



Научная статья

УДК 544.43:[547.661.2;547.469.3]

DOI: 10.52957/2782-1900-2024-5-4-16-25

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ $N,N'$ -ЗАМЕЩЕННЫХ ДИИМИДОВ БИНАФТИЛГЕКСАКАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ С ДИТИОНИТОМ НАТРИЯ В ВОДНО-ЩЕЛОЧНОМ РАСТВОРЕ КИСЛОТЫ

Ю. В. Поленов, Е. В. Егорова

Юрий Владимирович Поленов, д-р хим. наук, профессор; Елена Владимировна Егорова, канд. хим. наук, доцент

Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия,

*polyurij@yandex.ru; egorova306@yandex.ru*

### Ключевые слова:

$N,N'$ -замещенные диимида бинафтилгексакарбонической кислоты, производные диимида перилентетракарбонической кислоты, спектрофотометрия, вольтамперометрия, механизм реакции

**Аннотация.** Исследованы закономерности реакции взаимодействия ряда  $N,N'$ -замещенных диимидов бинафтилгексакарбонической кислоты (кубогенов) с дитионитом натрия, протекающей при образовании периленовых красителей в технологии крашения и печатания хлопчатобумажных тканей. Обнаружено, что в начальной стадии реакции происходит быстрое образование промежуточных продуктов – тетраанионов исходных соединений за счет перехода двух электронов от дитионит-анионов. В дальнейшем указанные промежуточные соединения могут превращаться в исходные дианионы за счет окисления либо кислородом воздуха, либо сульфитом, образующимся из дитионита на первой стадии, а также, в зависимости от природы заместителей при атомах азота в исходных молекулах диимидов, возможна параллельная химическая стадия циклизации с образованием периленовых производных. Наличие обратимой редокс-стадии образования тетрааниона подтверждается также возможностью ее протекания электрохимически на углесталловом электроде. Образование периленовых производных показано методами элементного анализа, ИК- и электронной спектроскопии поглощения. На основании полученных экспериментальных данных для реакций взаимодействия кубогенов, имеющих различные заместители при атомах азота, с дитионитом натрия предложен общий стехиометрический механизм реакции. Полученные результаты могут быть использованы в практике отделки текстильных материалов кубогенами, а также при жидкофазном получении тонкослойных фотоактивных материалов на основе периленовых производных.

### Для цитирования:

Поленов Ю.В., Егорова Е.В. Взаимодействие  $N,N'$ -замещенных диимидов бинафтилгексакарбонической кислоты с дитионитом натрия в водно-щелочном растворе кислоты // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 16-25. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5563/view>



## Введение

Производные N,N'-диимидов 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты (ДБГКК), известные под общим названием кубогены, с 70-х годов прошлого века нашли применение в качестве красителей хлопчатобумажных, льняных и вискозных материалов [1, 2]. В текстильной технологии используется их свойство к циклизации и образованию на тканях прочных периленовых красителей под действием «мягких» восстановителей, таких как дитионит натрия, диоксид тиомочевины, ронгалит [3, 4].

В последнее время наблюдается большой интерес к производным N,N'-диимидов 3,4,9,10-перилентетракарбоновой кислоты, так как они нашли применение в преобразователях солнечной энергии [5-9], биосенсорах [10-13], лазерной технике [14-17]. Общим методом их получения является конденсация перилентетракарбоновой кислоты или ее диангидрида с соответствующими аминами в среде высококипящих органических растворителей или в водной среде под давлением [18]. В результате образуются нерастворимые в водных растворах и плохо растворимые в органических растворителях соединения. Получение производных N,N'-диимидов 3,4,9,10-перилентетракарбоновой кислоты (ДПТКК) путем циклизации кубогенов, которые хорошо растворимы в водно-щелочных растворах, является хорошей альтернативой, позволяющей синтезировать периленовые производные на различного рода волокнистых, пористых, гладких поверхностях, образовывать тонкие пленки различной толщины и структуры. Так, в работе [19] показано, что нанесение производных ДПТКК на пористый оксид титана путем восстановительной циклизации производных ДБГКК в водно-щелочном растворе позволяет получать композиты, обладающие фотоактивными свойствами.

Исследованию стехиометрического механизма реакции восстановительной циклизации указанных производных посвящен целый ряд работ [3, 4, 20-22]. В них показано, что состав и количество образующихся продуктов реакции зависят как от природы заместителей при атомах азота в составе молекул ДБГКК, так и от природы серокислородного восстановителя (дитионит натрия, диоксид тиомочевины, гидроксиметансульфинат натрия). Так, при взаимодействии N,N'-(2,5-диметилфенил)диимида 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты с гидроксиметансульфинатом натрия выход продукта циклизации – периленового производного – составляет 93-97% [20], при взаимодействии с дитионитом натрия в тех же условиях – 35-50%, а с диоксидом тиомочевины – не выше 2%. Показано также, что состав и количество промежуточных и конечных продуктов циклизации зависят от концентрации восстановителя и наличия в растворе кислорода воздуха [4]. Данные закономерности объясняются тем, что в указанных серокислородных соединениях восстановительной активностью обладают не сами по себе молекулы, а различные по природе и реакционной способности интермедиаты, образующиеся при распаде названных соединений: анионы сульфоксидовой кислоты, дитионита, анион-радикалы диоксида серы [3, 23].

Во всех цитируемых работах отмечается, что на первой стадии реакции взаимодействия производных ДБГКК с серокислородными 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, а дальнейшее его взаимодействие с восстановительными частицами приводит к образованию продуктов циклизации либо с отщеплением двух карбоксильных групп от исходных молекул производных ДБГКК (реакция с гидроксиметансульфинатом натрия), либо без отщепления карбоксильных групп (реакция с диоксидом тиомочевины).

Целью настоящей работы явилось выявление природы промежуточного соединения, образующегося в ходе первичной стадии восстановления кубогенов дитионитом натрия, так как именно его образование определяет дальнейший ход реакции и выход продуктов циклизации.

### Экспериментальная часть

Исходные образцы кубогенов (табл. 1) получены и очищены сотрудниками государственного научного центра «НИОПИК» (г. Москва). В качестве восстановителя использовали дитионит натрия компании «ALBITESRL» (Италия) с содержанием основного вещества 89,2%.

Масс-спектры регистрировали на времяпролетном масс-спектрометре Shimadzu Axima Confidence (MALDI-TOF). Инфракрасные спектры 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. Электронные спектры поглощения получали 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.

#### *Методика проведения реакции взаимодействия кубогенов с дитионитом натрия.*

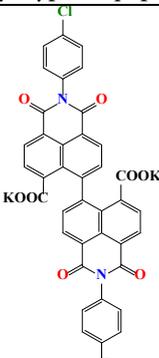
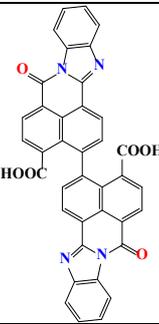
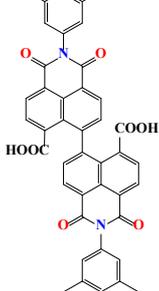
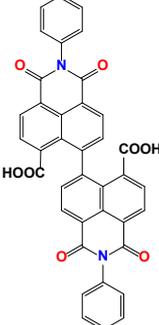
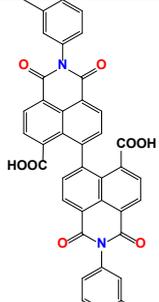
Навески кубогенов массой приблизительно 0,003 г растворяли в 50 мл 0,13 М раствора гидроксида натрия. В мерной колбе на 50 мл растворяли дитионит натрия и доводили до метки дистиллированной водой. Полученные растворы смешивали и наливали в кювету спектрофотометра, если реакцию проводили в аэробных условиях. При проведении реакции в анаэробных условиях через приготовленные растворы перед их смешением в течение 5-7 минут продували аргон. Все опыты проводили при температуре, равной 300 К.

**N,N'-ди(3,5-диметилфенил)диимид-3,4,9,10-перилентетракарбоновой кислоты.** Осадок красного цвета, образующийся после окончания реакции кубогена bis(3,5-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Ph)Cub и выдержки реакционной массы на воздухе, отфильтровывали, сушили и анализировали. ИК-спектр,  $\nu$ , см<sup>-1</sup>: 1642 с (C=O), 1722 с (C=O), 1665 с (C-N<sub>имид</sub>), 792 с, 1260 с, 1460 с (перилен), 2800 сл (-CH<sub>3</sub>). Электронный спектр поглощения



(хлороформ),  $\lambda_{\max}$ , нм: 524, 564, 611. Масс-спектр,  $m/z$  ( $I_{\text{отн}}$ , %) 600,5 (99). Найдено, %: С 79.80; Н 4.53; N 4.42.  $C_{40}H_{28}N_2O_4$ . Вычислено, %: С 80.00; Н 4.66; N 4.51.

Таблица 1. Структурные формулы и названия исследуемых кубогенов

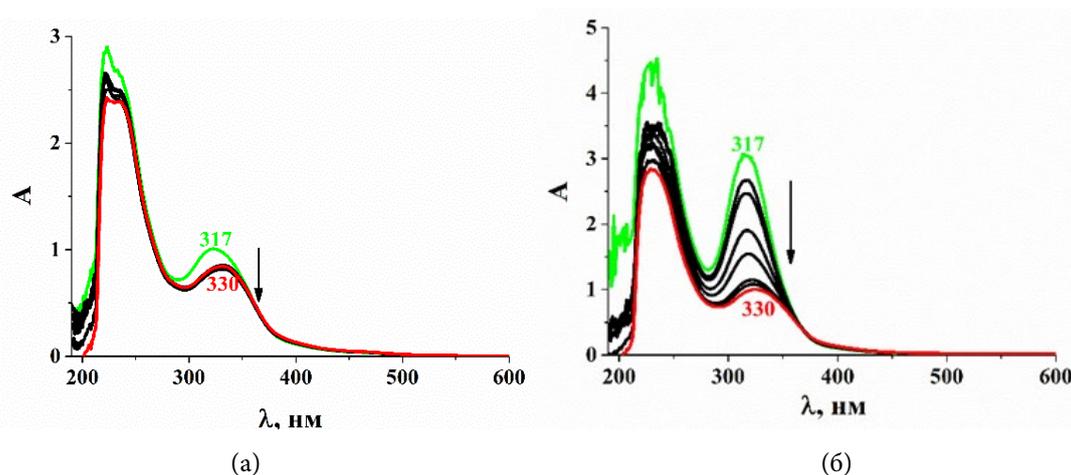
№	Структурная формула	Название
(1)		bis(Cl-Ph)Cub – калиевая соль N,N'-ди(4-хлорфенил)диимида 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты; M = 777.65 г/моль
(2)		bis(BZI)Cub – N,N'-ди(бензимидазол)диимид 1,1'-бинафтил-4,4',8,8'-дикарбоновой кислоты; M = 626.58 г/моль
(3)		bis(3,5-(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ph)Cub – N,N'-ди(3,5-диметилфенил)диимид 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты; M = 688.69 г/моль
(4)		bis(Ph)Cub – N,N'-ди(фенил)диимид 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты; M = 632.58 г/моль
(5)		bis(3-(CH <sub>3</sub> )Ph)Cub – N,N'-ди(3-метилфенил)диимид 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты; M = 660.64 г/моль



**N,N'-ди(бензимидазол)диимид-3,4,9,10-перилентетракарбоновой кислоты.** Осадок фиолетового цвета, образующийся после окончания реакции кубогена bis(BZI)Cub и выдержки реакционной массы на воздухе, отфильтровывали, сушили и анализировали. ИК спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 800-750 с (C-H<sub>бензимидазол</sub>), 1642 с (C=O), 1722 с<sub>p</sub> (C=O), 1665 с (C-N<sub>имид</sub>), 792 с, 1260 с, 1460 с (перилен). Электронный спектр поглощения (водно-щелочной раствор),  $\lambda_{\text{max}}$ , нм [I<sub>отн</sub>, %]: 330 [3,51], 421 [3,85]. Масс-спектр, m/z (I<sub>отн</sub>, %) 536,54 (99). Найдено, %: С 80,37; Н 3,13; N 10,50. C<sub>36</sub>H<sub>16</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>. Вычислено, %: С 80,58; Н 3,01; N 10,44.

### Основная часть

При взаимодействии всех исследуемых кубогенов с дитионитом натрия в водно-щелочном растворе наблюдаются изменения в электронных спектрах поглощения. При этом во всех случаях как в аэробной, так и в анаэробной атмосфере наблюдается гипсохромное смещение полосы поглощения, имеющей максимум при 330 нм, и появление более интенсивной полосы при 317 нм, как это показано на рис.1 на примере калиевой соли N,N'- ди(4-хлорфенил)диимида 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты.

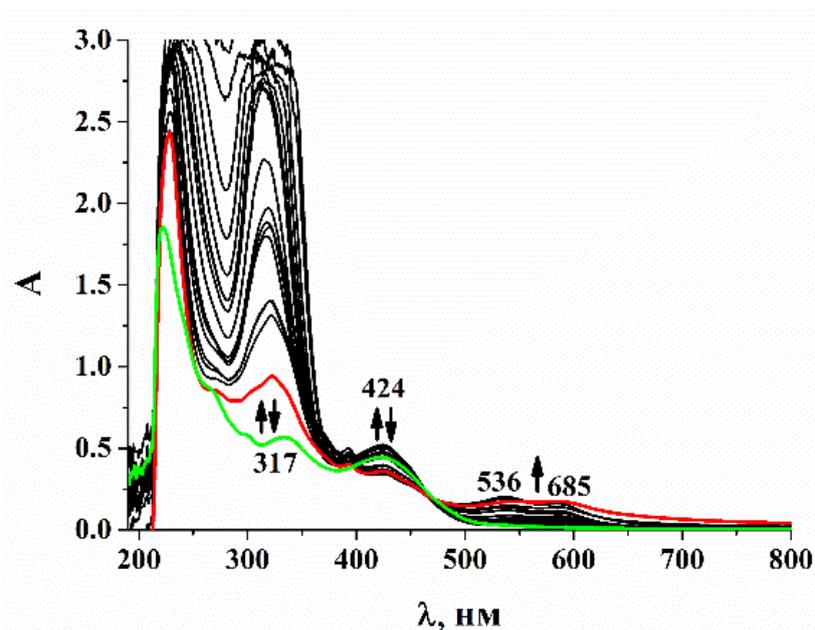


**Рис.1.** Изменение электронных спектров поглощения при взаимодействии bis(Cl-Ph)Cub в водно-щелочном растворе ( $C_{\text{NaOH}} = 0.13$  моль/л) при малой ( $C_{\text{red}} = 3.68 \cdot 10^{-4}$  моль/л) (а) и большой ( $C_{\text{red}} = 1.84 \cdot 10^{-3}$  моль/л) (б) концентрациях дитионита натрия.  $T = 306$  К,  $C_{\text{куб.}} = 3.9 \cdot 10^{-5}$  моль/л. Зеленый спектр – раствор после смешения реагентов, красный спектр – раствор после завершения реакции.

Указанные изменения в спектрах кубогенов происходят практически мгновенно при смешении реагентов. В дальнейшем, с течением времени, интенсивность спектральной полосы с максимумом 317 нм медленно уменьшается, и, в конечном итоге, спектры поглощения трансформируются в исходные спектры кубогенов с максимумом при 330 нм для всех изученных кубогенов и 330 и 420 нм для bis(BZI)Cub. При этом необходимо отметить, что уменьшение интенсивности полосы с максимумом 317 нм быстрее происходит в аэробной атмосфере, в то же самое время в анаэробной для всех кубогенов происходит медленнее, а для bis(3-(CH<sub>3</sub>)Ph)Cub и bis(Ph)Cub в анаэробной атмосфере при больших концентрациях дитионита натрия ее интенсивность может сохраняться неизменной в течение нескольких суток.



При взаимодействии bis(BZI)Cub с дитионитом натрия как в аэробной, так и в анаэробной атмосфере при больших концентрациях в спектрах поглощения появляются полосы поглощения с максимумами при 536 и 685 нм, причем в электронных спектрах наблюдается изобестическая точка, что свидетельствует о том, что в реакции имеет место последовательная стадия образования одного из продуктов (рис. 2). Подобные изменения в спектрах наблюдались также для кубогенов bis(3,5-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Ph)Cub и bis(Ph)Cub, однако интенсивности полос в длинноволновой части спектра были незначительными.



**Рис.2.** Изменение электронных спектров поглощения при взаимодействии bis(BZI)Cub с дитионитом натрия в аэробных условиях в водно-щелочном растворе.  $C_{\text{NaOH}} = 0,13$  моль/л;  $C_{\text{восст}} = 1,84 \cdot 10^{-3}$  моль/л;  $C_{\text{куб}} = 3,9 \cdot 10^{-5}$  моль/л;  $T = 300$  К. Зеленый спектр – раствор после смешения реагентов, красный спектр – раствор после завершения реакции.

Как было показано во введении, в результате действия восстановителей на производные ДБГКК происходит циклизация молекул с образованием периленовых производных. Анализы конечных продуктов реакций взаимодействия bis(3,5-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Ph)Cub и bis(BZI)Cub с дитионитом, результаты которых приведены в экспериментальной части работы, показали, что полосы поглощения с максимумами при 536 и 685 нм принадлежат продуктам циклизации указанных кубогенов – N,N'-диимидам перилентетракарбоновых кислот с соответствующими заместителями. В водно-щелочном растворе эти соединения присутствуют в виде дианионов.

Полосы поглощения в электронных спектрах с максимумами при 317 нм для всех исследуемых кубогенов можно отнести к соответствующим тетраанионам исходных соединений, которые образуются за счет присоединения двух электронов от восстановителя – аниона дитионита  $-S_2O_4^{2-}$ . В нашей работе [22] показано, что тетраанионы bis(BZI)Cub образуются также при электрохимическом восстановлении исходного кубогена в водно-щелочном растворе на углеситалловом электроде.

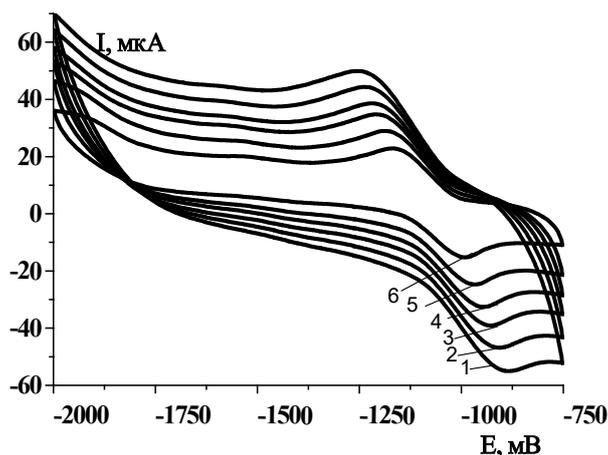


Рис. 3. [22] Влияние скорости развертки потенциала (скорости сканирования) на вольтамперные кривые.  $v$ , мВ/с: 1-20; 2-40; 3-60; 4-80; 5-100; 6-120.

На рис. 3 приведены вольтамперные зависимости, на которых имеются два пика, отвечающие катодному и анодному процессам превращения кубогена, что свидетельствует об обратимости электродной реакции.

Анализ приведенных зависимостей показал, что в обратимом электродном процессе участвуют два электрона. В то же время дитионит натрия является также двухэлектронным восстановителем.

На основании вышеприведенных данных можно предположить общий стехиометрический механизм реакции взаимодействия  $N,N'$ -диимидов 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты (ДБГКК) с дитионитом натрия (схема 1). В первичной стадии реакции взаимодействия дитионита натрия с кубогенами (1) происходит обратимое восстановление исходных молекул с образованием тетраанионов (2), а в дальнейшем, в зависимости от условий (природа заместителя при атомах азота, концентрация дитионита, аэробная или анаэробная атмосфера) протекает химическая стадия циклизации с отщеплением двух карбоксильных групп и образуется дианион диимида перилентетракарбоновой кислоты (3).

Обратная стадия перехода тетраанионов (2) в исходный кубоген (1) может протекать за счет кислорода воздуха, на что указывает влияние атмосферы (табл. 2), а также за счет взаимодействия с продуктами окисления дитионита (сульфит-анионы). При контакте с кислородом воздуха дианион (3) превращается в твердое соединение (4).

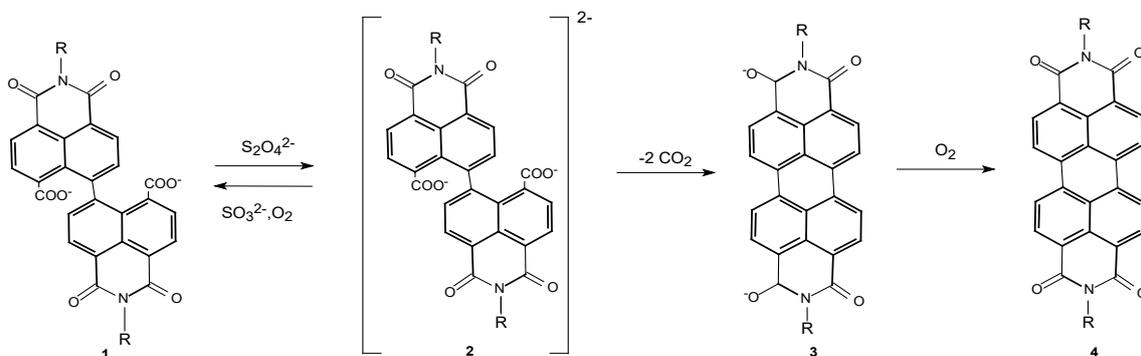


Схема 1. Стехиометрический механизм реакции взаимодействия ДБГКК с дитионитом натрия в водно-щелочном растворе ( $R = Ph; Cl-Ph; 3,5-(CH_3)_2Ph; 3-(CH_3)Ph$ ).

**Таблица 2.** Состав продуктов реакции в зависимости от природы кубогена и условий проведения реакции.

№ п/п	Кубоген	Аэробные условия		Анаэробные условия	
		Малая концентрация дитионита	Большая концентрация дитионита	Малая концентрация дитионита	Большая концентрация дитионита
1	bis(Cl-Ph)Cub	тетраанион в малых количествах	тетраанион в больших количествах	тетраанион в малых количествах	тетраанион в больших количествах
2	bis(BZI)Cub	продукты отсутствуют	тетраанион в больших количествах + продукт циклизации	тетраанион в больших количествах	тетраанион в больших количествах + продукт циклизации
3	bis(3,5-(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ph)Cub	продукты отсутствуют	тетраанион в больших количествах + продукт циклизации в малых	тетраанион в малых количествах	тетраанион в больших количествах + продукт циклизации в малых
4	bis(Ph)Cub	продукты отсутствуют	тетраанион + продукт циклизации в малых количествах	тетраанион в малых количествах	тетраанион в больших количествах
5	bis(3-(CH <sub>3</sub> )Ph)Cub	тетраанион в малых количествах	тетраанион в больших количествах	тетраанион в малых количествах	тетраанион в больших количествах

В табл. 2 приведены данные, показывающие влияние природы заместителей, концентрации дитионита и газовой среды, в которой протекает реакция, на относительные количества промежуточного соединения (2) и конечного продукта (3) в растворе. Оценка количества образующихся в результате реакции анионов проведена по величине оптической плотности растворов на максимумах поглощения.

Анализ приведенных данных показывает, что в аэробных условиях при малых концентрациях восстановителя реакция либо не протекает, либо тетраанионы образуются в небольших количествах. При больших концентрациях дитионита натрия тетраанионы образуются как в инертной атмосфере, так и в воздушной. Циклизация тетраанионов с образованием периленового цикла протекает в заметных количествах только в случае bis(3,5-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Ph)Cub и bis(BZI)Cub, что, по-видимому, связано с размерами заместителей при атомах азота.

### Выводы и рекомендации

В результате выполненной работы установлено, что в реакции взаимодействия N,N'-замещенных диимидов бинафтилгексакарбоновой кислоты (кубогенов) с дитионитом натрия в водно-щелочном растворе на первой стадии реакции образуются тетраанионы исходных соединений, которые в дальнейшем могут либо переходить в



исходное состояние, либо утрачивать две группы  $\text{CO}_2$  и трансформироваться в дианионы  $\text{N,N}'$ -замещенных диимидов-3,4,9,10-перилентетракарбоновой кислоты.

Полученные результаты необходимо учитывать в технологии отделки текстильных материалов с использованием кубогенов, а также при жидкофазном получении тонких пленок фотоактивных материалов на основе периленовых производных.

### Благодарности

*Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).*

### Список источников

1. Докунихин Н.С., Ворожцов Г.Н., Алексеев В.И., Филиппова М.С., Шулепова О.И., Масанова Н.Н., Рябинин В.А. Кубогены – красители нового типа // *Химическая индустрия*. 1981. № 10. С. 592-595.
2. Патент СССР № 919342 / Ворожцов Г.Н., Масанова Н.Н., Алексеев В.И., Соломатин Г.Г. Оpubл. 1983.
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, No. 12. P. 1837-1840.
4. 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, No. 4. P. 631-635. DOI: 10.1134/S1070363221040095.
5. 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, No. 21. P. 12055 - 12064. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b03093.
6. Canto-Aguilar E., Gutiérrez-Moreno D., Sastre-Santos A., Mori-kawa D., Abe M., Fernández-Lázaro F., Oskam G., Mori S. Identification of the loss mechanisms in TiO<sub>2</sub> and ZnO solar cells based on blue, piperidinyl-substituted, monoanhydride perylene dyes // *Electrochim. Acta*. 2020. V. 355. Art. 136638. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136638.
7. Deng M., Zhang G., Yu L., Xu X., Peng Q. Noncovalent interaction enables planar and efficient propellerlike perylene diimide acceptors for polymer solar cells // *Chem. Eng. J.* 2021. V. 426, No. 12. Art. 131910. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131910.
8. 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 and Pigments*. 2018. V. 153. P. 182-188. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131910.
9. 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. No. 8. P. 1686-1696. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131910.
10. Georgiev N.I., Sakr A.R., Bojinov V.B. Design and synthesis of novel fluorescence sensing perylene diimides based on photoinduced electron transfer // *Dyes and Pigments*. 2011. V. 91, No. 3. P. 332-339. DOI: 10.1016/j.dyepig.2011.04.015.
11. 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.
12. Sekida S., Kameyama T., Koga T., Hadano S., Watanabe S., Niko Y. Highly lipophilic and solid emissive N-annulated perylene bisimide syn-thesis 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.
13. **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 bioapplications // *Dyes and Pigments*. 2020. V. 180. Art. 108488 DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108488.
  14. **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), No. 980. DOI: 10.3390/ma15030980.
  15. **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), No. 8208. DOI: 10.1038/s41598-018-26502-5.
  16. **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), No. 4406. DOI: 10.3390/molecules24234406.
  17. **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: dx.doi.org/10.1021/jo2001963.
  18. Патент СССР №248870 / **Роговик В.И., Стапвинчук В.Г., Шалимова Г.В., Заботина Е.А.** Опубл. 1969.
  19. **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. Материалы международного научно-практического фестиваля*. Иваново. 2022. С. 196-203.
  20. **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.
  21. **Поленов Ю.В., Никитин К.С., Егорова Е.В., Патрушева Д.А.** 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 тиомочевины в водно-щелочном растворе // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65, № 9. С. 47-54. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6639.
  22. **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, № 6. С. 80-87. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.7056.
  23. **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.

Поступила в редакцию 02.09.2024

Одобрена после рецензирования 19.09.2024

Принята к опубликованию 23.09.2024