail E., Golshan M., Salami-Kalajahi M., Roghani-Mamaqani H. Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic diimide and its derivatives: Synthesis, properties and bio-applications. *Dyes Pigments*. 2020. V. 180. Art. 108488 DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108488.
 - Szukalska A., Szukalski A., Stachera J., Zajac D., Chrzumnicka E. Martynski M., Mysliwiec J. Perylene-Based chromophore as a versatile dye for light amplification. *Materials*. 2022. V. 15(3). N 980. DOI:10.3390/ma15030980.
 - Zhang F., Ma Y., Chi Y., Yu H., Li Y., Jiang T., Wei X., Shi J. Self-assembly, optical and electrical properties of perylene diimide dyes bearing unsymmetrical substituents at bay position. *Sci. Rep*. 2018. V. 8 (1). N. 8208. DOI: 10.1038/s41598-018-26502-5.
 - Aivali S., Tsimpouki L., Anastasopoulos C., Kallitsis J.K. Synthesis and Optoelectronic Characterization of Perylene Diimide-Quinoline Based Small Molecules. *Molecules*. 2019. V. 24(23). N 4406. DOI:10.3390/molecules24234406.
 - Huang C., Barlow S., Marder S.R. Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic Acid Diimides: Synthesis, Physical Properties, and Use in Organic Electronics. *J. Org. Chem*. 2011. V. 76. P. 2386-2407. DOI: 10.1021/jo2001963.

18. **Никитин К.С., Поленов Ю.В., Егорова Е.В., Патрушева Д.А.** Получение фоточувствительных материалов на основе производных перилена. Сб. тр. Научно-исследовательская деятельность в классическом университете: традиции и инновации. Матер. междунар. науч.-практ. фест. Иваново. 2022. С. 196-203.
19. **Никитин К.С., Поленов Ю.В., Казак А.В., Егорова Е.В., Усольцева Н.В.** Взаимодействие N,N'-ди(4-хлорфенил)диимида 1,1' - бинафтил - 4,4',5,5',8,8' - гексакарбоновой кислоты с диоксидом тиомочевины в тонкой пленке Ленгмюра-Шеффера. *Кристаллография*. 2020. Т. 65. № 5. С. 811-817. DOI: 10.31857/S002347612005015X.
20. **Поленов Ю.В., Егорова Е.В., Никитин К.С.** Кинетика разложения диоксида тиомочевины в водно-этанольно-аммиачном растворе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 8. С. 95-101 DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5961.
21. **Никитин К.С., Поленов Ю.В., Егорова Е.В.** Разложение диоксида тиомочевины в аэробных и анаэробных условиях в водно-щелочном растворе. *Журн. физ. химии*. 2020. Т. 94. № 10. С. 1505-1509. DOI: 10.31857/S0044453720100209.
22. **Поленов Ю.В., Шестаков Г.А., Егорова Е.В.** Кинетическая модель разложения диоксида тиомочевины в водных растворах различной кислотности. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. V. 61. Вып. 12. P. 87-93. DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5835.
23. **Поленов Ю.В., Макарова Е.В., Егорова Е.В.** Кинетическая модель процесса разложения диоксида тиомочевины в водно-аммиачном растворе. *Кинетика и катализ*. 2014. Т. 55. № 5. С. 594-598.
24. **Bard A.J., Faulkner L.R.** Electrochemical methods: Fundamentals and Applications. New York: John Wiley & sons. Inc. 2000. 850 p.
25. **Саттерфилд Ч.Н.** Массопередача в гетерогенном катализе. М.: Химия. 1976. 110 с.
18. **Nikitin K.S., Polenov Y.V., Egorova E.V., Patrusheva D.A.** Production of photosensitive materials based on perylene derivatives. Nauchno-issledovatel'skaya deyatel'nost' v klassicheskom universitete: tradicii i innovacii. Materialy mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo festivalya. Ivanovo. 2022. P. 196-203 (in Russian).
19. **Nikitin K.S., Polenov Y.V., Egorova E.V., Kazak A.V., Usol'tseva N.V.** Interaction of N,N'-di(4-chlorophenyl)diimide 1,1'-binaphthyl-4,4',5,5',8,8'-hexacarboxylic acid with thiourea dioxide in solution and thin film. *Crystallography Rep.* 2020. V. 65. N 5. P. 779-785. DOI: 10.1134/S1063774520050156.
20. **Polenov Yu.V., Egorova E.V., Nikitin K.S.** Kinetics of thiourea dioxide decomposition in water-ethanol-ammonia solution. *ChemChemTech.* 2019. V. 62. N 8. P. 95-101. DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5961.
21. **Nikitin K.S., Polenov Y.V., Egorova E.V.** Decomposition of thiourea dioxide under aerobic and an-aerobic conditions in an aqueous alkaline solution. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2020. V. 94. N 10. P. 2038-2041. DOI: 10.1134/S0036024420100209.
22. **Polenov Y.V., Shestakov G.A., Egorova E.V.** Kinetic model of thiourea dioxide decomposition in aqueous solutions of different acidity. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 61. N 12. P. 87-93 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5835.
23. **Polenov Yu.V., Makarova E.V., Egorova E.V.** Kinetic model of thiourea dioxide decomposition in aqueous ammonia. *Kinet. Catal.* 2014. V. 55. N 5. P. 566-570. DOI: 10.1134/S0023158414040120.
24. **Bard A.J., Faulkner L.R.** Electrochemical methods: Fundamentals and Applications. New York: John Wiley & sons. Inc. 2000. 850 p.
25. **Satterfield C.N.** Mass transfer in heterogeneous catalysis. M.: Khimiya. 1976. 110 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 25.01.2024

Принята к опубликованию 11.03.2024

Received 25.01.2024

Accepted 11.03.2024