

ХЛОРИД И АРЕНСУЛЬФОНАТЫ ТЕТРАОРГАНИЛФОСФОНИЯ

В.В. Шарутин[✉], О.К. Шарутина, Е.С. Механошина

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

[✉] sharutin50@mail.ru

Аннотация. Взаимодействием эквимольных количеств дихлорида трифенилфосфора с пентафенилфосфором в бензоле синтезирован хлорид тетрафенилфосфония (1), который реагирует с аренсульфоновыми кислотами с образованием аренсульфонатов тетрафенилфосфония $[\text{Ph}_4\text{P}][\text{OSO}_2\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH}-4)(\text{COOH}-3)\cdot\text{H}_2\text{O}]$ (2), $[\text{Ph}_4\text{P}][\text{OSO}_2\text{C}_{10}\text{H}_5(\text{OH}-1)(\text{NO}_2)_2-2,4]$ (3) с выходом до 93 %. Подобная реакция хлорида циклогексилтрифенилфосфония с 2-сульфобензойной кислотой сопровождалась синтезом 2-карбоксибензолсульфоната циклогексилтрифенилфосфония (4) с выходом 92 %. Особенности строения комплексов 2–4 установлены методом РСА. Показано, что в катионах 2–4 атомы фосфора имеют искаженную тетраэдрическую координацию, а для аренсульфонатных анионов наблюдается обычная геометрия с тетраэдрическим атомом серы.

Ключевые слова: синтез, хлорид тетрафенилфосфония, аренсульфонат органилтрифенилфосфония, синтез, рентгеноструктурные исследования

Для цитирования: Шарутин В.В., Шарутина О.К., Механошина Е.С. Хлорид и аренсульфонаты тетраорганилфосфония // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 2. С. 108–114. DOI: 10.14529/chem240212

Original article
DOI: 10.14529/chem240212

TETRAORGANYLPHOSPHONIUM CHLORIDE AND ARENESULFONATES

V.V. Sharutin[✉], O.K. Sharutina, E.S. Mekhanoshina

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉] sharutin50@mail.ru

Abstract. The interaction of equimolar amounts of triphenylphosphorus dichloride with pentaphenylphosphorus in benzene have synthesized tetraphenylphosphonium chloride (1), which reacts with arenesulfonic acids to form tetraphenylphosphonium arenesulfonates $[\text{Ph}_4\text{P}][\text{OSO}_2\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH}-4)(\text{COOH}-3)\cdot\text{H}_2\text{O}]$ (2), $[\text{Ph}_4\text{P}][\text{OSO}_2\text{C}_{10}\text{H}_5(\text{OH}-1)(\text{NO}_2)_2-2,4]$ (3), yielding up to 82%. A similar reaction of cyclohexyltriphenylphosphonium chloride with 2-sulfobenzoic acid is accompanied by the synthesis of cyclohexyltriphenylphosphonium 2-carboxybenzenesulfonate $[\text{Ph}_3\text{P}(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{-cyclo})][\text{OSO}_2\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH}-2)]$ (4), yielding 80%. Structural features of complexes 2–4 have been established by X-ray diffraction. It has been shown that in cations 2–4 the phosphorus atoms have a distorted tetrahedral coordination, and for arenesulfonate anions the usual geometry with a tetrahedral sulfur atom is observed.

Keywords: synthesis, tetraphenylphosphonium chloride, organyltriphenylphosphonium arenesulfonate, synthesis, X-ray diffraction studies

For citation: Sharutin V.V., Sharutina O.K., Mekhanoshina E.S. Tetraorganylposphonium chloride and arenesulfonates. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2024;16(2):108–114. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem240212

Введение

Вопросы получения солей тетраорганилфосфония активно исследуются прежде всего из-за широких возможностей их практического применения. Так, они используются в качестве пластификаторов, инсектицидов, фунгицидов, дефолиантов, гербицидов [1], важнейших промежуточных продуктов в синтетической химии [2], органокатализаторов в асимметрическом межфазном катализе [3], реагентов для *транс*-металлирования [4] и метатезиса σ -связей [5]. Следует отметить огромное значение солей тетраорганилфосфония в создании новых материалов, каталитических систем, ионных жидкостей, проявляющих уникальные свойства [6–8]. Наиболее распространенным способом синтеза фосфониевых солей является кватернизация соответствующего фосфина в результате реакции с электрофилом или кислотой Бренстеда [9–12]. В дальнейшем полученные галогениды тетраорганилфосфония могут служить источником катионов при синтезе различных соединений.

Экспериментальная часть

Элементный анализ на С, Н проведен на анализаторе Carlo-Erba 1106.

ИК-спектры соединений записывали на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu в таблетках KBr.

РСА проводили на автоматическом четырехкружном дифрактометре D8 QUEST фирмы Bruker (графитовый монохроматор) при 293 К. Сбор, редактирование данных, уточнение параметров элементарной ячейки, учет поглощения, определение и уточнение структур проведены по программам [13–15]. Структуры **2–4** определены прямым методом и уточнены методом наименьших квадратов в анизотропном приближении для неводородных атомов. Основные кристаллографические данные и результаты уточнения структур **2–4** приведены в таблице. Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов депонированы в Кембриджском банке структурных данных [CCDC 2179561 (**2**), 2168618 (**3**), 2171917 (**4**)].

Реакция сольвата пентафенилфосфора ($\text{Ph}_5\text{P} \cdot \frac{1}{2} \text{PhH}$) с дихлоридом трифенилфосфора. Смесь 456 мг (0,1 ммоль) сольвата пентафенилфосфора с бензолом [16] и 333 мг (0,1 ммоль) дихлорида трифенилфосфора [17] в 10 мл бензола перемешивали при 20 °С 1 ч, удаляли растворитель. Остаток перекристаллизовывали из воды. Получили 690 мг (92 %) бесцветных кристаллов хлорида тетрафенилфосфония с $t_{\text{пл}} = 273$ °С. Обработка водного раствора полученного хлорида тетрафенилфосфония насыщенным раствором иодида натрия приводила к образованию с количественным выходом светло-желтого осадка иодида тетрафенилфосфония, который после высушивания имел $t_{\text{пл}} = 333$ °С [333 °С [18]].

Реакция хлорида тетрафенилфосфония с сульфосалициловой кислотой. К раствору 254 мг (0,1 ммоль) дигидрата сульфосалициловой кислоты в 10 мл воды прибавляли водный раствор 374 мг (0,1 ммоль) хлорида тетрафенилфосфония и перемешивали при 20 °С 1 ч. Остаток перекристаллизовывали из воды. Получили 523 мг (91 %) бесцветных кристаллов гидрата сульфосалицилата тетрафенилфосфония $\text{Ph}_4\text{P}(\text{OSO}_2\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH}-4)(\text{COOH}-3) \cdot \text{H}_2\text{O}$ (**2**) с $t_{\text{пл}} = 221$ °С. ИК-спектр (ν , см^{-1}): 3341 с, 3065 ср, 1995 с, 1663 оч.с., 1607 оч.с., 1587 оч.с, 1479 оч.с, 1441 оч.с, 1329 оч.с, 1287 с, 1248 с, 1223 оч.с, 1184 с, 1121 ср, 1107 с, 1076 с, 1030 оч.с, 997 с, 885 ср, 839 с, 804 с, 789 ср, 756 ср, 721 оч.с, 689 с, 665 с, 596 оч.с, 529 оч.с, 446 ср, 422 сл. Найдено, %: С 64,68; Н 7,34. $\text{C}_{31}\text{H}_{27}\text{O}_7\text{PS}$. Вычислено, %: С 64,75; Н 7,26.

Аналогично получали неизвестные ранее аренсульфонаты тетраорганилфосфония, которые перекристаллизовывали из воды.

(1-Окси)(2,4-динитро)нафталин-7-сульфонат тетрафенилфосфония (3**)** ($t_{\text{пл}} = 229$ °С, 93 %). ИК-спектр (ν , см^{-1}): 3063 сл, 1614 ср, 1580 оч.с, 1514 с, 1437 оч.с, 1398 с, 1373 сл, 1339 ср, 1308 с, 1250 с, 1161 ср, 1130 ср, 1105 с, 1082 ср, 1030 оч.с, 993 с, 945 ср, 910 сл, 843 с, 814 ср, 760 с, 721 оч.с, 691 с, 640 с, 615 ср, 586 ср, 561 ср, 525 оч.с, 494 ср, 455 сл, 436 сл. Найдено, %: С 62,43; Н 3,95. $\text{C}_{34}\text{H}_{25}\text{N}_2\text{O}_8\text{PS}$. Вычислено, %: С 62,52; Н 3,83.

2-Карбоксибензолсульфонат циклогексилтрифенилфосфония (4**)** ($t_{\text{пл}} = 192$ °С, 92 %). ИК-спектр, ν , см^{-1} : 3410 ср, 3057 сл, 2949 ср, 2893 ср, 1724 оч.с, 1589 ср, 1487 ср, 1439 оч.с, 1294 с, 1260 оч.с, 1175 оч.с, 1157 ср, 1138 ср, 1107 с, 924 сл, 883 ср, 854 ср, 822 сл, 800 ср, 768 с, 746 с, 721 оч.с, 692 оч.с, 644 сл, 619 оч.с, 570 с, 544 ср, 527 ср, 515 с, 494 сл, 470 сл, 419 ср. Найдено, %: С 68,22; Н 5,73. $\text{C}_{31}\text{H}_{31}\text{O}_5\text{PS}$. Вычислено, %: С 68,30; Н 5,67.

Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структур 2–4

Параметр	Значение		
	2	3	4
<i>M</i>	574,56	652,59	546,59
Сингония	Триклинная	Триклинная	Моноклинная
Пр. группа	<i>P</i> –1	<i>P</i> –1	<i>P</i> 2 ₁ / <i>n</i>
<i>a</i> , Å	10,840(6)	9,97(3)	12,321(10)
<i>b</i> , Å	11,006(7)	11,39(3)	15,444(11)
<i>c</i> , Å	13,659(10)	13,31(4)	14,829(11)
α, град	110,81(3)	82,34(17)	90,00
β, град	103,92(3)	78,99(13)	103,74(3)
γ, град	102,45(2)	80,50(8)	90,00
<i>V</i> , Å ³	1394,8(16)	1456(7)	2741(4)
<i>Z</i>	2	2	4
ρ _{выч} , г/см ³	1,368	1,489	1,325
μ, мм ^{–1}	0,221	0,226	0,216
<i>F</i> (000)	600,0	676,0	1152,0
Размер кристалла, мм	0,35 × 0,21 × 0,13	0,43 × 0,28 × 0,05	0,25 × 0,25 × 0,23
Область сбора данных по 2θ, град	5,96–64,74	5,94–57,2	6,28–56,78
Интервалы индексов отражений	–16 ≤ <i>h</i> ≤ 16, –16 ≤ <i>k</i> ≤ 16, –20 ≤ <i>l</i> ≤ 20	–13 ≤ <i>h</i> ≤ 13, –15 ≤ <i>k</i> ≤ 15, –17 ≤ <i>l</i> ≤ 17	–16 ≤ <i>h</i> ≤ 16, –20 ≤ <i>k</i> ≤ 20, –19 ≤ <i>l</i> ≤ 19
Измерено отражений	80925	37231	58239
Независимых отражений	9840 (<i>R</i> _{int} = 0,0672)	7347 (<i>R</i> _{int} = 0,1387)	6855 (<i>R</i> _{int} = 0,0626)
Переменных уточнения	368	416	344
<i>GOOF</i>	1,015	1,010	1,011
<i>R</i> -факторы по <i>F</i> ² > 2σ(<i>F</i> ²)	<i>R</i> ₁ = 0,0662, <i>wR</i> ₂ = 0,1490	<i>R</i> ₁ = 0,0760, <i>wR</i> ₂ = 0,1643	<i>R</i> ₁ = 0,0452, <i>wR</i> ₂ = 0,1016
<i>R</i> -факторы по всем отражениям	<i>R</i> ₁ = 0,1376, <i>wR</i> ₂ = 0,1792	<i>R</i> ₁ = 0,1700, <i>wR</i> ₂ = 0,2033	<i>R</i> ₁ = 0,0781, <i>wR</i> ₂ = 0,1169
Остаточная электронная плотность (max/min), е/Å ³	0,86/–0,52	0,74/–0,46	0,33/–0,53

Обсуждение результатов

Известно, что эффективным способом получения ониевых соединений сурьмы Ar₄SbX (X – электроотрицательный лиганд) является метод, основанный на реакции пентаарилсурьмы с производными сурьмы симметричного строения Ar₃SbX₂ [19–25], однако реакции подобного типа для производных фосфора почти не известны.

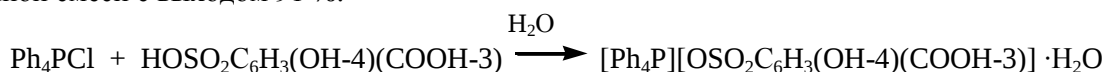
Мы предположили, что протекание подобных реакций перераспределения лигандов может наблюдаться и для пентафенилфосфора, который является аналогом пентафенилсурьмы. Действительно, мы показали, что реакция сольвата пентафенилфосфора (Ph₅P·½PhH [16]) с дихлоридом трифенилфосфора [17] в бензоле (24 °C, 1 ч) приводит к образованию хлорида тетрафенилфосфония (1) с выходом 92 %.



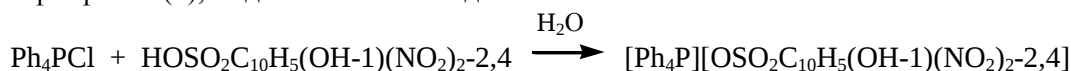
Отметим, что ранее был описан синтез ряда аренсульфонатов органилтрифенилфосфония из галогенидов органилтрифенилфосфония и аренсульфоновых кислот, содержащих различные функциональные группы в аренеовом кольце [26–30].

В продолжение работы в этом направлении нами показано, что полученный хлорид тетрафенилфосфония реагирует с сульфосалициловой кислотой в воде с образованием гидрата сульфоса-

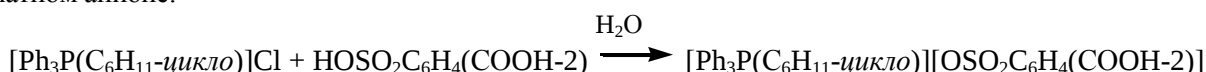
лицилата тетрафенилфосфония $[\text{Ph}_4\text{P}][\text{OSO}_2\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH}-4)(\text{COOH}-3)] \cdot \text{H}_2\text{O}$ (2), выделенного из реакционной смеси с выходом 91 %.



Мы нашли, что по аналогичной схеме реагирует хлорид тетрафенилфосфония с 1-окси-2,4-динитро-7-сульфонафталином с образованием (1-окси)(2,4-динитро)нафталин-7-сульфоната тетрафенилфосфония (3), выделенного с выходом 93 %.



В настоящей работе также сообщается о синтезе по аналогичной схеме 2-карбоксибензол-сульфоната циклогексилтрифенилфосфония (4), содержащего карбоксильную группу в аренсульфонатном анионе.



Достоинствами данного одностадийного способа являются мягкие условия проведения эксперимента и высокие выходы комплексов, которые представляют собой устойчивые на воздухе прозрачные кристаллы, хорошо растворимые в хлороформе, аренах, тетрагидрофуране, ацетонитриле, этаноле, четыреххлористом углероде и плохо – в воде при комнатной температуре.

В ИК-спектрах соединений 2–4 наблюдаются характерные полосы валентных колебаний углеродного скелета ароматических фрагментов в области 1607–1480 см^{-1} . Валентным колебаниям связей $\text{C}_{\text{Ar}}\text{--H}$ отвечают полосы поглощения средней интенсивности при 3082–3065 см^{-1} ; внеплоскостным деформационным колебаниям этих же связей – полосы при 865–800 см^{-1} , плоскостным деформационным колебаниям – полосы при 1138–1105 см^{-1} [31]. Также содержатся характерные полосы поглощения: 1260–1223 см^{-1} (полосы высокой интенсивности) и 1082–1043 см^{-1} (полосы средней интенсивности), которые относятся к асимметричным и симметричным валентным колебаниям сульфонатной группы SO_3 . Полосы поглощения, относящиеся к валентным колебаниям S--O , проявляются в области 692–689 см^{-1} . Интенсивные полосы поглощения в области 525–524 см^{-1} соответствуют валентным колебаниям связей $\text{C}_{\text{Ar}}\text{--S}$, полосы высокой интенсивности при ~721 см^{-1} отвечают валентным колебаниям связей $\text{C}_{\text{Ar}}\text{--P}$. В ИК-спектре 3 асимметричным колебаниям NO_2 -группы соответствуют интенсивные полосы поглощения при 1580, 1514 см^{-1} , симметричным колебаниям – 1339 и 1308 см^{-1} . Валентным колебаниям C=O в спектрах структур 2 и 4 отвечают полосы сильной интенсивности при 1663 и 1724 см^{-1} . Присутствие гидратной молекулы воды в комплексе 2 подтверждается наличием в его ИК-спектре широкой полосы при 3341 см^{-1} .

По данным РСА, кристаллы соединений 2–4 состоят из тетраэдрических катионов органилтрифенилфосфония и аренсульфонат-анионов с четырехкоординированными атомами серы (рис. 1–3). Комплекс 2 кристаллизуется в виде гидрата состава $[\text{Ph}_4\text{P}][\text{OSO}_2\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH}-4)(\text{COOH}-3)] \cdot \text{H}_2\text{O}$. Катионы органилтрифенилфосфония в структурах 2–4 имеют незначительно искаженную тетраэдрическую конфигурацию. Длины связей P--C изменяются в интервалах 1,780(5)–1,813(2) Å [1,794(2)–1,805(2) Å (2); 1,780(5)–1,799(5) Å (3); 1,791(2)–1,813(2) Å (4)], что меньше суммы ковалентных радиусов атомов-партнеров (1,83 Å) [32]. В 2, 3, 4 валентные углы CPC принимают значения 107,97(11)°–111,16(10)°; 107,4(3)°–114,4(2)°; 106,24(10)°–111,16(10)° соответственно.

В аренсульфонат-анионах соединений 2–4 связи S--O практически выровнены, что свидетельствует о равномерном распределении электронной плотности в SO_3^- группах. Расстояния S--O изменяются в интервалах 1,409(2)–1,4583(17) Å: 1,409(2)–1,433(3) Å (2), 1,422(4)–1,454(5) Å (3), 1,4331(19)–1,4583(17) Å (4). Расстояния S--C близки между собой и лежат в пределах 1,764(5)–1,781(2) Å. Валентные углы OSC в сульфонатных группах (103,51(10)°–107,68(10)°) меньше, чем углы OSO (109,6(2)°–114,8(3)°), что полностью согласуется с теорией отталкивания электронных пар валентных оболочек [33]. В аренсульфонатном анионе комплекса 3 плоскости *орто*- и *пара*-нитрогруппы не совпадают со средней плоскостью ароматического кольца (соответствующие двугранные углы равны 10,35° и 13,46°). В кристалле 2 гидратные молекулы воды связывают между собой аренсульфонатные анионы (рис. 4).

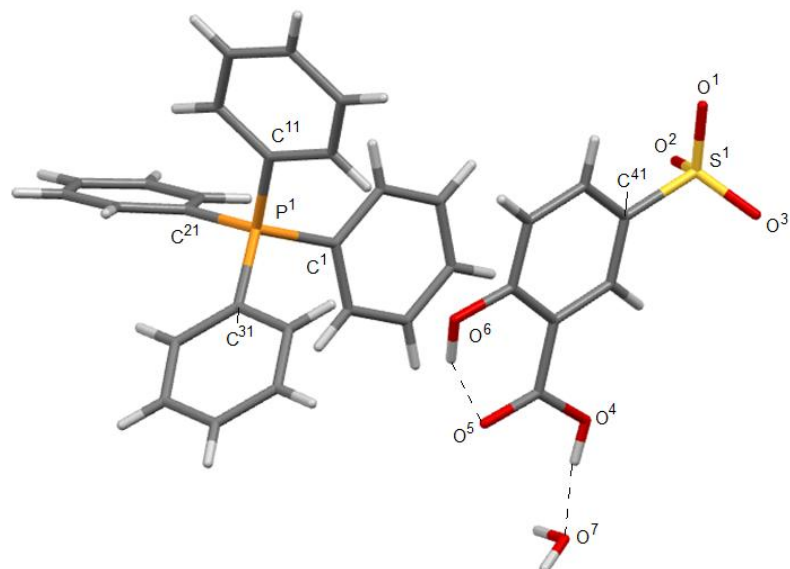


Рис. 1. Общий вид комплекса $[\text{Ph}_4\text{P}][\text{OSO}_2\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH}-4)(\text{COOH}-3)] \cdot \text{H}_2\text{O}$ (2)

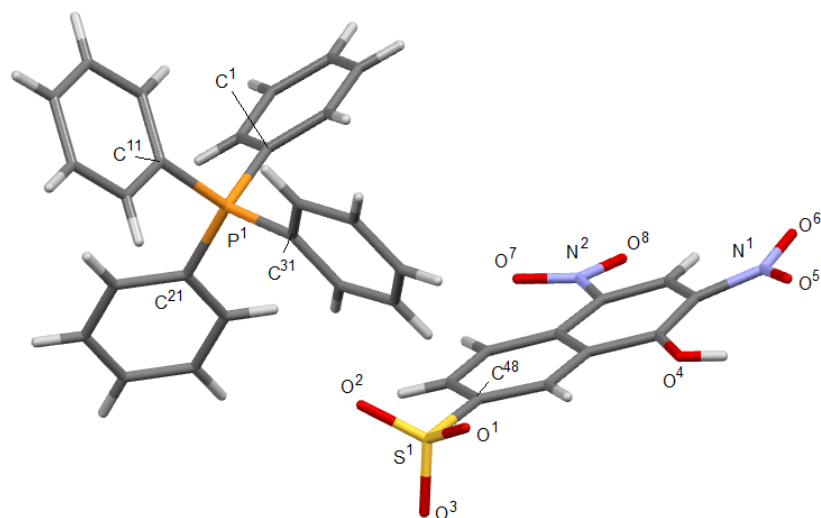


Рис. 2. Общий вид комплекса $[\text{Ph}_4\text{P}][\text{OSO}_2\text{C}_{10}\text{H}_5(\text{OH}-1)(\text{NO}_2)_{2-2,4}]$ (3)

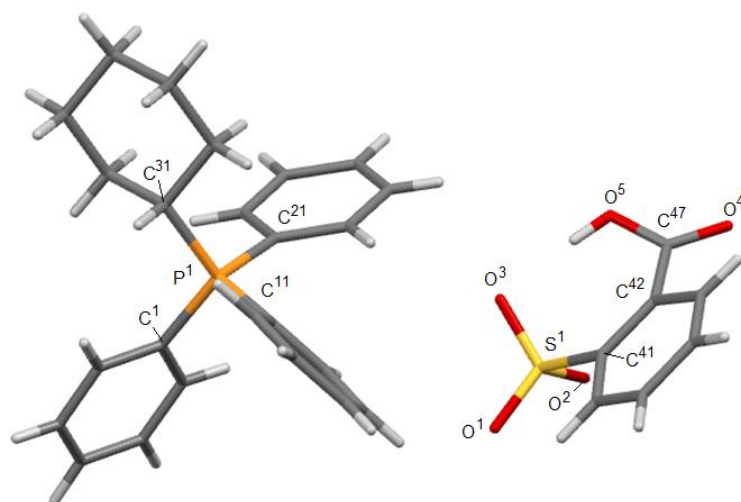


Рис. 3. Общий вид комплекса $[\text{Ph}_3\text{P}(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{-цикло})][\text{OSO}_2\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH}-2)]$ (4)

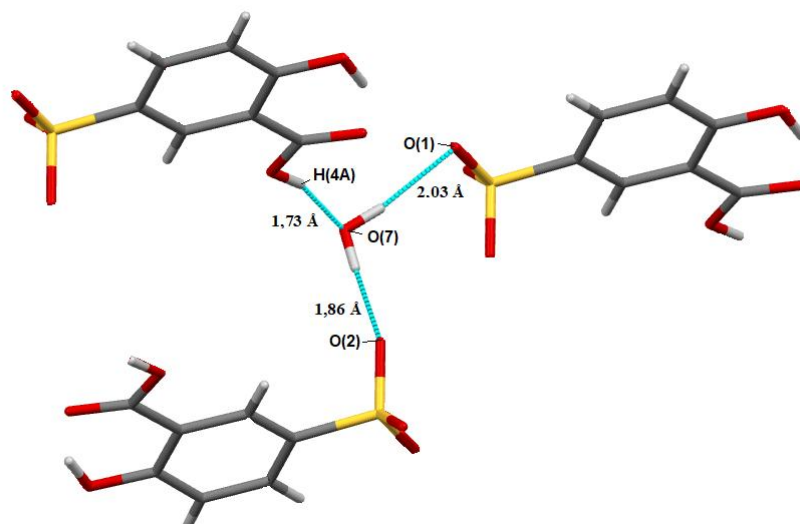


Рис. 4. Связывание аренсульфонатных анионов и молекулы воды в кристалле 2

Катионы и анионы в кристаллах 2–4 связаны слабыми водородными связями типа $S=O \cdots H(Ph)$ (2,03–2,69 Å).

Заключение

Таким образом, взаимодействие пентафенилфосфора с дихлоридом трифенилфосфора приводит к образованию с выходом 92 % хлорида тетрафенилфосфония, реакция которого с аренсульфоновой кислотой в воде сопровождается синтезом аренсульфонатов тетрафенилфосфония с выходом до 93 %. Продуктом аналогичной реакции хлорида циклогексилтрифенилфосфония с 2-сульфобензойной кислотой является 2-сульфобензоат циклогексилтрифенилфосфония. По данным РСА, полученные аренсульфонаты тетраорганилфосфония, представляющие собой бесцветные кристаллы, растворимые в большинстве органических растворителей и горячей воде, состоят из тетраэдрических катионов тетраорганилфосфония и аренсульфонатных анионов.

Список источников

1. Hartley F.R. The Chemistry of Organophosphorus Compounds. V. 3. Phosphonium Salts, Ylides and Phosphoranes / F.R. Hartley. John Wiley & Sons, Ltd., 1983. 458 p.
2. Moritz R., Wagner M., Schollmeyer D. et al. // Chem. Eur. J. 2015. V. 21. P. 9119. DOI: 10.1002/chem.201406370.
3. Werner T. // Adv. Synth. Catal. 2009. V. 351. P. 1469. DOI: 10.1002/adsc.200900211.
4. Cordovilla C., Bartolome C., Martinez-Ilarduya J.M. et al. // ACS Catal. 2015. V. 5. P. 3040. DOI: 10.1021/acscatal.5b00448.
5. Chong C.C., Hirao H., Kinjo R. // Angew. Chem. Int. Ed. 2015. V. 127. P. 192. DOI: 10.1002/ange.201408760.
6. Zhu Ch.-L., Zhang F.-G., Meng W. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2011. V. 50. P. 5869. DOI: 10.1002/anie.201100283.
7. Cassity C.G., Mirjafari A., Mobarrez N. et al. // Chem. Commun. 2013. V. 49, No. 69. P. 7590. DOI: 10.1039/c3cc44118k.
8. Canac Y., Duhayon C., Chauvin R. // Angew. Chem. Int. Ed. 2007. V. 46. P. 6313. DOI: 10.1002/anie.200701490.
9. Sodano F., Rolando B., Spyraakis F. et al. // ChemMedChem. 2018. V. 13. P. 1238. DOI: 10.1002/cmdc.201800088.
10. Mironov V.F., Nemtarev A.V., Tsepaeva O.V. et al. // Molecules. 2021. V. 26. P. 6350. DOI: 10.3390/molecules26216350.
11. Khasiyatullina N.R., Gubaidullin A.T., Shinkareva A.M. et al. // Russ. Chem. Bull., Int. Ed. 2020. V. 69. P. 2140. DOI: 10.1007/s11172-020-3012-3.

12. Romanov S., Aksunova A., Bakhtiyarova Y. et al. // J. Organomet. Chem. 2020. V. 910. P. 121130. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2020.121130.
13. SMART and SAINT-Plus. Version 5.0. Data Collection and Processing Software for the SMART System. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 1998.
14. SHELXTL/PC. Version 5.10. An Integrated System for Solving, Refining and Displaying Crystal Structures from Diffraction Data. Bruker AXS Inc., Madison: (WI, USA), 1998.
15. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J., Howard J.A.K., Puschmann H. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339. DOI: 10.1107/S0021889808042726.
16. Sharutin V.V., Senchurin V.S., Sharutina O.K., Boyarkina E.A. // Russ. J. Gen. Chem. 2009. V. 79, No. 1. P. 78. DOI: 10.1134/S1070363209010125.
17. Godfrey S.M., McAuliffe C.A., Pritchard R.G., Sheffield J.M. // Chem. Commun. 1998. P. 921. DOI: 10.1039/C4SC02357A
18. Пурдела Д., Вылчану Р. Химия органических соединений фосфора. М.: Химия, 1972. 276 с.
19. Шарутин В.В., Поддельский А.И., Шарутина О.К. // Коорд. химия. 2020. Т. 46, № 10. С. 579. DOI: 10.31857/S0132344X20100011.
20. Шарутин В.В., Сенчурин В.С., Шарутина О.К. и др. // Журн. общ. химии. 1996. Т. 66, № 10. С. 1755.
21. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Панова Л.П., Бельский В.К. // Коорд. химия. 1997. Т. 23, № 7. С. 513.
22. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Пакулина А.П., Бельский В.К. // Журн. общ. химии. 1997. Т. 67, № 9. С. 1536.
23. Шарутин В.В., Сенчурин В.С., Шарутина О.К. и др. // Журн. общ. химии. 2009. Т. 79, № 10. С. 1636.
24. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ефремов А.Н., Артемьева Е.В. // Журн. неорган. химии. 2020. Т. 65, № 4. С. 482. DOI: 10.31857/S0044457X20040170.
25. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Сенчурин В.С. // Журн. неорган. химии. 2013. Т. 58, № 11. С. 1454. DOI: 10.1134/S0036023613110181.
26. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Механошина Е.С. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 2. С. 41. DOI: 10.14529/chem220205.
27. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Механошина Е.С. // Журн. общей химии. 2022. Т. 92, № 6. С. 885. DOI: 10.31857/S0044460X22060087.
28. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Механошина Е.С. // Журн. структ. химии. 2022. Т. 63, № 10. С. 99532. DOI: 10.26902/JSC_id99532
29. Механошина Е.С. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2023. Т. 15, № 1. С. 31. DOI: 10.14529/chem230103.
30. Механошина Е.С. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2023. Т. 15, № 2. С. 55. DOI: 10.14529/chem230204.
31. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ, 2012. 54 с.
32. Cordero B., Gómez V., Platero-Prats A.E. et al. // Dalton Trans. 2008. V. 21. P. 2832. DOI: 10.1039/B801115J.
33. Гиллесту Р., Харгиттаи И. Модель отталкивания электронных пар валентной оболочки и строение молекул. М.: Мир, 1992. 75 с.

Шарутин Владимир Викторович – доктор химических наук, главный научный сотрудник управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: sharutin50@mail.ru

Шарутина Ольга Константиновна – доктор химических наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: sharutinaok@mail.ru

Механошина Евгения Сергеевна – магистрант кафедры теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: mexev@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 30 января 2024 г.
The article was submitted 30 January 2024.*