



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](mailto:polyurij@yandex.ru); [egorova306@yandex.ru](mailto: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.*

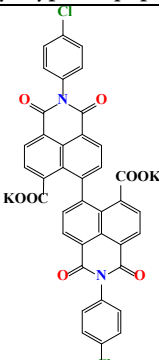
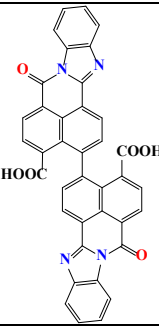
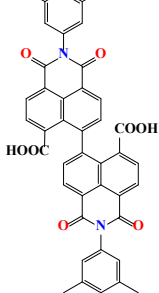
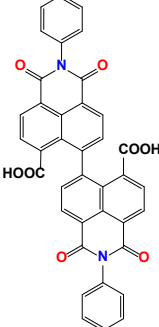
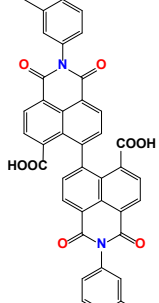
Навески кубогенов массой приблизительно 0,003 г растворяли в 50 мл 0,13 М раствора гидроксида натрия. В мерной колбе на 50 мл растворяли дитионит натрия и доводили до метки дистиллированной водой. Полученные растворы смешивали и наливали в кювету спектрофотометра, если реакцию проводили в аэробных условиях. 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

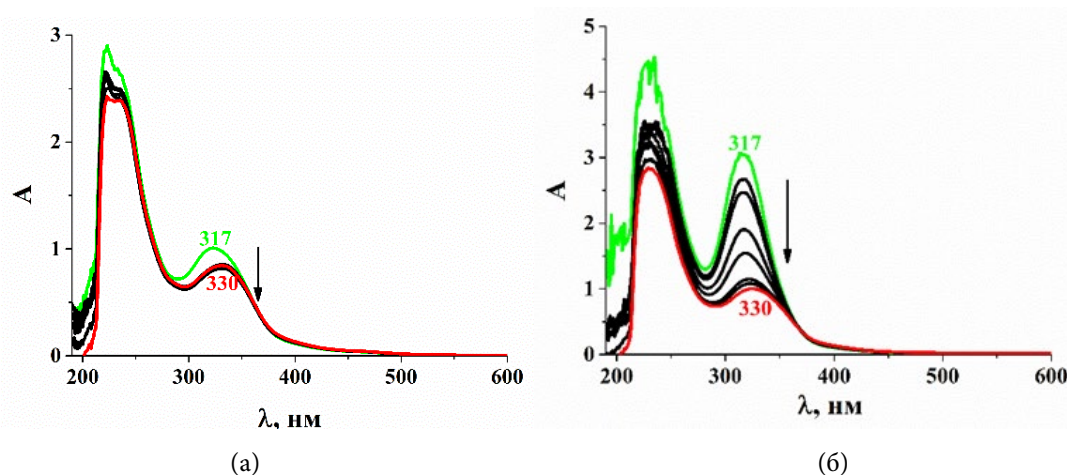
№	Структурная формула	Название
(1)		bis(Cl-Ph)Cub – калиевая соль N,N'-ди(4-хлорфенил)диимида 1,1'-бинафтил-4,4',5,5',8,8'-гексакарбоновой кислоты; M = 777.65 г/моль
(2)		bis(BZI)Cub – N,N'-ди(бензимидазол)диимид 1,1'-бинафтил-4,4',8,8'-дикарбоновой кислоты; M = 626.58 г/моль
(3)		bis(3,5-(CH <sub>3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

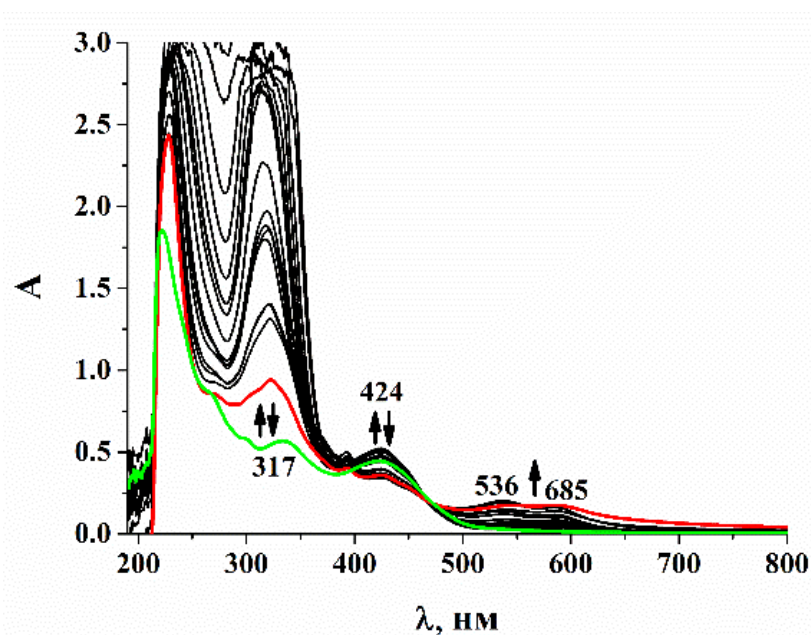


**Рис.1.** Изменение электронных спектров поглощения при взаимодействии bis(Cl-Ph)Cub в водно-щелочном растворе ( $C_{\text{NaOH}} = 0.13$  моль/л) при малой ( $C_{\text{red}} = 3.68 \cdot 10^{-4}$  моль/л) (а) и большой ( $C_{\text{red}} = 1.84 \cdot 10^{-3}$  моль/л) (б) концентрациях дитионита натрия.  $T = 306$  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.

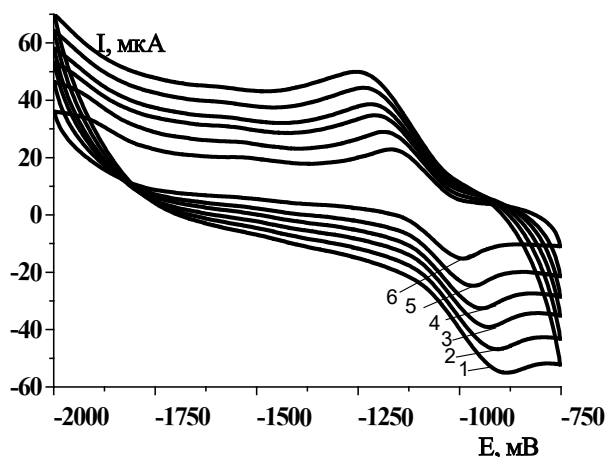


Рис. 3. [22] Влияние скорости развертки потенциала (скорости сканирования) на вольтамперные кривые.  $v$ , мВ/с: 1-20; 2-40; 3-60; 4-80; 5-100; 6-120.

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).

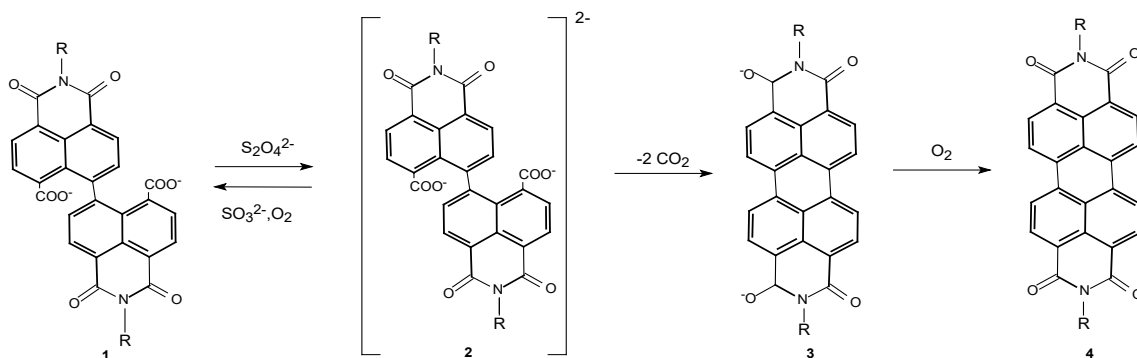


Схема 1. Стехиометрический механизм реакции взаимодействия ДБГКК с дитионитом натрия в водно-щелочном растворе ( $R = Ph; Cl-Ph; 3,5-(CH_3)_2Ph; 3-(CH_3)Ph$ ).

**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  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  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