

ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-2-40-46

УДК 544.144.7+547.264

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОДГОТОВКИ ПРОБ ДЛЯ
ГАЗО-ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГИДРОПЕРОКСИДНЫХ
ПРОДУКТОВ ОКИСЛЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ СПИРТОВ****DEVELOPMENT OF SAMPLE PREPARATION METHOD FOR
GAS-CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS OF HYDROPEROXIDES
OXIDATION PRODUCTS OF SECONDARY ALCOHOLS****Пучков Сергей Вениаминович,**

кандидат хим. наук, доцент, psv.toos@kuzstu.ru

Sergey V. Puchkov, C. Sc. in Chemistry**Непомнящих Юлия Викторовна,**

кандидат хим. наук, доцент, nyuv.toos@kuzstu.ru

Yulia V. Nepomnyashchikh, C. Sc. in ChemistryКузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian
Federation**Аннотация:**

Трифенилфосфиноксид (ТФФО), образующийся при обработке проб, содержащих гид-ропероксидные продукты окисления 2-бутанола, трифенилфосфином, препятствует проведению анализа методом газо-жидкостной хроматографии (ГЖХ) на капиллярных колонках. Показано, что при удалении ТФФО обработкой проб хлоридом цинка определяемые соединения вступают в реакцию с $ZnCl_2$ с образованием комплексных соединений, а в испарителе хроматографа при проведении ГЖХ-анализа подвергаются превращениям катализируемым хлоридом цинка. Протекание этих реакций искажает результаты количественного определения анализируемых продуктов. Для устранения искажающего влияния реакций определяемых продуктов с хлоридом цинка во время обработки проб и при проведении ГЖХ анализа разработана методика подготовки проб, направленная на разрушение комплексных соединений определяемых продуктов с хлоридом цинка и удаление $ZnCl_2$ из проб. Предлагаемая методика пробоподготовки заключается в последовательной обработке проб твердым ТФФ в течение 20 мин в 10% мольном избытке к суммарному содержанию гидропероксидных продуктов с последующей обработкой хлоридом цинка, взятом в трехкратном мольном избытке к ТФФ, в течение 24 часов. После отделения образовавшегося осадка нерастворимого комплекса $ZnCl_2$ с ТФФО пробы последовательно барботировали сероводородом в присутствии уксусной кислоты и ацетата натрия. Образовавшийся осадок сульфида цинка удаляли, а пробу выдерживали над сульфидом калия в течение 24 часов для удаления следов цинка. Содержание ионов цинка контролировали методом комплексонометрического титрования. Пробы концентрировали под вакуумом и затем проводили ГЖХ-анализ.

Ключевые слова: трифенилфосфиноксид, хлорид цинка, сероводород, сульфид калия, пероксидные соединения, газо-жидкостная хроматография.

Abstract:

Triphenylphosphinoxide (TFFO) formed during the treatment of samples containing hydroperoxide oxidation products of 2-butanol with triphenylphosphine prevents the analysis by gas-liquid chromatography (HPLC) on capillary columns. It has been shown that when TFFO is removed by treating samples with zinc chloride, the determined compounds react with the $ZnCl_2$ to form complex compounds, and in the chromatograph evaporator during GLC analysis they undergo zinc chloride catalyzed transformations. These reactions distort the results of

quantification of the products to be analyzed. To eliminate the distorting effect of the reactions of the determined products with zinc chloride during sample processing and during GLC analysis, a sample preparation technique was developed aimed at destroying the complex compounds of the determined products with zinc chloride and removing ZnCl₂ from the samples. Proposed method of sample preparation consists in sequential treatment of samples with solid TFF for 20 min in 10% molar excess to total content of hydroperoxide products, followed by treatment with zinc chloride taken in three times molar excess to TFF for 24 hours. After separation of the resulting insoluble ZnCl₂ complex precipitate with TFFO, the samples were sequentially bubbled with hydrogen sulfide in the presence of acetic acid and sodium acetate. The resulting zinc sulfide precipitate was removed and the sample was held over potassium sulfide for 24 hours to remove traces of zinc. Zinc ion content was monitored by complexometric titration. The samples were concentrated in vacuo and then GLC analysis was performed.

Key words: triphenylphosphine oxide, zinc chloride, hydrogen sulfide, potassium sulfide, peroxide compounds, gas-liquid chromatography.

В работе [1] показано, что при предварительной обработке проб трифенилфосфином (ТФФ) при количественном анализе гидропероксидных продуктов окисления 2-бутанола методом газо-жидкостной хроматографии (ГЖХ) образующийся трифенилфосфиноксид (ТФФО), мешающий проведению анализа, хорошо удаляется обработкой пробы хлоридом цинка в мольном соотношении ZnCl₂:ТФФО = 3.0 в течение 18-24 часов. Вместе с тем можно ожидать, что гидроксил- и карбонилсодержащие продукты, образующиеся в результате взаимодействия гидропероксидных продуктов окисления 2-бутанола с ТФФ, при взаимодействии с ZnCl₂ могут связываться в комплексы [2-11], а при повышенных температурах в испарителе хроматографа при ГЖХ-анализе подвергаться превращениям, катализируемым хлоридом цинка [12]. Реакции превращения анализируемых соединений с участием хлорида цинка могут исказить результаты их количественного определения методом ГЖХ. Поэтому целью работы является разработка методики подготовки проб перед ГЖХ-анализом пероксидных продуктов окисления 2-бутанола при предварительной последовательной обработке проб ТФФ и хлоридом цинка с последующим удалением ZnCl₂.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ТФФ, квалификации ч., очищали трехкратной перекристаллизацией из 2-пропанола [13]. Полученный продукт имел т. пл. 81°C; известное значение т. пл. 80.5°C [14]. Содержание ТФФО в используемом препарате по данным ГЖХ не превышало 0.10±0.01%.

2-Бутанол квалификации ч. очищали по методике [15] последовательной обработкой спирта раствором бисульфита натрия, кипячением с 10%-ным раствором гидроксида натрия, промывкой водой и соляной кислотой. Промытый спирт сушили над известью, а затем кипятили 3 раза со свежими порциями извести, после чего подвергали фракционной перегонке. Т. кип. 98°C, литературные данные: Т. кип. 98.5°C [14]. Чистота использованного препарата составляла не менее 99.9 ± 0.1%, по данным газо-жидкостной хроматографии (ГЖХ) продукты окисления в очищенном 2-бутаноле отсутствовали.

Уксусную кислоту ледяную квалификации х.ч. использовали без дополнительной очистки.

Сульфид калия (K₂S·5H₂O) квалификации ч. использовали без дополнительной очистки.

Сероводород получали в аппарате Киппа, действием разбавленной соляной кислоты на сульфид железа (II). Сульфид железа (II) квалификации ч. использовали без дополнительной очистки. Соляную кислоту квалификации ч. использовали без дополнительной очистки.

1,2-Бутандиол синтезировали, барботируя 1-бутен через разбавленный раствор перманганата калия [16]. 1-Бутен получали парофазным пиролизом бутилацетата при 400-500°C [17].

1,3-, 2,3- и 1,4-Бутандиолы использовали без дополнительной очистки.

трет-Бутилгидропероксид (ТБГП) синтезировали и очищали согласно методике [18]. Полученный препарат по данным иодометрического определения содержал не менее 99.3 + 0.2% гидропероксида.

Хлорид цинка (ZnCl₂) квалификации ч.д.а. использовали после частичного обезвоживания нагреванием на песчаной бане [19].

Дибутилфталат квалификации ч. использовали без дополнительной очистки.

Определение методом ГЖХ проводили на хроматографе «Цвет-800» с плазменно-ионизационным детектором. Для определения бутанона, изомерных 1,2-, 1,3- и 2,3-бутандиолов использовали капиллярную колонку ZB-WAX длиной 30 м, внутренним диаметром 0.32 мм и толщиной фазы 0.5 мкм. Газ-носитель – аргон высокой чистоты. Ввод пробы осуществляли в режиме деления потока газа-носителя 1:20 [20]. В качестве внутренних стандартов использовали 1,4-бутандиол и дифенил. Определение проводили в режиме программирования температуры колонки 100-155°C, 25°C/мин, температура испарителя 275°C. Для определения ТФФ и ТФФО использовали насадочную колонку из нержавеющей стали размером 1000 × 3 мм с сорбентом 5% силикона OV-17 на хроматоне N-AW-супер, зернением 0.16-

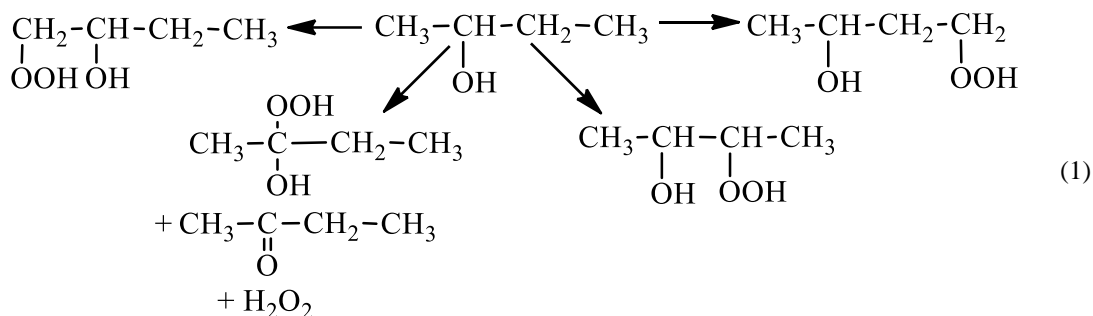
0.20 мм, газ-носитель – аргон высокой чистоты, расход 40 мл/мин; температура колонки 250°C, испарителя 300°C, внутренний стандарт дибутилфталат [1].

Суммарное содержание пероксидных соединений определяли колориметрическим методом, основанным на обработке пробы реагентом, содержащим ионы Fe^{2+} и *N,N*-диметил-*n*-фенилендиамин [21].

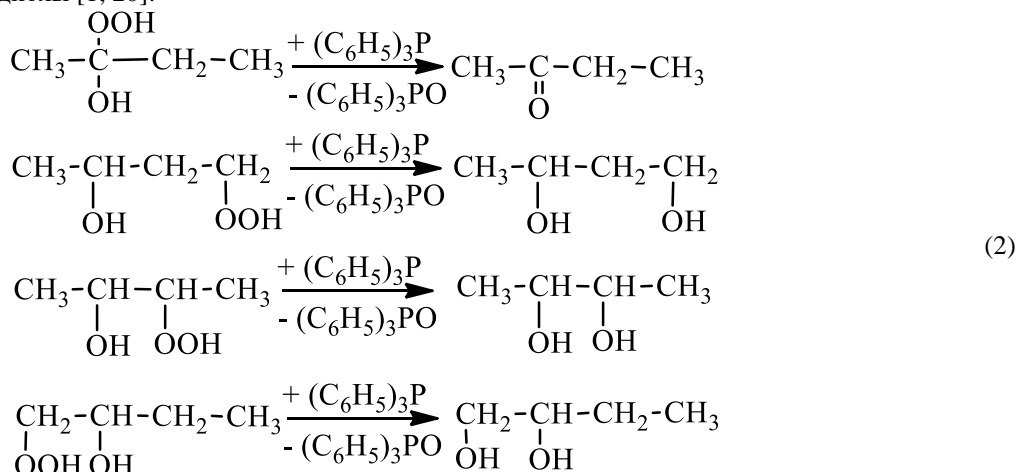
Определение содержания ионов цинка в пробах проводили методом комплексонометрического титрования, с индикатором ксиленоловым оранжевым [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе жидкофазного окисления 2-бутанола образуются изомерные гидроксигидропероксиды и бутанон [1, 20]:

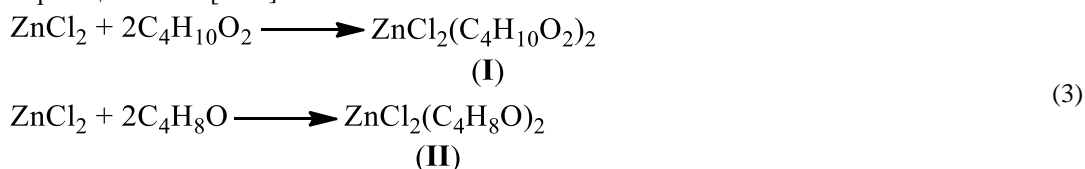


Гидроксигидропероксиды после обработки проб ТФФ превращаются в бутанон и изомерные бутандиолы [1, 20]:

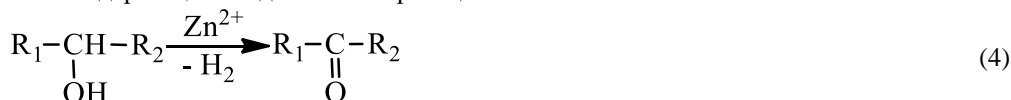


Известно, что соли цинка, в том числе и хлориды, способны образовывать комплексы с O-, N-, S-донорными лигандами [2-11], в том числе с одноатомными и двухатомными спиртами, кетонами [9-11].

Можно предположить, что в процессе обработки хлоридом цинка проб, содержащих бутанон и изомерные 1,2-, 1,3-, 1,4- и 2,3- и 2,3-(мезо форма)-бутандиолы, возможно их связывание в комплексы с ZnCl_2 по реакциям типа [9-11]:



Вместе с тем известно [12], что хлорид цинка, а также его комплексные соединения проявляют каталитическую активность в реакциях дегидрирования гидроксилсодержащих органических соединений до карбонилсодержащих соединений по реакции типа:



Вовлечение в такую реакцию гидроксилсодержащих продуктов в присутствии хлорида цинка в

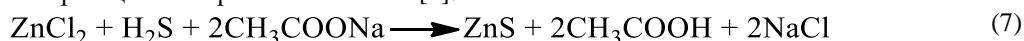
испарителе хроматографа при проведении ГЖХ-анализа вполне вероятно.

Таким образом, можно допустить, что как связывание определяемых карбонил- и гидроксилсодержащих соединений в комплексах по реакции типа (3), так и протекание реакции дегидрирования (4) может занижать результаты ГЖХ-определения бутанона и изомерных бутандиолов. Для проверки этого предположения было проведено ГЖХ-определение бутанона, 1,2-, 1,3-, 2,3- и 2,3-(мезо форма)-бутандиолов в модельных растворах в 2-бутаноле в присутствии внутренних стандартов 1,4-бутандиола и дифенила после их обработки хлоридом цинка в течение 24 часов. Анализ показал значительное увеличение содержания бутанона, который, вероятно, образуется по реакции дегидрирования 2-бутанола в испарителе хроматографа в присутствии соединений цинка по реакции типа (4), и практически полное исчезновение изомерных 1,2-, 1,3-, 1,4-, 2,3- и 2,3-(мезо форма)-бутандиолов, что может быть следствием как реакции комплексообразования, так и реакции дегидрирования.

Образование бутанона по реакции дегидрирования 2-бутанола в испарителе хроматографа в присутствии ионов цинка вовремя ГЖХ-анализа не позволяет сделать вывод о том, связывается бутанон, содержащийся в модельной смеси, в комплекс с $ZnCl_2$ или нет. Для уточнения образования комплекса бутанона с хлоридом цинка было проведено ГЖХ-определение бутанона в растворе хлорбензола до и после обработки $ZnCl_2$ в течение 24 часов. После обработки раствора бутанона в хлорбензоле хлоридом цинка наблюдалось снижение количества бутанона более чем на 80%, что, вероятно, свидетельствует об образовании комплекса бутанона с $ZnCl_2$.

Очевидно, что для получения корректных результатов определения перед ГЖХ-анализом необходимо провести удаление из проб хлорида цинка. Удаление иона цинка из пробы можно проводить с помощью ионообменных смол, но при этом возможно сорбирование комплексного иона Zn^{2+} вместе с лигандами [22-24]. Поэтому можно ожидать, что комплексы цинка и изомерных бутандиолов типа (I) и комплексы цинка и бутанона типа (II) будут сорбироваться на ионообменной смоле, что, вероятно, приведет к занижению результатов ГЖХ-определения бутанона и изомерных бутандиолов. Для уточнения возможности удаления ионов цинка с помощью ионного обмена пробы, содержащие бутанон, 1,2-, 1,3-, 1,4-, 2,3- и 2,3-(мезо форма)-бутандиолы, предварительно обработанные хлоридом цинка, обрабатывали катионитом КУ-2-8 в Н-форме. После обработки проб катионитом ионы цинка, определяемые методом комплексонометрического титрования, не были обнаружены. Вместе с тем наблюдалось снижение определяемых методом ГЖХ количеств бутанона и изомерных бутандиолов на 30-60%. Таким образом, можно заключить, что действительно происходит необратимое сорбирование комплексного иона вместе с лигандами на ионообменной смоле.

Известно, что для удаления ионов цинка из растворов применяют обработку проб сероводородом, при этом образуется нерастворимый сульфид цинка [2]. Обычно обработку проводят в среде уксусной кислоты, в присутствии ацетата натрия или аммония, необходимых для связывания выделяющейся в результате реакции минеральной кислоты [2]:



К пробам, содержащим хлорид цинка, добавляли равный объем ледяной уксусной кислоты и ацетат натрия в 10% мольном избытке над стехиометрическим количеством. Затем через пробу барботировали сероводород в течение 20 минут. Выделившийся при этом осадок сульфида цинка отделяли. Остаточное содержание цинка по результатам комплексонометрического титрования не превышало 0.01 М.

Известно, что ионы цинка, в том числе связанные в комплексы, можно удалять переводом в малорастворимое соединение путем обработки сульфидом щелочного металла [25].

Таблица 1. Результаты ГЖХ-определения бутанона и изомерных бутандиолов в модельной смеси: (2-бутанол, бутанон, 1,2-, 1,3-, 1,4-, 2,3- и 2,3(мезо форма)-бутандиолы, 0.5 М ТВГП) до и после обработки ($n = 5, P = 0.95$)

Table 1. Results of GLC determination of butanone and isomeric butanediols in a model mixture: (2-butanol, butanone, 1,2-, 1,3-, 1,4-, 2,3-, and 2,3 (meso form) -butanediols, 0.5 M TBHP) before and after treatment ($n = 5, P = 0.95$)

Определяемое соединение	Взято $m \cdot 10^2$, моль·л ⁻¹	Найдено $m \cdot 10^2$, моль·л ⁻¹	s_r
Бутанон	45.0	45.0 ± 0.3	0.01
1,2-Бутандиол	0.23	0.24 ± 0.01	0.07
1,3-Бутандиол	0.81	0.80 ± 0.02	0.05
1,4-Бутандиол	2.52	2.50 ± 0.03	0.02
2,3-Бутандиол	0.49	0.50 ± 0.02	0.05
2,3-Бутандиол (мезо)	0.30	0.29 ± 0.01	0.05

Поэтому для удаления остаточного цинка пробы выдерживали над твердым сульфидом калия ($K_2S \cdot 5H_2O$) в течение 24 часов, затем удаляли сульфид калия фильтрованием. После чего наблюдалось практически полное отсутствие цинка в пробах по результатам комплексонометрического титрования.

ГЖХ-определение бутанола в пробах проводили без их дополнительной обработки, а изомерные бутандиолы определяли после концентрирования проб под вакуумом. Результаты ГЖХ-определения бутанола, 1,2-, 1,3-, 1,4-, 2,3- и 2,3-(мезо форма)-бутандиолов в модельной смеси в среде 2-бутанола с содержанием 0.5 М ТБГП до и после обработки по разработанной методике приведены в табл. 1.

Выполнение определения: предварительно в исследуемом образце определяли суммарное содержание пероксидных соединений колориметрическим методом. В 5 мл пробы исследуемого образца вносили внутренние стандарты 1,4-бутандиол и дифенил, обрабатывали твердым ТФФ в течение 20 мин в 10% мольном избытке к суммарному содержанию гидропероксидных продуктов. Полноту восстановления контролировали, определяя содержание пероксидных соединений в пробе колориметрическим методом. Затем пробу обрабатывали хлоридом цинка, взятом в трехкратном мольном избытке к ТФФ, в течение 24 часов. После отделения образовавшегося осадка к пробе добавляли 5 мл ледяной уксусной кислоты и ацетат натрия в 10% мольном избытке над его стехиометрическим количеством необходимым для связывания HCl, выделяющейся при реакции хлорида цинка с сероводородом, и затем барботировали сероводородом в течение 20 минут. Образовавшийся осадок сульфида цинка удаляли, а пробу выдерживали над сульфидом калия в течение 24 часов для удаления следов цинка. Содержание ионов цинка контролировали методом комплексонометрического титрования. Пробы концентрировали под вакуумом и затем проводили ГЖХ-анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков, С.В. О взаимодействии трифенилфосфиноксида с хлоридом цинка в среде 2-бутанола / С.В. Пучков, Ю.В. Непомнящих // Вестник КузГТУ. 2020. – № 6. – С. 51-57.
2. Живописцев, В.П. Аналитическая химия цинка / В.П. Живописцев, Е.Л. Селезнева. – М.: Наука, 1975. – 200 с.
3. Investigation of the Zinc Chloride / Methyl(2-pyridyl)ketone Oxime Reaction System: A Mononuclear Complex and an Inverse 12-Metallacrown-4 Cluster / С. Papatrifiantafyllopoulou [et al.]. // Zeitschrift für Naturforschung B. – 2006. – V. 61. – № 1. – P. 37-46.
4. Vaca, S.G. Zinc(II) Complexes Based on ortho-Phthalic Acid and Ancillary N-Donor Ligands // IRJPAC. – 2011. – V. 2. – № 1. – P. 1-24.
5. Zinc complexes of the biomimetic N,N,O ligand family of substituted 3,3-bis(1-alkylimidazol-2-yl)propionates: the formation of oxalate from pyruvate JBIC / P.C.A. Bruijninx [et al.]. // J. Biol. Inorg. Chem. – 2007. – V. 12. – № 8. – P. 1181-1196.
6. Wang, X. Synthesis, Characterization of Zinc Complexes with Neutral α -Diimine Ligands and Application in Ring-opening Polymerization of ϵ -Caprolactone / X. Wang, X. Liu, J. Huang // CHIMIA. – 2017. – V. 71. – № 11. – P. 773-776.
7. Synthesis of Iron (III), Cobalt (II), Nickel (II), Copper (II) and Zinc (II) complexes with new quadridentate N,O⁻ donor ligands / S.J. Swamy [et al.]. // Orient. J. Chem. – 2008. – V. 24. – № 3. – P. 1103-1106.
8. Transition metal complexes with N, S donor ligands as synthetic antioxidants: Synthesis, characterization and antioxidant activity / A. Choudhary [et al.]. // J. Enzyme Inhib. Med. – 2010. – V. 26. – № 3. – P. 394-403.
9. Thermal stability and crystal structure of bis(1,2-ethanediol)zinc sulfate / Labadi I. [et al.]. // Journal of Crystallographic and Spectroscopic Research. – 1993. – V. 23. – № 4. – P. 333-338.
10. Müller, B. Zinc Complexes of Aldehydes and Ketones, 3 Aldehyde Complexes of Zinc Halides / B. Müller, H. Vahrenkamp // Eur. J. Inorg. Chem. – 1999. – № 1. – P. 129-135.
11. Sudbrake, C. Chelate-stabilized zinc complexes of alcohols and carbonyl compounds: pyridylphenylketone and pyridylphenylmethanol // C. Sudbrake, H. Vahrenkamp / Inorganica Chimica Acta. – 2001. – V. 318. – P. 23-30.
12. An Azoaromatic Ligand as Four Electron Four Proton Reservoir: Catalytic Dehydrogenation of Alcohols by Its Zinc(II) Complex / R. Pramanick [et al.]. // Inorg. Chem. – 2018. – V. 57. – № 12. – P. 6816-6824. (doi: 10.1021/acs.inorgchem.8b00034).
13. Перкель, А.Л. Применение трифенилфосфина для газохроматографического определения пероксидных соединений в продуктах окисления органических веществ / А.Л. Перкель, Л.В. Крутская, Б.Г. Фрейдин // Журн. аналит. химии. – 1994. – Т. 49. – № 7. – С. 768-772.
14. Свойства органических соединений: Справочник / под ред. А.А. Потехина. Л.: Химия, 1984. – 520 с.
15. Органические растворители. / А. Вайсберг, Э. Проскауэр, Дж. Риддик, Э. Тупс – М.: ИЛ, 1958. – 519 с.

16. Wiberg, K.V. The Mechanisms of Permanganate Oxidation. IV. Hydroxylation of Olefins and Related Reactions / K.V. Wiberg, K.A. Saegbarth // J. Am. Chem. Soc. – 1957. – V. 79. – № 11. – P. 2822-2824.
 17. Органикум I. Практикум по органической химии / под ред. Т.И. Почкаевой. М.: Мир, 1979. – 442 с.
 18. Карножицкий, В. Органические перекиси. – М: Изд-во иностр. лит., 1961. – 323 с.
 19. Клочников, Н.Г. Руководство по неорганическому анализу. – М.: Химия, 1953 – 333 с.
 20. Пучков, С.В. Реакционная способность СН-связей 2-бутанола в процессе жидкофазного окисления / С.В. Пучков, Ю.В. Непомнящих // Журн. физ. химии. – 2017. – Т. 91. – № 12. – С. 2050-2056.
 21. Перкель, А.Л. Микрометод определения индивидуальных пероксидных соединений / А.Л. Перкель, С.Г. Воронина, Р.Л. Перкель // Журн. аналит. химии. – 1991. – Т. 46. – № 11. – С. 2283-2286.
 22. Скороходов, В.И. Сорбция комплексных ионов цинка ионитами из хлоридных растворов / В.И. Скороходов, Б.К. Радионов, О.Ю. Горяева // Журн. прикл. химии. – 2004. – Т. 77. – № 9. – С. 1456-1461.
 23. Muslim, A. Adsorption of Copper Complexes on Anion Exchange Resin in Non-Ammoniacal and Ammoniacal Thiosulfate Leaching Systems // J. Chem. Eng. Process Technol. – 2012. – V. 3. – № 1
 24. Palladium(II) Chloride Complex Ion Recovery from Aqueous Solutions Using Adsorption on Activated Carbon / M. Wojnicki [et al.]. // J. Chem. Eng. Data. – 2018. – V. 63. – № 3. – P. 702-711.
- Практическое руководство по неорганическому анализу / В.Ф. Гиллебранд, Г.Э. Лендель, Г.А. Брайт, Д.И. Гофман. М.: Химия, 1966. – 1112 с.

REFERENCES

1. Puchkov S.V., Nepomnjashhih Ju.V. O vzaimodejstvii trifenilfosfinoksida s hloridom cinka v srede 2-butanola [About reaction of triphenylphosphine oxide with zinc chloride in 2-butanol] Vestnik KuzGTU [Bulletin KuzSTU]. 2020. No 6. P. 51-57.
2. Zhivopiscev V.P., Selezneva E.L. Analiticheskaja himija cinka [Analytical zinc chemistry.]. М.: Nauka, 1975. 200 p.
3. Papatriantafyllopoulou C., Raptopoulou C.P., Terzis A., Manessi-Zoupa E., Perlepes S.P. Investigation of the Zinc Chloride / Methyl(2-pyridyl)ketone Oxime Reaction System: A Mononuclear Complex and an Inverse 12-Metallacrown-4 Cluster // Z. Naturforsch. B. 2006. Vol. 61b. P. 37-46.
4. Baca S.G. Zinc(II) Complexes Based on *ortho*-Phthalic Acid and Ancillary N-Donor Ligands // IRJPAC. 2011. Vol. 2. No 1. P. 1-24.
5. Bruijninx P.C.A., Lutz M., den Breejen J.P., Spek A.L., van Koten G., Klein Gebbink R.J.M. Zinc complexes of the biomimetic N,N,O ligand family of substituted 3,3-bis(1-alkylimidazol-2-yl)propionates: the formation of oxalate from pyruvate JBIC // J. Biol. Inorg. Chem. 2007. Vol. 12. No 8. P. 1181-1196.
6. Wang X., Liu X., Huang J. Synthesis, Characterization of Zinc Complexes with Neutral α -Diimine Ligands and Application in Ring-opening Polymerization of ϵ -Caprolactone // CHIMIA. 2017. Vol. 71. No 11. P. 773-776.
7. Swamy S.J., Dharma Reddy A., Raju K., Bhaskar K. Synthesis of Iron (III), Cobalt (II), Nickel (II), Copper (II) and Zinc (II) complexes with new quadridentate N,O' donor ligands // Orient. J. Chem. Vol. 24. No 3. P. 1103-1106.
8. Choudhary A., Sharma R., Nagar M., Mohsin M. Transition metal complexes with N, S donor ligands as synthetic antioxidants: Synthesis, characterization and antioxidant activity // J. Enzyme Inhib. Med. 2010. Vol. 26. No 3. P. 394-403.
9. Labadi I., Parkanyi L., Kenessey G., Liptay G. Thermal stability and crystal structure of bis(1,2-ethanediol)zinc sulfate // Journal of Crystallographic and Spectroscopic Research. 1993. Vol. 23. No 4. P. 333-338.
10. Müller B., Vahrenkamp H. Zinc Complexes of Aldehydes and Ketones, 3 Aldehyde Complexes of Zinc Halides // Eur. J. Inorg. Chem. 1999. No 1. P. 129-135.
11. Sudbrake C., Vahrenkamp H. Chelate-stabilized zinc complexes of alcohols and carbonyl compounds: pyridylphenylketone and pyridylphenylmethanol / Inorganica Chimica Acta. 2001. Vol. 318. P. 23-30.
12. Pramanick R., Bhattacharjee R., Sengupta D., Datta A., Goswami S. An Azoaromatic Ligand as Four Electron Four Proton Reservoir: Catalytic Dehydrogenation of Alcohols by Its Zinc(II) Complex // Inorg. Chem. 2018. Vol. 57. No 12. P. 6816-6824.
13. Perkel' A.L., Krutskaja L.V., Frejdin B.G. Primenenie trifenilfosfina dlja gazohromatograficheskogo

opredelenija peroksidnyh soedinenij v produktah okislenija organicheskikh veshhestv [Use of triphenylphosphine for gas chromatographic determination of peroxide compounds in organic oxidation products]. Zhurn. analit. himii. [Journal of Analytical Chemistry]. 1994. Vol. 49. No 7. P. 768-772.

14.Svoystva organicheskikh soedinenij: Spravochnik [Organic Compound Properties: Reference] / pod red. A.A. Potehina. L.: Himija, 1984. 520 p.

15.Riddick J.A., Toops jr. E.E. Organic Solvents, Physical Properties and Methods of Purification. Interscience Publishers, New York, 1955. 552 p.

16.Wiberg K.B., Saegbarth K.A. The Mechanisms of Permanganate Oxidation. IV. Hydroxylation of Olefins and Related Reactions // J. Am. Chem. Soc. 1957. Vol. 79. No 11. P. 2822-2824.

17.Organikum: organisch-chemisches Grundpraktikum / Heinz Becker, Technische Universität Dresden, Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1963. 596 p.

18.Les Peroxydes Organiques, von V. Karnojitzki. Verlag Hermann Paris 1958. 1. Aufl., 142 S., geb. Ffrs. 1.200.

19.Kljuchnikov N.G. Rukovodstvo po neorganicheskomu analizu [Inorganic Analysis Manual]. M.: Himija, 1953. 333 p.

20.Puchkov S.V., Nepomnyashchikh Y.V. Reactivity of the CH-bonds of 2-butanol in liquid-phase oxidation // Russ. J. Phys. Chem. 2017. T. 91. № 12. С. 2337-2343.

21.Perkel' A.L., Voronina S.G., Perkel' R.L. Mikrometod opredelenija individu-al'nyh peroksidnyh soedinenij [Micrometode for the determination of individual peroxide compounds] // Zhurn. analit. himii. [Journal of Analytical Chemistry] 1991. Vol. 46. No 11. С. 2283-2286.

22.Skorokhodov V.I., Radionov B.K., Goryaeva O.Yu. Sorption of Zinc Complex Ions from Chloride Solutions with Ion Exchangers // Russ. J. Appl. Chem. 2004. V. 77. № 9. P. 1444-1449.

23.Muslim A. Adsorption of Copper Complexes on Anion Exchange Resin in Non-Ammoniacal and Ammoniacal Thiosulfate Leaching Systems // J. Chem. Eng. Process Technol. 2012. V. 3. № 1.

24.Wojnicki M., Socha R. P., Pędzich Z., Mech K., Tokarski T., Fitzner K. Palladium(II) Chloride Complex Ion Recovery from Aqueous Solutions Using Adsorption on Activated Carbon // J. Chem. Eng. Data. 2018. V. 63. № 3. P. 702.

25.Hilledand W.F., Lundell G.E.F. Applied Inorganic Analysis, With Special Reference to the Analysis of Metals, Minerals, and Rocks. New York: Wiley, 1955. 1034 p.

Поступило в редакцию 06.03.2021

Received 06 March 2021