

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ 2,2-ДИ(4-НИТРОФЕНИЛ)-1-ХЛОРЕТЕНА И 2,2-ДИ(4-НИТРОФЕНИЛ)-1,1-ДИХЛОРЕТЕНА С НИТРИТОМ НАТРИЯ**

Е. А. Гузов, В. Н. Казин \*, М. Б. Кужин

УДК 543.42

*Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, 150003, Ярославль, Россия; e-mail: kaz@uniyar.ac.ru*

(Поступила 19 сентября 2019)

Методами ЯМР <sup>1</sup>H- и ИК спектроскопии, хромато-масс-спектрометрии, данными балансовых опытов и высокоэффективной жидкостной хроматографии установлены структуры образующихся продуктов реакций 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена и 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена с нитритом натрия и их соотношение. Показано, что в реакции 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена с нитрит-ионом в диметилформамиде образуются 4,4'-динитробензофенон, оксим 4,4'-динитробензофенона и 4,4'-динитробензанилид в соотношении 50, 30 и 20 % соответственно. Продуктами взаимодействия 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена с NaNO<sub>2</sub> в ДМФА являются 4,4'-динитробензофенон (95—97 %) и оксим 4,4'-динитробензофенона (2.5—3.0 %).

**Ключевые слова:** 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтен, 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтен, нитрит-ион, реакционная способность, механизм реакции, продукты реакции.

*We established the structures of the products of reactions of 2,2-di (4-nitrophenyl)-1-chloroethene and 2,2-di (4-nitrophenyl)-1,1-dichloroethene with sodium nitrite and their ratio by <sup>1</sup>H NMR and IR spectroscopy, chromatography-mass spectrometry, data from balance experiments, and high performance liquid chromatography. It is shown that in the reaction of 2,2-di (4-nitrophenyl)-1-chloroethene with a nitrite ion in dimethylformamide, 4,4'-dinitrobenzophenone, oxime of 4,4'-dinitrobenzophenone, and 4,4'-dinitrobenzani- lide are formed at a ratio of 50, 30, and 20%, respectively. The reaction products of 2,2-di (4-nitrophenyl)- 1,1-dichloroethene with NaNO<sub>2</sub> in DMF are 4,4'-dinitrobenzophenone (95–97%) and oxime of 4,4'-di- nitrobenzophenone (2.5–3.0%).*

**Keywords:** 2,2-di(4-nitrophenyl)-1-chloroethene, 2,2-di(4-nitrophenyl)-1,1-dichloroethene, nitrite-ion, reactivity, mechanism of reaction, reaction products.

**Введение.** Важное место в разработке целенаправленных методов синтеза полифункциональных соединений различных классов принадлежит выбору исходных реагентов. Определенный интерес представляет использование в качестве субстратов нитрозамещенных 2,2-дифенил-1,1,1-трихлорэтанов, что объясняется их высокой реакционной способностью и многообразием путей преобразования. Соединения, полученные на основе хлорала, могут быть использованы в качестве биологически активных веществ, полупродуктов для синтеза полимеров [1, 2], красителей, модификаторов и реагентов для органического синтеза [3]. Большое число публикаций посвящено изучению реакционной способности 2,2-ди(4-хлорфенил)-1,1,1-трихлорэтана и его производных в присутствии различных реагентов [4—10], что связано в первую очередь с высокой биологической активностью соединений данного ряда.

Полимерные материалы, синтезированные на основе полифункциональных аминсоединений ряда 2,2-дифенил-1,1,1-трихлорэтана и 2,2-дифенил-1,1-дихлорэтена характеризуются негорючестью, способностью к самозатуханию, однако не отличаются высокой термостойкостью. К ее повышению приводит трансформация трихлорэтилиденовой группы в 2,2-диарил-1,1,1-трихлорэтанах в карбонильную [11]. Например, полиамиды и полиимиды, содержащие бензофеноновые фрагменты, обла-

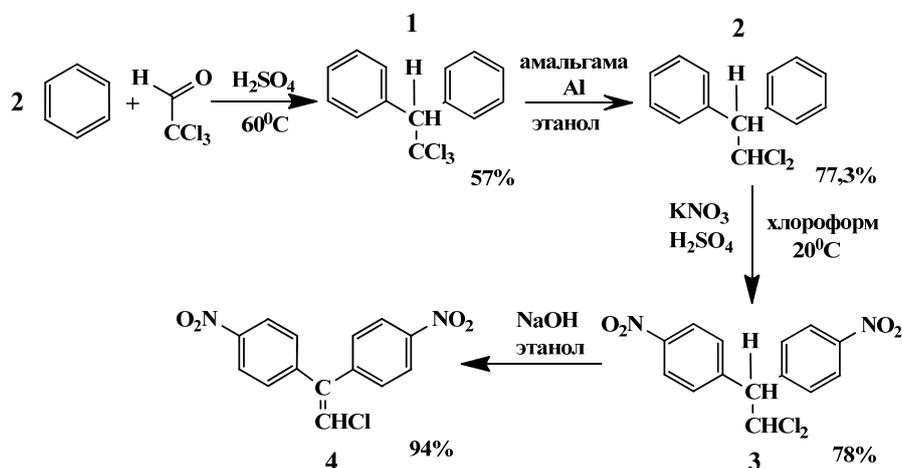
**PRODUCTS IDENTIFICATION OF REACTION OF 2,2-DI(4-NITROPHENYL)-1-CHLOROETHENE AND 2,2-DI(4-NITROPHENYL)-1,1-DICHLOROETHENE WITH SODIUM NITRITE**

**E. A. Guzov, V. N. Kazin \*, M. B. Kuzhin** (P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, 150003, Russia; e-mail: kaz@uniyar.ac.ru)

дают растворимостью, хорошими пленкообразующими свойствами. Термостойкость пленок составляет  $>400$  °С.

В работах [12—19] рассмотрено взаимодействие нитрозамещенных 2,2-дифенил-1,1,1-трихлорэтанов с нитритами щелочных металлов в апротонных растворителях. Показано [15], что в интервале температур 30—80 °С протекает реакция дегидрохлорирования с образованием 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена (выход 96—98 %). В [20] изучена кинетика элиминирования 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1,1-трихлорэтана нитрит-ионом и определены термодинамические параметры реакции. Методом газожидкостной хроматографии (ГЖХ) и данными балансовых опытов установлено, что в среде апротонных растворителей в ходе реакции не образуются промежуточные соединения. Выполнено квантово-химическое моделирование, определен механизм реакции *E2H*. При повышении температуры до 90—130 °С в реакции с нитрит-ионом отмечено неочевидное превращение трихлорэтиленовой группы в карбонильную, при этом из 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1,1-трихлорэтана образуется 4,4'-динитробензофенон с выходом 95—97 %. Предложен ряд возможных схем образования 4,4'-динитробензофенона [16, 18, 19], однако механизм трансформации не описан.

Для детального изучения закономерностей процесса и установления механизма реакции рассмотрим влияние строения мостиковой группировки на ход реакции и строение образующихся продуктов. С этой целью синтезирован 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтен:



2,2-Дифенил-1,1,1-трихлорэтан **1** получен реакцией конденсации бензола с хлоралем в присутствии концентрированной серной кислоты в течение 5 ч при температуре 60 °С с выходом 56—58 %. Соединение **1** восстановлено амальгамой алюминия в спиртовой среде при кипении реакционной массы. 2,2-Дифенил-1,1-дихлорэтан **2** получен с выходом 77—79 %, время реакции 2 ч.

Реакцию нитрования соединения **2** проводили смесью нитрата калия с концентрированной серной кислотой в среде хлороформа. Реакция протекает в течение 5 ч при комнатной температуре. Выход соединения **3** 78—80 %. 2,2-Ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтен **4** синтезирован реакцией дегидрохлорирования соединения **3** щелочью в спиртовой среде при кипении реакционной массы в течение 1 ч, выход 93—95 %.

Цель настоящей работы — установление структуры целевых и побочных продуктов реакций 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена и 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена с нитритом натрия в ДМФА для исследования механизмов неизученных реакций.

**Эксперимент.** 2,2-Ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтен и 4,4'-динитробензофенон получены по методикам [15]. Оксим 4,4'-динитробензофенона и 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтен синтезированы согласно [21]. Анализ проб реакционных смесей осуществлялся на жидкостном хроматографе Perkin Elmer с УФ-детектором: сорбент С18, длина колонки 15 см, внутренний диаметр 4.6 мм, размер пор 100 Å,  $T_{\text{кол}} = 30$  °С, состав элюента  $\text{H}_2\text{O}:\text{ACN} = 30:70$ ,  $W_{\text{пот}} = 0.8$  мл/мин,  $\lambda_{\text{дет}} = 254$  нм,  $V_{\text{пр}} = 10$  мкл.

Соединения проанализированы на хромато-масс-спектрометре, сочетающем в себе газожидкостной хроматограф Perkin Elmer Clarus 680 (GC) и масс-спектрометрический детектор Clarus SQ 8T (МС). В качестве неподвижной фазы выступала капиллярная колонка ELITE-5ms 30 м×0.25 мм×0.25 мкм. Условия хроматографирования и детектирования: газ-носитель — гелий “х.ч.”;  $W_{\text{пот}} = 1$  мл/мин;

$T_{\text{инж}} = 280 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{кол}} = 200\text{--}220 \text{ }^\circ\text{C}$  (в зависимости от соединения); деление потока 1:30;  $V_{\text{пр}} = 1 \text{ мкл}$ ;  $T_{\text{источника}}$  и трансфер-линии  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $E_{\text{ион}} = 70$  и  $12 \text{ эВ}$ .

ИК спектры зарегистрированы на спектрометре Perkin Elmer Spectrum 65 FT-IR, приставке UATR методом НПВО. Для получения спектров ПМР использован прибор BrukerDRX500 SF-500 МГц, растворитель — ДМСО- $d_6$ - $\text{CCl}_4$ , внутренний стандарт — тетраметилсилан.

**Результаты и их обсуждение.** Взаимодействие 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена и 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена с нитритом натрия проводили в ДМФА. Контроль за ходом реакций осуществлялся методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ).

Отмечена высокая реакционная способность 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена: при  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  реакция завершается в течение 5 мин, для 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена время реакции с нитритом натрия 1—1.5 ч. Полная конверсия 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена наблюдается при  $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $t = 0.5 \text{ ч}$ ).

При взаимодействии 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена образуется смесь трех соединений, содержание которых увеличивается в ходе реакции (рис. 1).

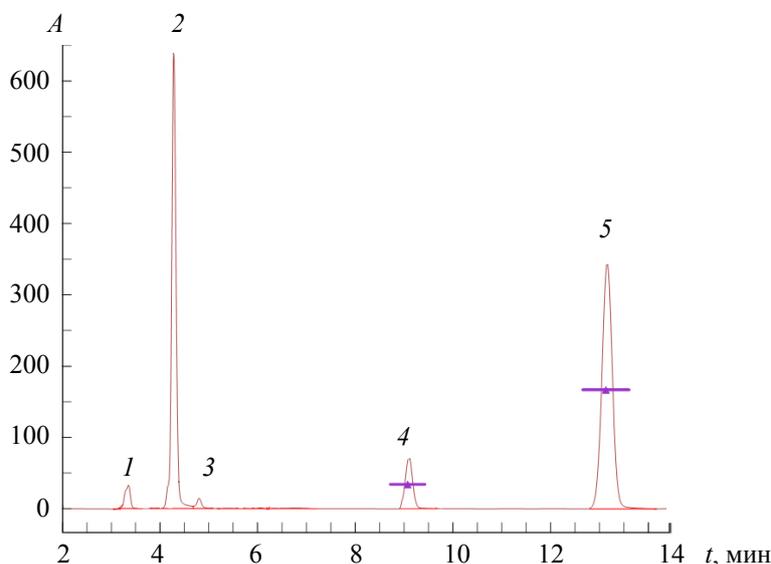


Рис. 1. Хроматограмма (ВЭЖХ), полученная в ходе реакции 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена с нитритом натрия: 1 — оксим 4,4'-динитробензофенона; 2 — 4,4'-динитробензофенон; 3 — 4,4'-динитробензанилид; 4 — 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтен; 5 — внутренний стандарт

С помощью хромато-масс-спектрометрии проведено разделение продуктов реакционной смеси на индивидуальные соединения, выполнена расшифровка их масс-спектров. Одним из продуктов является 4,4'-динитробензофенон (рис. 1, соединение 2, время выхода 4.3 мин); масс-спектр ( $E_{\text{ион}} = 70 \text{ эВ}$ ) ( $m/z$ , интенсивность, %): 272 (47.2) [ $\text{M}^+$ ]; 242 (5.8) [ $\text{M}^+ - \text{NO}$ ]; 226 (3.4) [ $\text{M}^+ - \text{NO}_2$ ]; 180 (5.3) [ $\text{M}^+ - 2\text{NO}_2$ ]; 150 (100) [ $\text{M}^+ - \text{Ar-NO}_2$ ]; 120 (24.5) [ $\text{M}^+ - \text{Ar-NO}_2, \text{NO}$ ]; 104 (21.6) [ $\text{M}^+ - \text{Ar-NO}_2, \text{NO}_2$ ]; 92 (19.8) [ $\text{M}^+ - \text{CO-Ar-NO}_2, \text{NO}$ ]; 76 (10.1) [ $\text{Ar}^+$ ].

Для определения структуры соединений 1 и 3 проведен встречный синтез оксима 4,4'-динитробензофенона по известной методике — взаимодействием 4,4'-динитробензофенона с гидроксиламином [21]. Получены неочевидные результаты: по данным ВЭЖХ в реакционной смеси отмечены три пика, аналогичные по времени выхода продуктам реакции 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена с нитрит-ионом (рис. 1). Пик с наибольшей интенсивностью соответствует накоплению целевого продукта — оксима 4,4'-динитробензофенона (время выхода 3.4 мин). Сигнал, интенсивность которого падает в ходе реакции, отвечает 4,4'-динитробензофенону (время выхода 4.3 мин).

Разработан метод выделения оксима 4,4'-динитробензофенона из смеси, основанный на различной растворимости продуктов в ДМФА с применением колоночной хроматографии. Проанализированы масс-спектры оксима 4,4'-динитробензофенона, полученные при  $E_{\text{ион}} = 70$  и  $12 \text{ эВ}$  (табл. 1). Следует отметить, что масс-спектры оксима 4,4'-динитробензофенона не содержат сигнала молеку-

**Т а б л и ц а 1. Масс-спектры оксима 4,4'-динитробензофенона**

| <i>m/z</i> | 70 эВ  | 12 эВ  |
|------------|--|--|
| 271        | (25.1) [M <sup>+</sup> - O]  | (23.2)   |
| 254        | (78.2) [M <sup>+</sup> - O, O, H]                                  | (96.8)   |
| 241        | —  | 24.3) [M <sup>+</sup> - O, NO]                   |
| 225        | —  | (100) [M <sup>+</sup> - O, NO <sub>2</sub> ]     |
| 224        | (100) [M <sup>+</sup> - NO <sub>2</sub> , O, H,]                   | (37.7)   |
| 195        | —  | (8.1) [M <sup>+</sup> - O, NO, NO <sub>2</sub> ] |
| 179        | (73.9) [M <sup>+</sup> - O, 2NO <sub>2</sub> ]                     | (10.9)   |
| 149        | (58.2) [M <sup>+</sup> - O, Ar-NO <sub>2</sub> ]                   | (3.2)  |
| 103        | (71.6) [M <sup>+</sup> - O, Ar-NO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> ] | —  |
| 76         | (81.2) [Ar <sup>+</sup> ]  | —  |

лярного иона. Аналогичные результаты получены в [22] при исследовании масс-спектров ряда ароматических оксимов. Показано, что при анализе оксима бензофенона методом хромато-масс-спектрометрии происходит термическая трансформация его в соответствующий имин. Вероятно, в экспериментальном масс-спектре оксима 4,4'-динитробензофенона сигнал *m/z* 271 соответствует имину 4,4'-динитробензофенона. Отсутствие сигнала молекулярного иона *m/z* 287 в масс-спектре при снижении  $E_{\text{ион}}$  косвенно подтверждает предположение о трансформации молекулы в процессе анализа.

При сравнении масс-спектров с  $E_{\text{ион}} = 70$  и 12 эВ следует отметить изменения в качественном и количественном составе фрагментарных ионов. При высокой  $E_{\text{ион}}$  отсутствуют фрагменты с *m/z* 241, 225, 195. Наличие фрагментарных ионов с *m/z* 241, 195 свидетельствует о характерной перегруппировке нитро- и отщеплении нитрогрупп. Фрагментарные ионы с *m/z* 224—225 предположительно отличаются присутствием или отсутствием протона в мета-положении бензольного кольца. При  $E_{\text{ион}} = 70$  эВ в масс-спектре присутствуют сигналы, соответствующие катиону ароматического кольца и бензольному кольцу с фрагментом мостиковой группировки.

Для подтверждения структуры оксима 4,4'-динитробензофенона зарегистрированы ЯМР <sup>1</sup>H- и ИК спектры. ЯМР <sup>1</sup>H ( $\delta$ , м.д.): 7.59; 7.66; 8.18; 8.33 (ароматические протоны); 12.0 (протон ОН-группы); ИК спектр (см<sup>-1</sup>): 1340, 1520 (NO<sub>2</sub>); 1655 (C=N); 3200 (O-H) [23].

По данным ВЭЖХ (рис. 1) добавление оксима 4,4'-динитробензофена, полученного встречным синтезом, в реакционную смесь 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена с нитритом натрия приводит к увеличению интенсивности сигнала соединения 1.

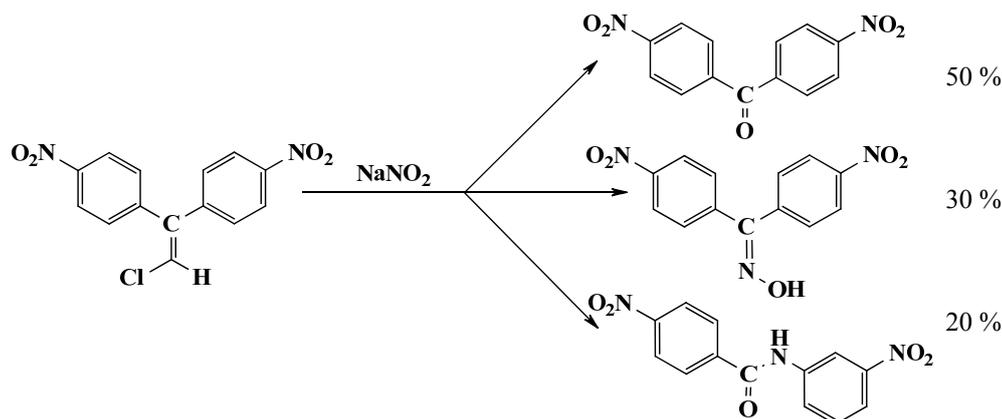
Не удалось выделить соединение 3 из смеси в чистом виде. Методом хромато-масс-спектрометрии проведено разделение смеси на индивидуальные соединения и получены масс-спектры ( $E_{\text{ион}} = 70$  и 12 эВ), согласно которым одним из продуктов является 4,4'-динитробензанилид (табл. 2).

**Т а б л и ц а 2. Масс-спектры 4,4'-динитробензанилида**

| <i>m/z</i> | 70 эВ  | 12 эВ   |
|------------|--|---|
| 287        | (100) [M <sup>+</sup> ]  | (100)   |
| 270        | (58.8) [M <sup>+</sup> - O, H];                                    | (28.2)  |
| 257        | —  | (16.7) [M <sup>+</sup> - NO]                  |
| 254        | (50.8) [M <sup>+</sup> - O, -O, H]                                 | (10.2)  |
| 241        | —  | (24.4) [M <sup>+</sup> - NO <sub>2</sub> ]    |
| 240        | (31.2) [M <sup>+</sup> - NO, O, H];                                | —   |
| 224        | (97.5) [M <sup>+</sup> - NO <sub>2</sub> , O, H]                   | (8.1)   |
| 211        | —  | (9.9) [M <sup>+</sup> - NO, NO <sub>2</sub> ] |
| 195        | —  | (7.4) [M <sup>+</sup> - 2NO <sub>2</sub> ]    |
| 194        | (30.5) [M <sup>+</sup> - NO <sub>2</sub> , NO, O, H]               | —   |
| 178        | (55.9) [M <sup>+</sup> - 2NO <sub>2</sub> , O, H]                  | —   |
| 149        | (41.5) [M <sup>+</sup> - Ar-NO <sub>2</sub> , O]                   | —   |
| 103        | (44.3) [M <sup>+</sup> - Ar-NO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , O] | —   |
| 76         | (84.9) [Ar <sup>+</sup> ]  | —   |

При фрагментации молекулярного иона 4,4'-динитробензанилида происходят процессы перегруппировки в нитрогруппах, отщепления атома водорода и кислорода с образованием фрагмента  $m/z$  270. При  $E_{\text{ион}} = 12$  эВ фрагментация ограничивается отщеплением двух нитрогрупп с образованием фрагмента с  $m/z$  195. При повышении  $E_{\text{ион}}$  до 70 эВ происходит разрыв связей и образуются фрагменты с  $m/z$  149, 103, 76, аналогичные масс-спектру оксима 4,4'-динитробензофенона (табл. 1).

Результаты балансовых опытов показывают, что при взаимодействии 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена с нитритом натрия в ДМФА образуются 4,4'-динитробензофенон, оксим 4,4'-динитробензофенона и 4,4'-динитробензанилид в соотношении 50:30:20 %:



Исследованы структуры продуктов реакции 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена с нитритом натрия в среде ДМФА. Методом ВЭЖХ установлено (рис. 2), что кроме пика 4,4'-динитробензофенона ( $t = 4.27$  мин) присутствует сигнал соединения с временем выхода 3.36 мин (оксим 4,4'-динитробензофенона).

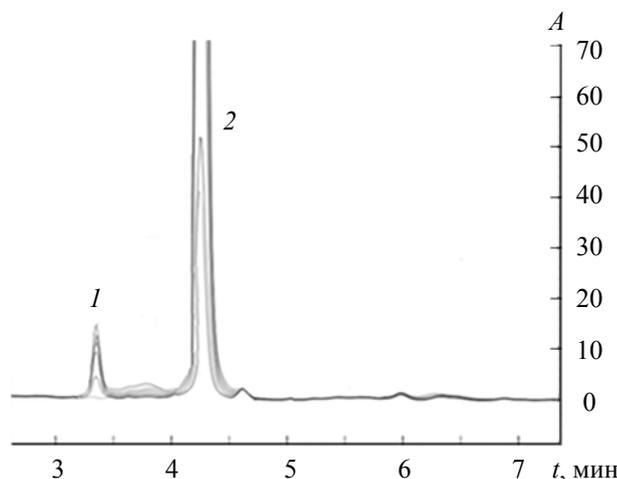


Рис. 2. Хроматограммы (ВЭЖХ) серии проб реакционной смеси, отбираемых в ходе реакции 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена с нитритом натрия в ДМФА: 1 — оксим 4,4'-динитробензофенона ( $t = 3.36$  мин); 2 — 4,4'-динитробензофенон ( $t = 4.27$  мин)

Отмечено увеличение интенсивности сигнала, соответствующего оксиму 4,4'-динитробензофенона, вплоть до момента полной конверсии 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена в 4,4'-динитробензофенон. Для идентификации продуктов реакционной смеси при взаимодействии 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена с нитритом натрия использован метод хромато-масс-спектрометрии. На ГЖХ-масс-хроматограмме (рис. 3) кроме 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена ( $t = 9.85$  мин) и 4,4'-динитробензофенона ( $t = 5.48$  мин) регистрируется сигнал соединения с временем выхода 6.78 мин. Показано, что добавление в реакционную смесь оксима 4,4'-динитробензофенона сопро-

вождается ростом сигнала на ГЖХ-масс-хроматограмме (рис. 3,  $t = 6.78$  мин), а также увеличением интенсивности пика соединения с временем выхода 3.36 мин на хроматограмме ВЭЖХ (рис. 2).

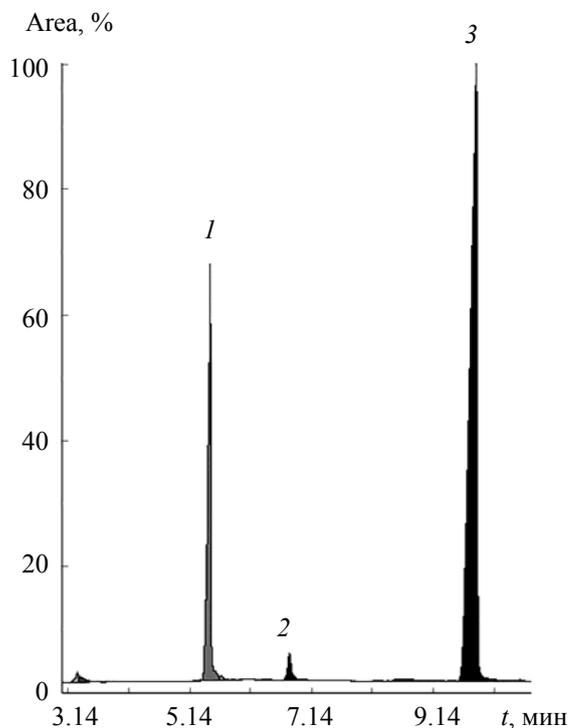
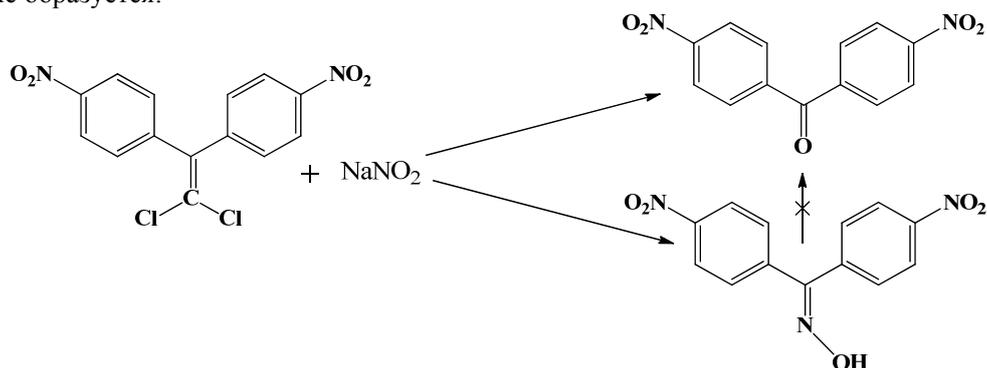


Рис. 3. ГЖХ-масс-хроматограмма продуктов реакции 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена с нитритом натрия в ДМФА: 1 — 4,4'-динитробензофенона ( $t = 5.48$  мин); 2 — оксима 4,4'-динитробензофенона ( $t = 6.78$  мин); 3 — 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена ( $t = 9.85$  мин)

Согласно результатам балансовых опытов на образование оксима 4,4'-динитробензофенона расходуется в среднем 2.5—3.0 % 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена. Экспериментально подтверждено, что при взаимодействии оксима 4,4'-динитробензофенона с нитритом натрия 4,4'-динитробензофенон не образуется:



**Заключение.** В результате проведенного комплексного анализа продуктов реакций 2,2-ди(4-нитрофенил)-1,1-дихлорэтена и 2,2-ди(4-нитрофенил)-1-хлорэтена с нитритом натрия в ДМФА с использованием результатов ЯМР  $^1\text{H}$ - и ИК спектроскопии, хромато-масс-спектрометрии и высокоэффективной жидкостной хроматографии, данных балансовых опытов и встречного синтеза установлены структуры целевых и побочных продуктов и их соотношение, предложены схемы превращений исходных соединений. Полученные результаты являются необходимой информацией при изучении ки-

нетики рассматриваемых реакций, проведении квантово-химического моделирования для установления механизмов неизученных реакций.

- [1] **А. Л. Русанов, М. Л. Кештов, А. А. Кириллов, В. В. Киреев, С. В. Кештова, П. В. Петровский.** *Высокомолекулярное соединение*, **42**, № 11 (2000) 1947—1951
- [2] **М. Л. Кештов, А. Л. Русанов, В. В. Киреев, С. В. Кештова, П. В. Петровский, А. А. Кириллов.** *Высокомолекулярное соединение*, **43**, № 6 (2001) 963—969
- [3] **B. Batanero, M. Ramirez-Moreno, F. Barba.** *Tetrahedron Lett.*, **57**, N 21 (2016) 2290—2293; doi: 10.1016/j.tetlet.2016.04.046
- [4] **W. Qin, G. Fang, Y. Wang, T. Wu, C. Zhu.** *Chemosphere*, **148** (2016) 68—76; doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.01.020
- [5] **Neerja, J. Grewal, A. Bhattacharya, S. Kumar, D. K. Singh, S. K. Khare.** *J. Environ. Sci. Health.*, **51**, N 12 (2016) 809—816; doi: 10.1080/03601234.2016.1208455
- [6] **Z. Erdem, J. T. Cutright.** *Environ. Earth Sci.*, **75**, N 18 (2016) 1267—1276; doi: 10.1007/s12665-016-6057-8
- [7] **A. K. Hall, J. M. Harrowfield, R. J. Hart, P. G. McCormick.** *Environ. Sci. Technol.*, **30**, N 12 (1996) 3401—3407; doi: 10.1021/es950680j
- [8] **C. Liu, S. Li, R. Gao, J. Dang, W. Wang, Q. Zhang.** *J. Environ. Sci.*, **26** (2014) 601—607; doi: 10.1016/j.S1001-0742(13)60388-5
- [9] **C. M. McGuire, D. G. Peters.** *Electrochim. Acta*, **137** (2014) 423—430; doi: 10.1016/j.electacta.2014.05.127
- [10] **E. J. Bylaska, D. A. Dixon, A. R. Felmy, E. Aprà, T. L. Windus, C. Guo Zhan, P. G. Tratnyek.** *J. Phys. Chem. A*, **108**, N 27 (2004) 5883—5893; doi: 10.1021/jp0312316
- [11] **А. Л. Русанов, М. Л. Кештов, С. В. Кештова, П. В. Петровский, Ю. Ф. Кундина.** *Высокомолекулярное соединение*, **42**, № 11 (2000) 1931—1935
- [12] **В. Н. Казин, С. Г. Сибриков, В. В. Копейкин, Г. С. Миронов, А. Л. Русанов, Г. В. Казакова.** *Бюлл. изобр.* № 42, опубл. 15.11.90, а. с. 1606507 (1990)
- [13] **В. Н. Казин, С. Г. Сибриков, В. В. Копейкин, Г. С. Миронов.** *ЖОрХ*, **27**, № 2 (1991) 380—382
- [14] **С. Г. Сибриков, В. Н. Казин, В. В. Копейкин.** *ЖОрХ*, **30**, № 7 (1994) 1080—1082
- [15] **С. Г. Сибриков, В. Н. Казин, В. В. Копейкин, Т. Н. Орлова.** *Изв. вузов. Сер. хим. и хим. технол.*, **38**, № 6 (1995) 32—36
- [16] **С. Г. Сибриков, Н. Г. Сапожникова, Н. Г. Савинский, Г. С. Миронов, В. Н. Казин.** *Хим. технол.*, № 6 (2003) 13—15
- [17] **Н. Г. Савинский, Н. Г. Сапожникова, С. Г. Сибриков, В. Н. Казин.** *Изв. вузов. Сер. хим. и хим. технол.*, **46**, № 5 (2003) 26—30
- [18] **В. Н. Казин, Н. Г. Савинский, С. Г. Сибриков, Н. Г. Сапожникова, О. П. Яблонский.** *Изв. вузов. Сер. хим. и хим. технол.*, **47**, № 6 (2004) 28—33
- [19] **В. Н. Казин, С. Г. Сибриков, С. О. Подаруев, Н. Г. Сапожникова, В. В. Плахтинский.** *Изв. вузов. Сер. хим. и хим. технол.*, **52**, № 8 (2009) 16—19
- [20] **Е. А. Гузов, В. Н. Казин, А. А. Жукова.** *ЖОХ*, **88**, № 10 (2018) 1595—1601
- [21] *Препаративная органическая химия*, под ред. Н. С. Вульфсона, Москва, ГХИ (1959) 171
- [22] **M. G. O. Santana-Marques, A. J. V. Ferrer-Correia, M. L. Gross.** *Analyt. Chem.*, **61** N 13 (1989) 1442—1447; doi:10.1021/ac00188a028
- [23] Dupont Merck Pharmaceutical company US 5879657 (1999)