

ВЛИЯНИЕ РАСТВОРИТЕЛЕЙ НА РЕАКЦИИ АЛКИЛИРОВАНИЯ КАРБОКСИЛАТНЫХ ФОСФАБЕТАИНОВ ИОДИСТЫМИ АЛКИЛАМИ

© Ю. В. Бахтиярова, Р. Р. Миннуллин, Д. И. Бахтияров, М. В. Морозов,
К. А. Ившин, И. В. Галкина,[@] О. Н. Катаева, В. И. Галкин

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18; e-mail: vig54@mail.ru

Исследованы новые реакции алкилирования серии моно- и дикарбоксилатных фосфабетаинов иодистым метилом и этилом в различных растворителях. В результате проведенных реакций получены стабильные соединения – иодсодержащие соли фосфония различного строения.

Ключевые слова: иодсодержащие фосфониевые соли, дикарбоксилатный фосфабетаин, рентгеноструктурный анализ.

Ранее нами были изучены реакции по синтезу, строение и реакционная способность монокарбоксилатных фосфабетаинов и их производных [1–10]. В частности, показано, что фосфабетаины близкой структуры с различными заместителями у атома фосфора легко вступают в реакции алкилирования с галоидными алкилами. Состав и строение образующихся фосфониевых солей доказаны методами элементного анализа, ЯМР и ИК спектроскопии и данными рентгеноструктурного анализа [2–5, 7].

В настоящей работе проведено алкилирование фосфабетаина **1** [11] иодистым этилом. Реакция протекает с образованием соответствующей фосфониевой соли **2** (схема 1). Структура соли доказана комплексом спектральных методов, а также методом РСА. Также ранее нами был синтезирован ряд дикарбоксилатных фосфабетаинов **3–9** на основе 3-(дифенилфосфино)пропионовой и непредельных карбоновых кислот (схема 2), и изучены реакции алкилирования некоторых из них [12–15].

Схема 1

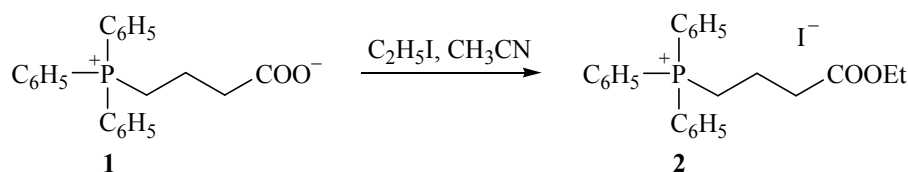
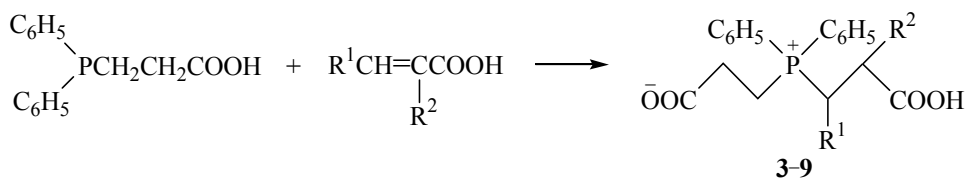
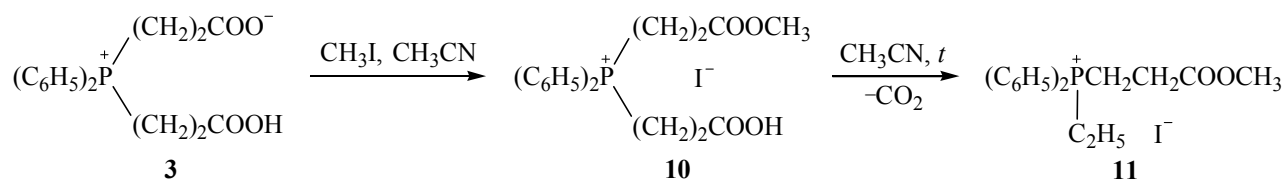


Схема 2



$\text{R}^1 = \text{R}^2 = \text{H}$ (**3**); $\text{R}^1 = \text{CH}_3$, $\text{R}^2 = \text{H}$ (**4**); $\text{R}^1 = \text{H}$, $\text{R}^2 = \text{CH}_3$ (**5**); $\text{R}^1 = \text{C}_6\text{H}_5$, $\text{R}^2 = \text{H}$ (**6**); $\text{R}^1 = 3\text{-ClC}_6\text{H}_4$, $\text{R}^2 = \text{H}$ (**7**); $\text{R}^1 = 2\text{-тиенил}$, $\text{R}^2 = \text{H}$ (**8**); $\text{R}^1 = 3,5\text{-}(t\text{-C}_4\text{H}_9)_2\text{-4-OH-C}_6\text{H}_4$, $\text{R}^2 = \text{H}$ (**9**).

Схема 3



Следует отметить, что условия протекания реакции алкилирования дикарбоксилатных фосфобетаинов несколько отличаются от таковых для монокарбоксилатных. Так, было показано [12], что при алкилировании дикарбоксилатного бетаина **3**, симметричного относительно фосфониевого центра, иодистым метилом в среде ацетонитрила первоначально образуется фосфониевая соль **10** (схема 3). При этом в качестве растворителя использовали непосредственно сам иодистый метил, но дикарбоксилатный фосфобетаин в нем растворялся ограниченно. В случае дальнейшего нагревания реакционной смеси в ацетонитриле с целью повышения растворимости наблюдалось декарбоксилирование с образованием соединения **11** [12].

В настоящем исследовании проведены реакции алкилирования несимметричных относительно фосфониевого центра дикарбоксилатных фосфобетаинов, полученных на основе кротоновой (**4**), метакриловой (**5**) и коричной (**6**) кислот. При комнатной температуре взаимодействие практически не протекает. Стоит отметить, что фосфобетаин **6** нерастворим в органических растворителях и в воде. Однако при нагревании реакционных смесей в течении 5 ч при нагревании до 70°C, реакция алкилирования протекает с образованием продуктов моноалкилирования **12–14** и **12a–14a** (схема 4).

По данным спектроскопии ЯМР ^{31}P , в спектре реакционной смеси содержатся два сигнала ядра фосфора в близкой области, что позволяет предположить, что в результате взаимодействия дикарбоксилатного фосфобетаина и иодистого метила образуются изомеры. Причем по интегральной интенсивности соотношение изомеров близко к 1:1. В то

же время в спектрах ЯМР ^{13}C наблюдается удвоение всех полос, что также подтверждает образование изомеров.

Сам факт образования подобных изомеров в равных соотношениях говорит о том, что в исходных дикарбоксилатных бетаинах нет явно выраженных карбоксильных и карбоксилатных групп, а протон в равной мере принадлежит обеим из них [13]. Если бы он принадлежал только одной конкретной карбоксильной группе, то в реакции алкилирования наблюдалось бы образование только одного из изомеров.

Дальнейшее изучение реакций алкилирования дикарбоксилатных фосфобетаинов, синтезированных на основе 3-(дифенилфосфино)пропионовой кислоты, выявило существенное влияние растворителей на ход протекания подобных реакций.

Ограниченная растворимость фосфобетаина **3** в большинстве растворителей побудило нас при проведении реакции алкилирования добавить в реакционную смесь небольшое количества этанола, что привело к полному растворению фосфобетаина. При этом реакционная смесь приобретала ярко-красный цвет. В спектре ЯМР ^{31}P полученной соли фосфония **16** наблюдается сигнал четвертичного атома фосфора в области 28 м. д. Согласно данным ЯМР ^1H и ^{13}C , алкилирование протекает сразу по двум группам: по карбоксильной и карбоксилатной (схема 5). Кроме того, сложноэфирная группа включает в себя не метильный, а этильный заместитель.

Такая же фосфониевая соль **16** образуется и при алкилировании в присутствии этанола трикарбоксилатного фосфобетаина **15** [12], полученного на ос-

Схема 4

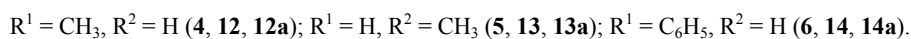
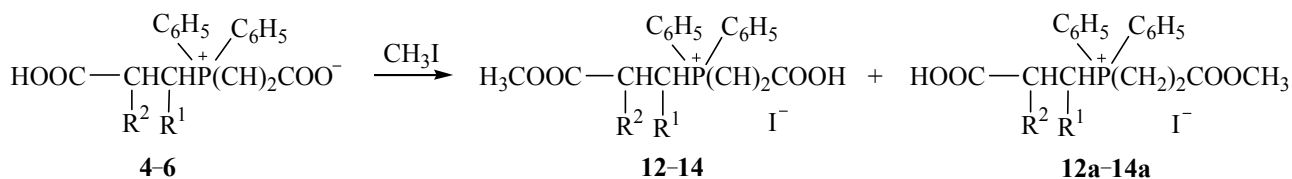


Схема 5

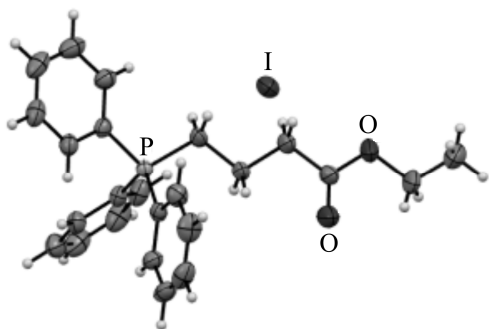
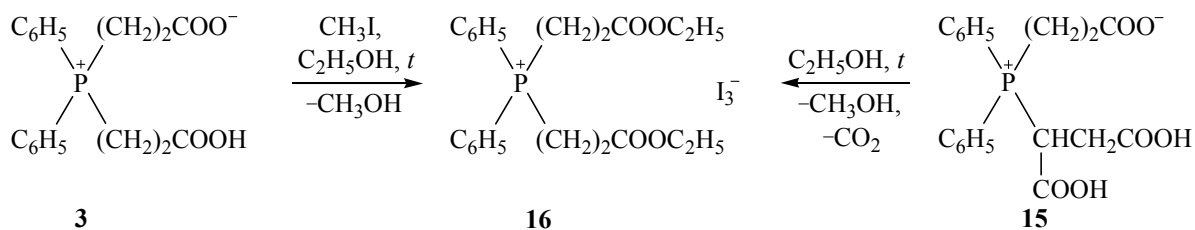


Рис. 1. Молекулярная структура (4-этокси-4-оксобутил)трифенилфосфония иодида **2**.

нове 3-(дифенилфосфино)пропионовой и малеиновой кислот. Реакция протекает при 40°C с декарбоксилированием. Фосфониевая соль **16** является кристаллическим веществом с т. пл. 139°C, строение которого подтверждено данными ИК, ЯМР ^1H , ^{13}C и ^{31}P спектроскопии, а также рентгеноструктурного анализа (рис. 1).

Для подтверждения общего характера протекания реакции алкилирования дикарбоксилатных фосфобетаинов мы провели данные реакции в присутствии разных спиртов (метанол, этанол, изопро-

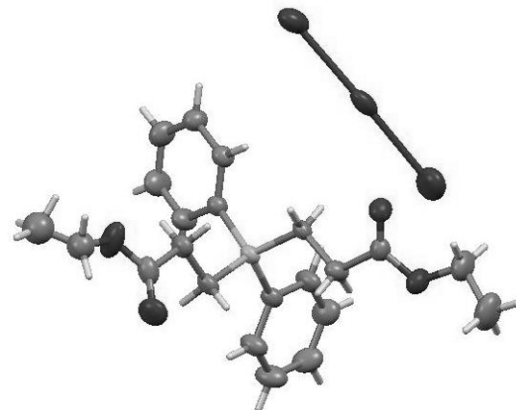
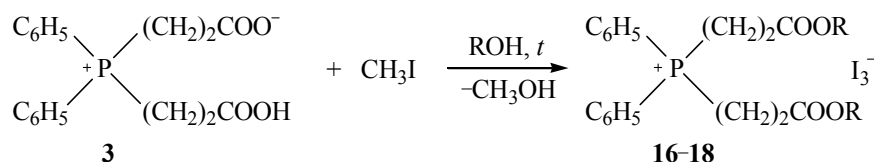


Рис. 2. Молекулярная структура бис(3-этокси-3-оксопропил)трифенилфосфония иодида **16**.

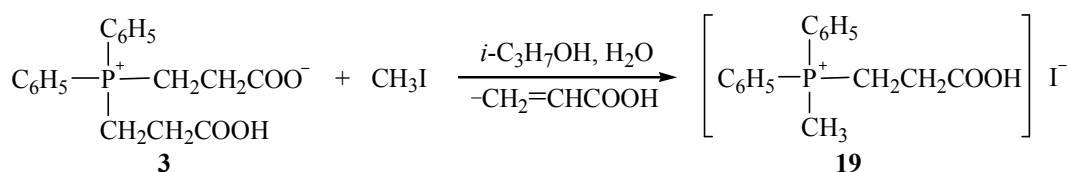
панол), т. е. в исходной реакционной смеси присутствовали дикарбоксилатный фосфобетаин **3**, иодистый метил (избыток) и одноатомный спирт. Во всех трех случаях в качестве продукта реакции выделяли соответствующие фосфониевые соли **16–18** (схема 6). В присутствии воды аналогичные реакции протекают иначе. В качестве примера приводим реакцию алкилирования бетаина **3** иодистым метилом в изопропиловом спирте (схема 7). Строение получен-

Схема 6



R = C₂H₅ (**16**), CH₃ (**17**), *i*-C₃H₇ (**18**).

Схема 7



ных соединений подтверждено данными ИК, ЯМР спектроскопии и рентгеноструктурного анализа (рис. 2).

Очевидно, в данном случае происходит отщепление от исходного дикарбоксилатного бетаина молекулы акриловой кислоты с последующим алкилированием иодистым метилом уже по трехвалентному атому фосфора.

Таким образом, ... **сделать краткий вывод по работе!**

Экспериментальная часть

Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C регистрировали на приборе Bruker Avance-400. Химические сдвиги определяли относительно внешних стандартов в D_2O . ИК спектры снимали на приборе IR Prestige-21 в диапазоне $400\text{--}3700\text{ см}^{-1}$ в вазелиновом масле и в жидкой пленке между пластинами KBr.

Рентгеноструктурное исследование проведено на дифрактометре Bruker AXS Карра APEX Duo с рентгеновским излучением MoK_α (λ 0.71073 Å) при 293(2) К с использованием программ APEX2 [15], SAINT [16], SADABS (учет поглощения) [17], SHELXS97 (расшифровка структуры) [18]. Структура уточнена методом наименьших квадратов по программе SHELXL-2014 [19].

Кристаллы соединения 2 ромбические, размер кристалла $0.096 \times 0.124 \times 0.549\text{ мм}^3$, M 504.32 г/моль, $\text{C}_{24}\text{H}_{26}\text{IO}_2\text{P}$, пространственная группа $P2_12_12_1$, Z 4, a 9.9307(3), b 12.9676(3), c 18.0285(5) Å, V 2321.79 (11) Å³, $d_{\text{выч}}$ 1.443 г/см³, μ 1.464 мм⁻¹, собрано отражений 38960 (± 13 , ± 17 , ± 24), в пределах θ от 1.93 до 28.72°, 6010 независимых (R_{int} 0.0223) и 5321 наблюдаемых отражений [$I \geq 2\sigma(I)$], 259 параметров уточнения, R_1 0.0268, wR_2 0.0656, максимальная остаточная электронная плотность 0.701 (-0.384) $e/\text{Å}^3$. Кристаллографические данные депонированы в Кембриджский банк рентгеноструктурных данных (CCDC 1556935).

Кристаллы соединения 16 триклинные, размер кристалла $0.098 \times 0.198 \times 0.402\text{ мм}^3$, M 768.11 г/моль, $\text{C}_{22}\text{H}_{28}\text{I}_3\text{O}_4\text{P}$, пространственная группа $P-1$, Z 2, a 10.7376(9), b 12.5268(10), c 12.6711(10) Å, α 116.086 (3), β 101.924(3), γ 104.760(3)°, V 1377.0(2) Å³, $d_{\text{выч}}$ 1.853 г/см³, μ 3.468 мм⁻¹, собрано отражений 79220 (± 14 , ± 16 , ± 17), в пределах θ от 1.91 до 28.66°, 7071 независимых (R_{int} 0.0337) и 5162 наблюдаемых отражений [$I \geq 2\sigma(I)$], 281 параметр уточнения, R_1 0.0392, wR_2 0.0850, максимальная остаточная электронная плотность 1.256 (-1.138) $e/\text{Å}^3$. Кристалло-

графические данные депонированы в Кембриджский банк рентгеноструктурных данных (CCDC 1556934).

(4-Этокси-4-оксобутил)трифенилфосфония иодид (2). К раствору 0.36 г (0.103 ммоль) 4-(трифенилфосфонио)бутаноата в 5 мл ацетонитрила при комнатной температуре и постоянном перемешивании прибавляли раствор 0.47 г (0.309 ммоль) иодистого этила в 5 мл того же растворителя. После завершения реакции бесцветные кристаллы многократно промывали абсолютным диэтиловым эфиром и сушили в вакууме, т. пл. 141°C. Выход: 0.656 г (79%), т. пл. 127°C. ИК спектр, ν , см^{-1} : 1720 (C=O). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3), δ , м. д.: 1.23 т (3H, OCH_2CH_3 , J 7.1 Гц), 1.73 м (2H, PCH_2CH_2 , J 7.1 Гц), 2.42 т (2H, CH_2COO , J 7.2 Гц), 2.79 т (2H, PCH_2 , J 7.2 Гц), 4.17 м (2H, OCH_2CH_3 , J 7.1 Гц), 7.41–7.67 м (15H, ArH). Спектр ЯМР ^{31}P : δ_{P} 23.27 м. д. Найдено, %: C 57.07; H 5.51. $\text{C}_{24}\text{H}_{26}\text{IO}_2\text{P}$. Вычислено, %: C 57.14; H 5.16.

Бис(3-этоксипропил)дифенилфосфония иодид (16). К раствору 0.24 г (0.73 ммоль) 3-[(2-карбоксиэтил)дифенилфосфино]пропаноата в 10 мл абс. этилового спирта прибавляли 2 г (14.1 ммоль) иодистого метила в 15 мл того же растворителя. Реакционную смесь нагревали на водяной бане в течение 20 ч. Игольчатые кристаллы красного цвета отфильтровывали, многократно промывали диэтиловым эфиром на воронке Шотта и сушили в вакууме. Выход 0.29 г (63%), т. пл. 139°C. ИК спектр, ν , см^{-1} : 1725 (C=O). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3), δ , м. д.: 1.21 т (6H, OCH_2CH_3 , J 7.1 Гц), 2.72 т (4H, CH_2COO , J 7.2 Гц), 3.39 т (4H, PCH_2 , J 7.2 Гц), 4.06 к (4H, OCH_2CH_3 , J 7.1 Гц), 7.91–7.75 м (10H, ArH). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3), δ_{C} , м. д.: 14.14 (OCH_2CH_3), 18.41 д (PCH_2 , J 53.5 Гц), 27.31 д (CH_2COO , J 2.8 Гц), 62.13 (OCH_2CH_3), 116.23 д (C^{unco} , J 84.2 Гц), 130.94 д (C^{o} , J 12.4 Гц), 133.26 д (C^{v} , J 9.6 Гц), 135.65 д (C^{n} , J 2.7 Гц), 170.42 д (COOEt , J 11.3 Гц). Спектр ЯМР ^{31}P : δ_{P} 28.75 м. д. Найдено, %: C 34.33; H 3.48; P 4.01. $\text{C}_{22}\text{H}_{28}\text{I}_3\text{O}_4\text{P}$. Вычислено, %: C 34.39; H 3.65; P 4.04.

Бис(3-метокси-3-оксобутил)дифенилфосфония иодид (17). К раствору 0.24 г (0.73 ммоль) 3-[(2-карбоксиэтил)дифенилфосфино]пропаноата в 10 мл абс. метилового спирта прибавляли 2 г (14.1 ммоль) иодистого метила в 10 мл того же растворителя. Реакционную смесь нагревали на водяной бане в течение 20 ч. По окончании реакции избыток иодметана и метанола удаляли на роторном испарителе. Образовавшийся оранжевый маслянистый продукт многократно промывали метанолом и сушили в вакууме. Выход 0.26 г (57%). ИК спектр,

ν , cm^{-1} : 1729 с ($\text{C}=\text{O}$). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3), δ , м. д.: 2.75 т (4H, CH_2COO , J 6.9 Гц), 3.55 с (3H, OCH_3), 3.65 т (4H, PCH_2 , J 6.9 Гц), 7.68–7.97 м (10H, ArH). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3), $\delta_{\text{с}}$, м. д.: 18.04 д (PCH_2 , J 53.0 Гц), 26.92 д (CH_2COO , J 2.4 Гц), 52.59 (OCH_3), 116.45 д (C^{unco} , J 83.9 Гц), 130.55 д (C° , J 12.3 Гц), 133.38 д (C^{m} , J 9.7 Гц), 135.31 д (C^{n} , J 2.4 Гц), 170.93 д (COOCH_3 , J 11.6 Гц). Спектр ЯМР ^{31}P : $\delta_{\text{р}}$ 29.24 м. д. Найдено, %: С 32.19; Н 3.14; Р 4.15. $\text{C}_{20}\text{H}_{24}\text{I}_3\text{O}_4\text{P}$. Вычислено, %: С 32.45; Н 3.24; Р 4.19.

Бис(3-изопропокси-3-оксипропил)дифенилфосфоний иодид (18). К раствору 0.24 г (0.73 ммоль) 3-[(2-карбоксиил)дифенилфосфино]пропаноата в 10 мл абс. изопропилового спирта при перемешивании прибавляли 2 г (14.1 ммоль) иодистого метила в 10 мл того же растворителя. Реакционную смесь нагревали на водяной бане в течение 20 ч. Игольчатые кристаллы многократно промывали абс. диэтиловым эфиром и сушили в вакууме, т. пл. 135°C . Выход 0.31 г (67.4%). ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1720 ($\text{C}=\text{O}$). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3), δ , м. д.: 1.18 д [12H, $\text{OCH}(\text{CH}_3)_2$, J 6.2 Гц], 2.68 т (2H, CH_2COO , J 7.1 Гц), 3.37 т (2H, PCH_2 , J 7.1 Гц), 4.89 м (1H, OCH), 7.82 м (10H, ArH). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3), $\delta_{\text{с}}$, м. д.: 18.39 д (PCH_2 , J 53.5 Гц), 21.77 [$\text{OCH}(\text{CH}_3)_2$], 27.55 д (CH_2COO , J 2.8 Гц), 69.99 [$\text{OCH}(\text{CH}_3)_2$], 116.35 д (C^{unco} , J 84.3 Гц), 130.92 д (C° , J 12.4 Гц), 133.26 д (C^{m} , J 9.6 Гц), 135.59 д (C^{n} , J 2.8 Гц), 169.94 д (COO , J 11.0 Гц). Спектр ЯМР ^{31}P (CDCl_3): $\delta_{\text{р}}$ 28.86 м. д. Найдено, %: С 35.94; Н 3.95; Р 3.55. $\text{C}_{24}\text{H}_{32}\text{I}_3\text{O}_4\text{P}$. Вычислено, %: С 36.18; Н 4.02; Р 3.89.

(2-Карбоксиил)(метил)дифенилфосфония иодид (19). К раствору 0.24 г (0.73 ммоль) 3-[(2-карбоксиил)дифенилфосфино]пропаноата в 10 мл абс. изопропилового спирта прибавляли 2 г (14.1 ммоль) иодметана в 10 мл. того же растворителя и несколько капель H_2O . Реакционную смесь нагревали на водяной бане в течение 20 ч. По окончании реакции отгоняли избыток иодметана, изопропанола и воды на роторном испарителе. Полученный продукт многократно промывали диэтиловым эфиром на воронке Шотта и сушили в вакууме. Выход 0.22 г (77%), т. пл. 210°C . ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1715 ($\text{C}=\text{O}$). Спектр ЯМР ^1H (D_2O), δ , м. д.: 2.31 т (2H, CH_2COO , J 7.6 Гц), 2.38 с (3H, PCH_3), 2.98 т (2H, PCH_2 , J 7.6 Гц), 7.71–7.49 м (10H, ArH). Спектр ЯМР ^{13}C (D_2O), $\delta_{\text{с}}$, м. д.: 6.03 д (PCH_3 , J 56.3 Гц), 19.26 д (PCH_2 , J 53.5 Гц), 28.87 д (CH_2COO , J 3.1 Гц), 118.98 д (C^{unco} , J 86.3 Гц), 129.95 д (C° , J 12.5 Гц), 132.05 д (C^{m} , J 10.1 Гц), 134.70 д (C^{n} , J 2.6 Гц), 177.82 д (COOH , J 13.7 Гц). Спектр ЯМР ^{31}P (D_2O): $\delta_{\text{р}}$ 23.29 м. д. Найдено, %: С 47.71; Н 4.32; Р 7.68. $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{I}_2\text{O}_2\text{P}$.

Вычислено, %: С 48.00; Н 4.50; Р 7.75.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (№ 4.5888.2017/8.9).

Список литературы

1. Галкин В.И., Бахтиярова Ю.В., Полежаева Н.А., Шайхутдинов Р.А., Клочков В.В., Черкасов Р.А. // ЖОХ. 1998. Т. 68. Вып. 7. С. 1104.
2. Galkin V.I., Bakhtiyarova Yu.V., Polezhaeva N.A., Cherkasov R.A., Krivolapov D.B., Gubaidullin A.T., Litvinov I.A. // Phosphorus, Sulfur, Silicon, Relat Elem. 1999. Vol. 147. P. 91. doi 10.1080/10426509908053526.
3. Галкин В.И., Бахтиярова Ю.В., Полежаева Н.А., Галкина И.В., Черкасов Р.А., Криволапов Д.Б., Губайдуллин А.Т., Литвинов И.А. // ЖОХ. 2002. Т. 72. Вып. 3. С. 404; Galkin V.I., Bakhtiyarova Yu.V., Polezhaeva N.A., Galkina I.V., Cherkasov R.A., Krivolapov D.B., Gubaidullin A.T., Litvinov I.A. // Russ. J. Gen. Chem. 2002. Vol. 72. N 3. P. 376. doi 10.1080/10426509908053526.
4. Галкин В.И., Бахтиярова Ю.В., Полежаева Н.А., Галкина И.В., Черкасов Р.А., Криволапов Д.Б., Губайдуллин А.Т., Литвинов И.А. // ЖОХ. 2002. Т. 72. Вып. 3. С. 412; Galkin V.I., Bakhtiyarova Yu.V., Polezhaeva N.A., Galkina I.V., Cherkasov R.A., Krivolapov D.B., Gubaidullin A.T., Litvinov I.A. // Russ. J. Gen. Chem. 2002. Vol. 72. N 3. P. 384. doi 10.1023/A:1015487416152.
5. Галкин В.И., Бахтиярова Ю.В., Сагдиева Р.И., Галкина И.В., Черкасов Р.А., Криволапов Д.Б., Губайдуллин А.Т., Литвинов И.А. // ЖОХ. 2006. Т. 76. Вып. 3. С. 452; Galkin V.I., Bakhtiyarova Yu.V., Sagdieva R.I., Galkina I.V., Cherkasov R.A., Krivolapov D.B., Gubaidullin A.T., Litvinov I.A. // Russ. J. Gen. Chem. 2006. Vol. 76. N 3. P. 430. doi 10.1134/S1070363206030133.
6. Galkin V.I., Bakhtiyarova Yu.V., Sagdieva R.I., Galkina I.V., Cherkasov R.A. // Heteroatom Chem. 2006. Vol. 17. N 6. P. 557. doi 10.1002/hc.20276.
7. Бахтиярова Ю.В., Сагдиева Р.И., Галкина И.В., Галкин В.И., Черкасов Р.А., Криволапов Д.Б., Губайдуллин А.Т., Литвинов И.А. // ЖОХ. 2007. Т. 43. Вып. 2. С. 215; Bakhtiyarova Yu.V., Sagdieva R.I., Galkina I.V., Galkin V.I., Cherkasov R.A., Krivolapov D.B., Gubaidullin A.T., Litvinov I.A. // Russ. J. Org. Chem. 2007. Vol. 43. N 2. P. 207. doi 10.1134/S1070428007020091.
8. Галкин В.И., Салин А.В., Бахтиярова Ю.В., Собанов А.А. // ЖОХ. 2009. Т. 79. Вып. 5. С. 747; Galkin V.I., Salin A.V., Bakhtiyarova Yu.V., Sobanov A.A. // Russ. J. Gen. Chem. 2009. Vol. 79. N 5. P. 919. doi 10.1134/S1070363209050090.
9. Romanov S.R., Aksunova A.F., Islamov D.R., Dobrynin A.B., Krivolapov D.B., Kataeva O.N., Bakhtiyarova Yu.V., Gnezdi-

- lov O.I., Galkina I.V., Galkin V.I.* // Phosphorus, Sulfur, Silicon, Relat. Elem. 2016. Vol. 191. N 11–12. P. 1637. doi 10.1080/10426507.2016.1223661.
10. *Бахтиярова Ю.В., Миннуллин Р.Р., Галкина И.В., Черкасов Р.А., Галкин В.И.* // ЖОХ. 2015. Т. 85. Вып. 9. С. 1453; *Bakhtiyarova Yu.V., Minnullin R.R., Galkina I.V., Cherkasov R.A., Galkin V.I.* // Russ. J. Gen. Chem. 2015. Vol. 85 N 9. P. 2037. doi 10.1134/S1070363215090042.
11. *Бахтиярова Ю.В., Аксунова А.Ф., Миннуллин Р.Р., Галкина И.В., Галкин В.И.* // Изв. АН. Сер. хим. 2016. № 5. С. 1308; *Bakhtiyarova Yu.V., Aksunova A.F., Minnullin R.R., Galkina I.V., Galkin V.I.* // Russ. Chem. Bull. 2016. Vol. 65. N 5. P. 1308. doi 10.1007/s11172-016-1453-5.
12. *Бакхтиярова Ю.В., Миннуллин Р.Р., Морозов М.В., Бакхтияров Д.И., Исламов Д.Р., Добрынин А.Б., Катаева О.Н., Черкасов Р.А., Галкин В.И., Галкина И.В.* // Phosphorus, Sulfur, Silicon, Relat. Elem. 2016. Vol. 191. N 11–12. P 1633. doi 10.1080/10426507.2016.1223660.
13. Bruker. APEX2 Software Suite for Crystallographic Programs, Bruker AXS, Inc., Madison, WI, USA, 2009.
14. Bruker. Area detector control and integration software. Version 5.x. SMART and SAINT. Madison, Wisconsin (USA), Bruker Analytical X-ray Instruments Inc., 1996.
15. *Sheldrick G.M.* SADABS. Program for absorption corrections University of Goettingen, Germany. 1996.
16. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. (A). 2008. Vol. 64. P. 112. doi 10.1107/S0108767307043930.
17. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. (C). 2015. Vol. 71. P. 3. doi 10.1107/S2053229614024218.
-