

УДК 542.61

ЭКСТРАКЦИЯ ТИОФЕНА МЕТИЛОВЫМ ЭФИРОМ ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ 350

© 2021 г. В. О. Соловьев^{a, b, *}, С. В. Соловьева^{a, b}, Ю. А. Заходяева^b, А. А. Вошкин^{a, b}

^aМИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

^bИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

*e-mail: svo@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 08.07.2021 г.

После доработки 12.07.2021 г.

Принята к публикации 12.07.2021 г.

Экспериментально была изучена эффективность метилового эфира полиэтиленгликоля 350 (ПЭГ МЭ-350) в процессе извлечения тиофена из модельного моторного топлива. Было исследовано влияние времени контакта фаз, состава экстрагента, начальной концентрации тиофена и объемного соотношения экстрагента и модельного топлива на экстракцию тиофена. Было установлено, что ПЭГ МЭ-350 проявляет эффективные экстракционные свойства по отношению к тиофену, извлекая его до 81.58% за одну ступень экстракции. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы в процессах разработки экстракционной очистки жидких моторных топлив от серосодержащих соединений.

Ключевые слова: экстракция, межфазное распределение, тиофен, метиловый эфир полиэтиленгликоля 350, *n*-гексан

DOI: 10.31857/S0040357121060129

ВВЕДЕНИЕ

Продукты, образующиеся в процессе использования моторных топлив с высоким содержанием гетероциклических соединений серы, являются одними из основных источников загрязнения атмосферного воздуха [1]. Современные технологии очистки жидких топлив от серосодержащих соединений характеризуются относительно низкой эффективностью и высокими экологическими нагрузками. Так, широко используемый процесс обессеривания – гидроочистка – заключается в превращении соединений серы в H₂S и соответствующие углеводороды за счет высоких температур и давлений. Этот метод снижает октановое число, однако имеет ограниченную способность удалять гетероциклические соединения серы, такие как тиофен и его гомологи [2–4]. К тому же данный процесс требует сложного аппаратного оформления, большого количества атомарного водорода и дорогостоящих катализаторов [5]. Вследствие этого были разработаны альтернативные методы извлечения соединений серы, среди которых жидкостная экстракция является наиболее привлекательной из-за мягких условий проведения процесса и простой технологической реализации [5].

Традиционные органические экстрагенты, такие как сульфолан, диметилсульфоксид, диметилформамид, *N*-метилпирролидон, ацетонитрил и другие, являются эффективными по отношению к гетероциклическим серосодержащим соединениям, однако ввиду их токсичности и пожароопасности актуальность их применения сводится на нет в связи с обострившейся экологической ситуацией в мире [6–8]. Поэтому решение настоящей проблемы заключается в использовании экологически безопасных экстрагентов. Одними из таких до недавнего времени считались ионные жидкости. Они зарекомендовали себя как эффективные экстрагенты органических [9, 10] и неорганических [11, 12] веществ, металлов [13], а также в процессах обессеривания жидких топлив [14–18]. Однако сложность синтеза и токсичность ограничивают их применение не только в процессах экстракционного обессеривания жидких топлив, но и в процессах выделения и концентрирования органических и неорганических веществ. В последнее время набирает популярность новый вид экстрагентов – глубокие эвтектические растворители (DES – от англ. Deep Eutectic Solvents) [19–22]. Они также применяются в экстракции широкого спектра соединений [23, 24], а также используются в экстракционном обессеривании

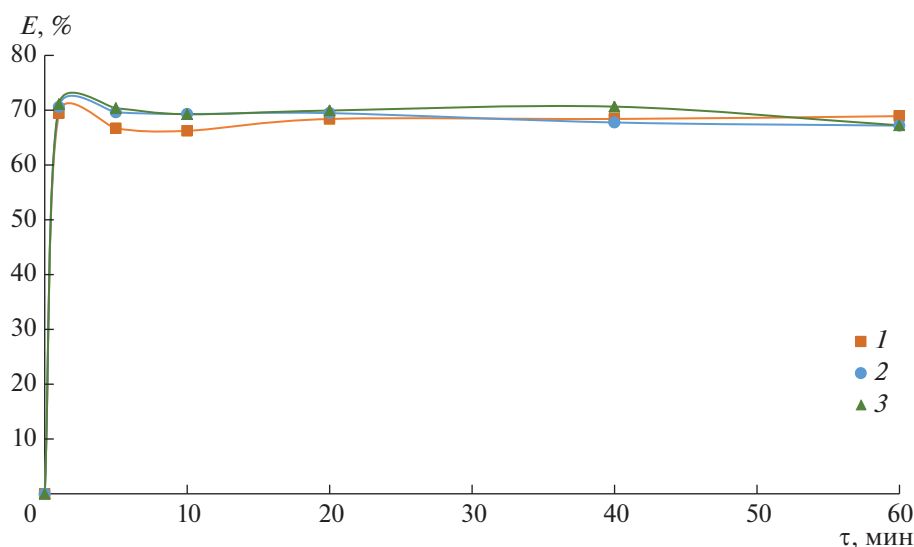


Рис. 1. Зависимость степени извлечения тиофена из *n*-гексана от времени контакта фаз при исходной концентрации тиофена, моль/л: 1 – 0.003, 2 – 0.005, 3 – 0.007.

моторных топлив [25, 26]. DES хотя и проявляют эффективные экстракционные свойства по отношению к гетероциклическим соединениям серы, однако имеют недостатки, такие как высокая вязкость, сложность подбора компонентов, входящих в их состав, для конкретных задач выделения и концентрирования веществ, а также некоторые DES могут быть токсичными и дорогостоящими. В связи с этим поиск и разработка новых эффективных экстрагентов серосодержащих соединений из жидких топлив становится актуальной задачей. Вследствие этого экстракционные системы на основе водорастворимых полимеров обретают особую актуальность, поскольку данные системы обладают исключительными преимуществами в сравнении с представленными выше экстрагентами, такими как дешевизна, нетоксичность, доступность, легкость в использовании и экологическая безопасность. Данные экстракционные системы применяются в экстракции органических [27, 28] и неорганических [29–31] соединений. Известны работы [1, 5, 32, 33], где используют водорастворимые полимеры, такие как полиэтиленгликоль, поливинилпирролидон и полипропиленгликоль, для извлечения тиофена и его производных из модельных моторных топлив.

В настоящей работе изучены процессы экстракционного выделения тиофена из модельных моторных топлив на примере *n*-гексана с использованием ПЭГ МЭ-350 в качестве экстрагента.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. При проведении экспериментальных исследований использовали следующие реактивы: тиофен (Biochem Chemopharma, $\geq 99.0\%$), *n*-гексан (ХИММЕД, квалификация х. ч.), ПЭГ МЭ-350 (Acros Organics). Все реактивы применялись без дополнительной очистки.

Метод приготовления растворов. Модельные топлива (МТ) готовили путем растворения тиофена с концентрациями 0.003; 0.005 и 0.007 моль/л в *n*-гексане. Экстрагент (Э) готовили путем растворения точного количества ПЭГ МЭ-350 в дистиллированной воде.

Процесс экстракционного обессеривания. В экспериментальном исследовании межфазного распределения тиофена в системе ПЭГ МЭ-350–*n*-гексан–вода использовали градуированные пробирки. Экстракцию проводили смешением раствора экстрагента и раствора, моделирующего жидкие моторные топлива, при объемном соотношении фаз 1 : 1 и далее полученную смесь перемешивали в течение 20 мин при 25°C в термостатированном шейкере Enviro-Genie (Scientific Industries, Inc.) при скорости вращения 45 об/мин для достижения термодинамического равновесия (рис. 1). Далее смесь центрифугировали в течение 5 мин при 2500 об/мин (центрифуга СМ-6МТ, SIA ELMI), после чего измеряли объемы фаз. Концентрацию тиофена в органической фазе определяли спектрофотометрическим методом (спектрофотометр Cary-60, Agilent) при длине волны 228 нм в кварцевых кюветках с длиной оптического пути 1 мм относительно *n*-гексана. Концен-

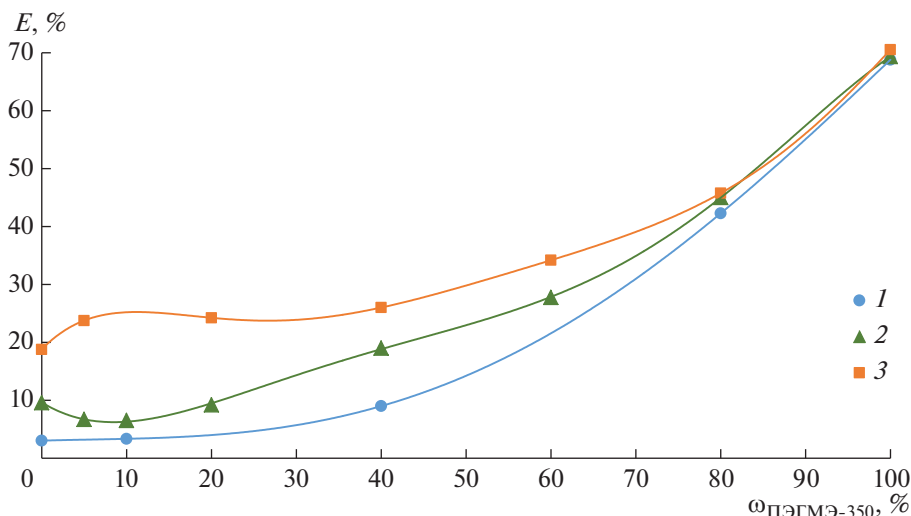


Рис. 2. Зависимость степени извлечения тиофена из *n*-гексана от концентрации ПАЭ МЭ-350 при исходной концентрации тиофена, моль/л: 1 – 0.003, 2 – 0.005, 3 – 0.007.

трацию тиофена в полимерной фазе определяли по разности между его концентрацией в исходном растворе и в органической фазе после экстракции.

Количественные характеристики процесса экстракции тиофена определяли по следующим формулам:

$$D = \frac{C_{\text{пол.ф}}^T}{C_{\text{орг.ф}}^T}, \quad (1)$$

$$E = \frac{C_{\text{пол.ф}}^T V_{\text{пол.ф}}}{C_{\text{орг.ф}}^T V_{\text{орг.ф}} + C_{\text{пол.ф}}^T V_{\text{пол.ф}}} \times 100. \quad (2)$$

Исследование механизма обессеривания. Для изучения механизма экстракции тиофена из *n*-гексана использовался ИК-Фурье спектрометр Shimadzu IRTracer-100 с приставкой НПВО Miracle-10 (Япония). Для этого были записаны инфракрасные спектры ПАЭ МЭ-350, тиофена и их смеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментально изучено межфазное распределение тиофена в экстракционной системе ПАЭ МЭ-350–*n*-гексан–вода. Изучены зависимости степени извлечения тиофена от времени контакта фаз, состава экстракционной системы и объемного соотношения Э/МТ.

На рис. 1 представлена зависимость степени извлечения тиофена от времени контакта фаз. Как видно из рисунка, термодинамическое равновесие экстракционной системы наступает спустя 20 мин и дальнейшее увеличение времени контакта фаз не приводит к изменению степени

извлечения тиофена. Вследствие этого дальнейшие эксперименты проводились при 20-минутном перемешивании.

Выбор состава экстракционной системы, позволяющей эффективно извлекать соединения серы, является одним из важнейших параметров оптимизации процесса экстракции.

На рис. 2 представлены результаты исследования зависимости степени извлечения тиофена от содержания ПАЭ МЭ-350 в системе *n*-гексан–вода. Из полученных экспериментальных данных видно, что с увеличением количества полимера наблюдается рост степени извлечения тиофена, достигая 70.65% за одну ступень экстракции при использовании 100% раствора ПАЭ МЭ-350.

В зависимости от нефтяного месторождения, в продуктах, образующихся после переработки нефти, содержится различное количество соединений серы. Вследствие этого становится необходимым исследование зависимости степени извлечения тиофена от его начальной концентрации. Исходя из рис. 2, видно, что с увеличением начальной концентрации тиофена увеличивается и эффективность его экстракции в диапазоне содержания от 0 до 80%. Однако при использовании чистого ПАЭ МЭ-350 эффективность извлечения тиофена достигает 70.65% за одну ступень экстракции вне зависимости от начальной концентрации тиофена.

Исходя из совокупности полученных данных из рис. 2, дальнейшие эксперименты зависимости объемного соотношения Э/МТ проводили с использованием полимера в чистом виде при на-

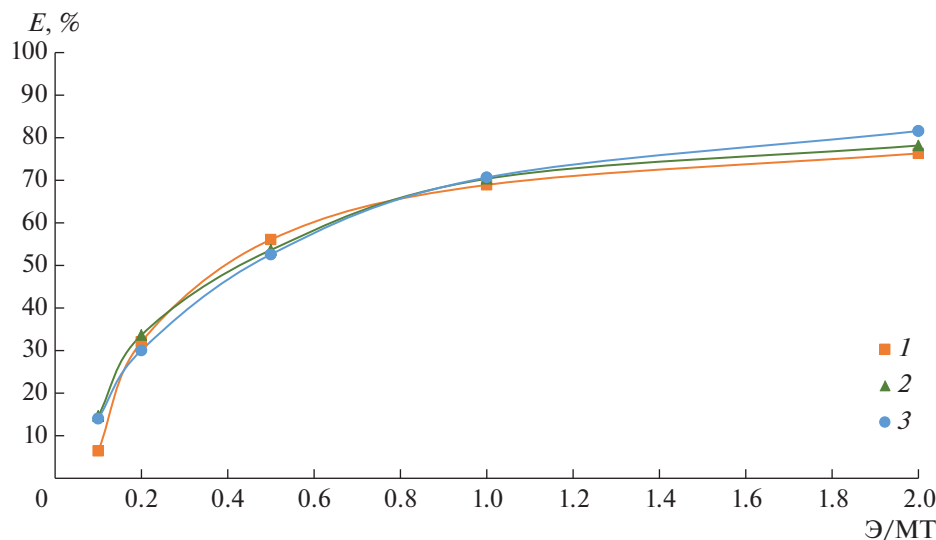


Рис. 3. Зависимость степени извлечения тиофена из *n*-гексана от объемного соотношения Э/МТ при исходной концентрации тиофена, моль/л: 1 – 0.003, 2 – 0.005, 3 – 0.007.

чальных концентрациях тиофена в *n*-гексанае 0.003; 0.005; 0.007 моль/л.

Ключевым экономическим параметром экстракционного обессеривания моторных топлив является объемное соотношение экстрагента и обрабатываемого сырья. Вследствие этого необходимо найти такое соотношение объемов полимерной и органической фаз, при котором будет использоваться минимальное количество экстрагента с максимальной эффективностью в процессе экстракционного обессеривания моторного топлива. На рис. 3 представлена зависимость степени извлечения тиофена от объемного соотношения полимерной и органической фаз в диапазоне от 1 : 10 до 2 : 1. Как видно из рисунка, с увеличением количества экстрагента наблюдается рост степени извлечения тиофена. Однако дальнейшее увеличение объемного соотношения не приводит к существенным изменениям количественных характеристик. Вследствие этого оптимальным отношением Э к МТ является 1 : 1. Также из рис. 3 видно, что начальная концентрация

тиофена практически не влияет на эффективность экстракционной системы при всех изученных объемных соотношениях.

Механизмы экстракции имеют большое значение для понимания процесса экстракционного обессеривания моторных топлив. Как показали результаты, ПЭГ МЭ-350 обладает эффективными экстракционными свойствами по отношению к тиофену. В основной цепи молекулы метилового эфира полиэтиленгликоля присутствуют активные отрицательно заряженные атомы О эфирной группы и положительно заряженные атомы Н группы –ОН. В молекуле тиофена присутствуют отрицательно заряженный атом S и положительно заряженные атомы Н ароматического кольца. На рис. 4 изображены два возможных механизма межмолекулярных взаимодействий: 1) взаимодействие между положительно заряженным атомом Н ароматического кольца молекулы тиофена и отрицательно заряженным атомом О эфирной группы молекулы метилового эфира полиэтиленгликоля, в результате чего образуется водородная связь, за счет которой происходит процесс экстракция тиофена из гексана; 2) взаимодействие между отрицательно заряженным атомом S молекулы тиофена и положительно заряженным атомом Н группы –ОН молекулы метилового эфира. Для подтверждения образования Н-связей были сняты ИК-Фурье спектры индивидуальных соединений (ПЭГ МЭ-350 и тиофен) и растворов после экстракции (рис. 5 и 6). Рисунки 5а и 5б показывают характерные пики для ПЭГ МЭ-350 и тиофена соответственно. В

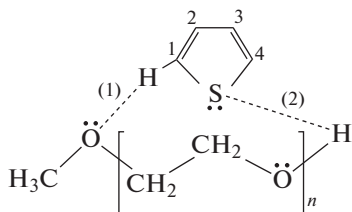


Рис. 4. Взаимодействие между ПЭГ МЭ-350 и тиофеном.

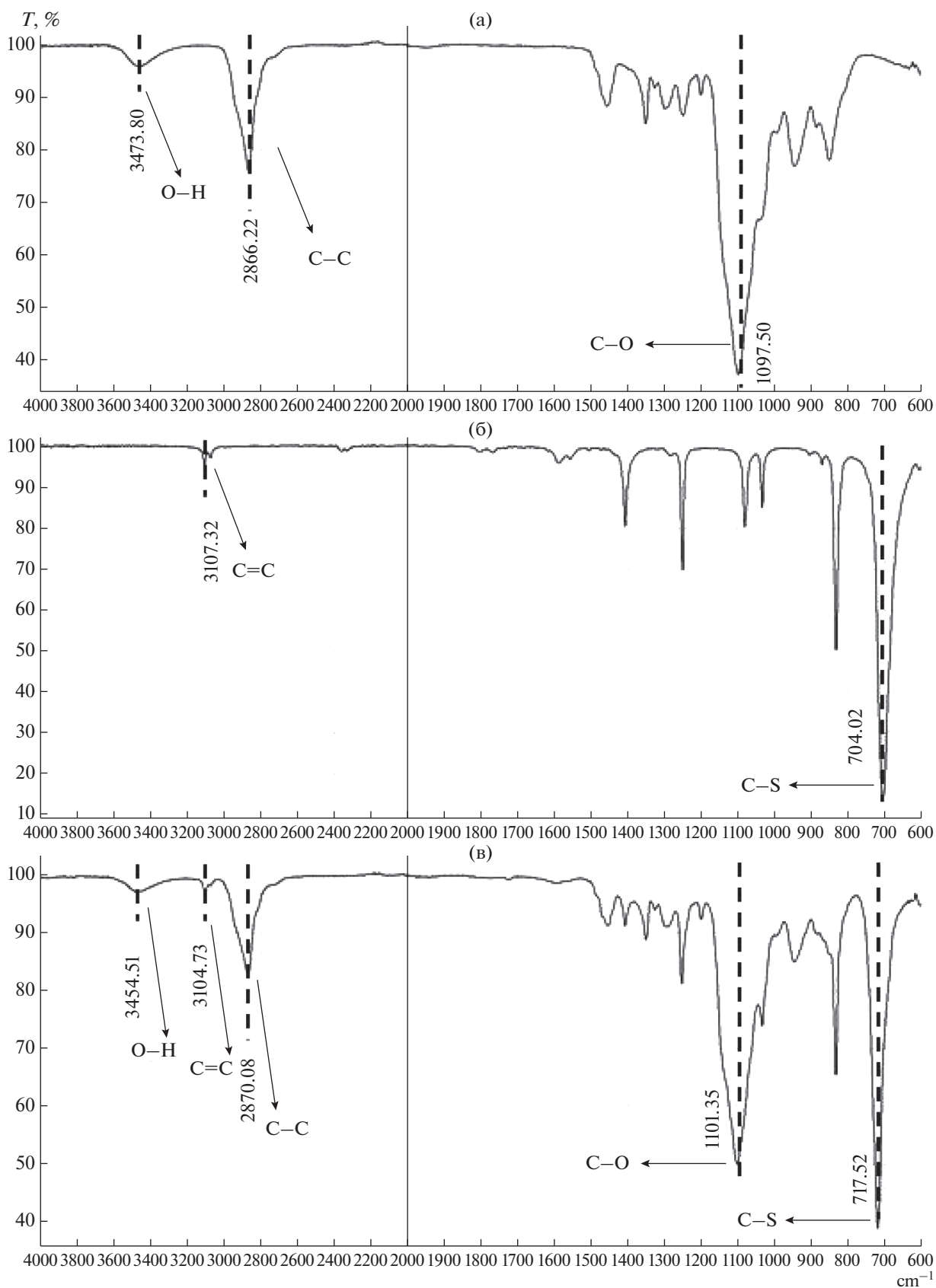


Рис. 5. ИК-Фурье спектры: (а) – ПЭГ МЭ-350; (б) – тиофен; (в) – экстракт.

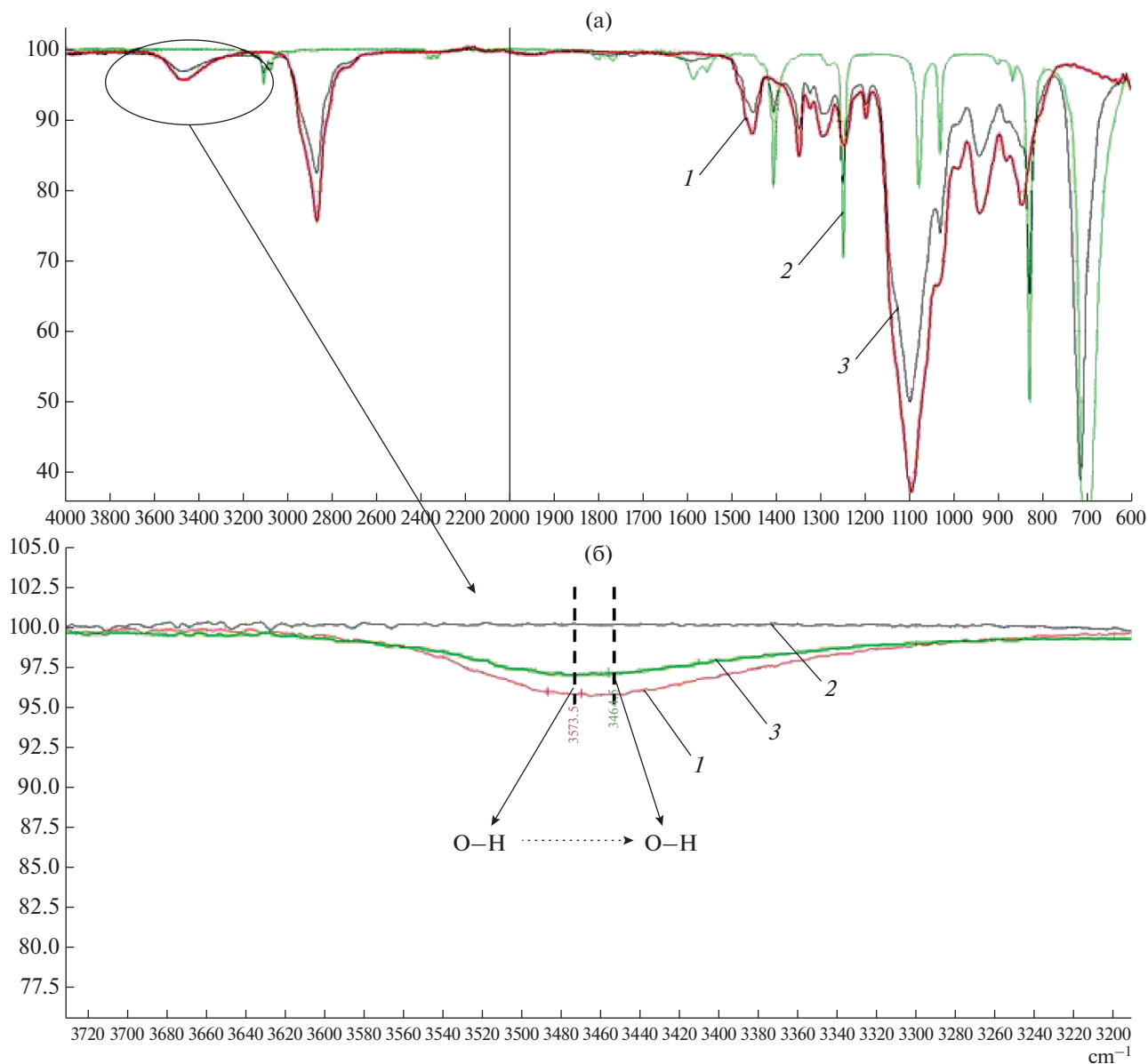


Рис. 6. Наложение ИК-Фурье спектров в диапазонах от 4000 до 600 cm^{-1} (а) и от 3700 до 3200 cm^{-1} (б): 1 – ПЭГ МЭ-350; 2 – тиофен; 3 – экстракт.

спектрах экстрактов наблюдается сдвиг пиков, соответствующих связям О–Н (с 3473.80 до 3453.51 cm^{-1} (рис. 5в, 6а, 6б)) и С–S (с 704.02 до 717.51 cm^{-1} (рис. 5в)). Это указывает на наличие взаимодействий (1) (рис. 4) за счет относительно прочной Н-связи. Сдвиг пика, соответствующего связи С–S, указывает на образование Н-связи, возможно, за счет атома Н в положении 1 или 4 (рис. 4). Незначительное смещение других пиков означает, что взаимодействие (2) (рис. 4) между молекулами ПЭГ МЭ-350 и тиофена, если и существует, то относительно слабое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что ПЭГ МЭ-350 обладает эффективными экстракционными свойствами по отношению к тиофену, извлекая его до 81.58% за одну ступень экстракции из *n*-гексана. Изучены зависимости эффективности экстракции от состава системы и условий проведения процесса, установлен механизм экстракции тиофена в раствор ПЭГ МЭ-350 за счет образования Н-связей между молекулами тиофена и ПЭГ МЭ-350 во взаимодействии (1). Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых высокоэффективных

экологически безопасных процессов экстракционного обессеривания моторных топлив.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-29-06070.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$C_{\text{пол.ф}}^{\text{T}}$	концентрация тиофена в полимерной фазе, моль/л
$C_{\text{орг.ф}}^{\text{T}}$	концентрация тиофена в органической фазе, моль/л
D	коэффициент распределения
E	степень извлечения, %
$V_{\text{пол.ф}}$	объем полимерной фазы, л
$V_{\text{орг.ф}}$	объем органической фазы, л

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев В.О., Заходяева Ю.А., Вошкин А.А. О влиянии добавок полимера, нитрата натрия и 1-метил-2-пирролидона на экстракцию тиофена в системе *n*-гексан–вода // Теор. осн. хим. технол. 2020. Т. 54. № 5. С. 623. [Solov'ev V.O., Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A. On the Influence of Additives of Polymer, Sodium Nitrate, and 1-Methyl-2-Pyrrolidone on the Extraction of Thiophene in an *n*-Hexane–Water System // Theor. Found. Chem. Eng. 2020. V. 54. № 5. P. 894.] <https://doi.org/10.1134/S0040579520050437>
2. Ferreira A.R., Freire M.G., Ribeiro J.C., Lopes F.M., Crespo J.G., Coutinho J.A. Ionic liquids for thiols desulfurization: experimental liquid–liquid equilibrium and COSMO-RS description // Fuel. 2014. V. 128. P. 314. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.020>
3. Rodríguez-Cabo B., Rodríguez H., Rodil E., Arce A., Soto A. Extractive and oxidative–extractive desulfurization of fuels with ionic liquids // Fuel. 2014. V. 117. P. 882. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.012>
4. Rahma W.S.A., Mjalli F.S., Al-Wahaibi T., Al-Hashmi A.A. Polymeric-based deep eutectic solvents for effective extractive desulfurization of liquid fuel at ambient conditions // Chem. Eng. Res. Des. 2017. V. 120. P. 271. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.02.025>
5. Заходяева Ю.А., Соловьев В.О., Зиновьева И.В., Рудаков Д.Г., Тимошенко А.В., Вошкин А.А. Межфазное распределение тиофена, толуола и *o*-ксилола в экстракционной системе гексан–полимер–вода // Теор. осн. хим. технол. 2019. Т. 53. № 4. С. 452. [Zakhodyaeva Y.A., Solov'ev V.O., Zinov'eva I.V., Rudakov D.G., Timoshenko A.V., Voshkin A.A. Interphase distribution of thiophene, toluene, and *o*-xylene in the hexane–polymer–water extraction system // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. № 4. P. 550.] <https://doi.org/10.1134/S0040579519040298>
6. Gao J., Meng H., Lu Y., Zhang H., Li C. A carbonium pseudo ionic liquid with excellent extractive desulfurization performance // AIChE J. 2013. V. 59. № 3. P. 948. <https://doi.org/10.1002/aic.13869>
7. Adžamić T., Sertić Bionda K., Zoretić Z. Desulfurization of FCC gasoline by extraction with sulfolane and furfural // Nafta. 2009. V. 60. № 9. P. 485.
8. Ban L.L., Liu P., Ma C.H., Dai B. Deep extractive desulfurization of diesel fuels by FeCl₃/ionic liquids // Chin. Chem. Lett. 2013. V. 24. № 8. P. 755. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2013.04.031>
9. Kholkin A.I., Belova V.V., Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A. Solvent extraction of weak acids in binary extractant systems // Sep. Purif. Technol. 2013. V. 48. № 9. P. 1417. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.745000>
10. Заходяева Ю.А., Вошкин А.А., Белова В.В. Экстракция уксусной кислоты бинарными экстрагентами // Журн. неорг. хим. 2013. Т. 58. № 4. С. 548. [Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A., Belova V.V. Extraction of acetic acid by binary extractants // Russ. J. Inorg. Chem. 2013. V. 58. № 4. P. 481.] <https://doi.org/10.1134/S0036023613040207>
11. Белова В.В., Куличенков С.А., Вошкин А.А., Холькин А.И., Куваева З.И., Солдатов В.С. Экстракция минеральных кислот динонилнафталинсульфонатом триоктилметиламмония // Журн. неорг. хим. 2007. Т. 52. № 3. С. 513. [Belova V.V., Kulichenkov S.A., Voshkin A.A., Khol'kin A.I., Kuvaeva Z.I., Soldatov V.S. Extraction of mineral acids with methyltrioctylammonium dinonylnaphthalenesulfonate // Russ. J. Inorg. Chem. 2007. V. 52. № 3. P. 460.] <https://doi.org/10.1134/S003602360703028X>
12. Yoshida W., Goto M. Amide-functionalised phosphonium-based ionic liquids as ligands for rhodium (III) extraction // RSC Adv. 2021. V. 11. № 16. P. 9386. <https://doi.org/10.1039/D1RA00489A>
13. Thasneema K.K., Dipin T., Thayyil M.S., Sahu P.K., Messali M., Rosalin T., Hadda T.B. Removal of toxic heavy metals, phenolic compounds and textile dyes from industrial waste water using phosphonium based ionic liquids // J. Mol. Liq. 2021. V. 323. Article 114645. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114645>
14. Wang Q., Zhang T., Zhang S., Fan Y., Chen B. Extractive desulfurization of fuels using trialkylamine-based protic ionic liquids // Sep. Purif. Technol. 2020. V. 231. Article 115923. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115923>
15. Butt H.S., Lethesh K.C., Fiksdahl A. Fuel oil desulfurization with dual functionalized imidazolium based ionic liquids // Sep. Purif. Technol. 2020. V. 248. Article 116959. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116959>
16. Fang L., Shen Z., Shen X., Kang S., Song H., Liang T. A study on thiophene removals from model oils with different molecular compositions using an inexpensive N-methylpyrrolidone–FeCl₃ ionic liquid // J. Mol. Liq. 2021. V. 333. Article 115913. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115913>
17. Jin N., Yue J., Zhao Y., Lü H., Wang C. Experimental study and mass transfer modelling for extractive desulfurization of diesel with ionic liquid in microreactors // Chem. Eng. J. 2021. V. 413. Article 127419. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127419>

18. *Liu F., Yu J., Qazi A. B., Zhang L., Liu X.* Metal-Based Ionic Liquids in Oxidative Desulfurization: A Critical Review // *Environ. Sci. Technol.* 2021. V. 55. № 3. P. 1419. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05855>
19. *Lima F., Dave M., Silvestre A.J., Branco L.C., Marrucho I.M.* Concurrent desulfurization and denitrogenation of fuels using deep eutectic solvents // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019. V. 7. № 13. P. 11341. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00877>
20. *Makoš P., Boczkaj G.* Deep eutectic solvents based highly efficient extractive desulfurization of fuels—Eco-friendly approach // *J. Mol. Liq.* 2019. V. 296. Article 111916. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111916>
21. *Rezaee M., Feyzi F., Dehghani M.R.* Extractive desulfurization of dibenzothiophene from normal octane using deep eutectic solvents as extracting agent // *J. Mol. Liq.* 2021. V. 333. Article 115991. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115991>
22. *Lima F., Branco L.C., Silvestre A.J., Marrucho I.M.* Deep desulfurization of fuels: Are deep eutectic solvents the alternative for ionic liquids? // *Fuel.* 2021. V. 293. Article 120297. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120297>
23. *Riveiro E., González B., Domínguez Á.* Extraction of adipic, levulinic and succinic acids from water using TOPO-based deep eutectic solvents // *Sep. Purif. Technol.* 2020. V. 241. Article 116692. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116692>
24. *Hanada T., Goto M.* Synergistic Deep Eutectic Solvents for Lithium Extraction // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2021. V. 9. № 5. P. 2152. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07606>
25. *Zhu Z., Lü H., Zhang M., Yang H.* Deep eutectic solvents as non-traditionally multifunctional media for the desulfurization process of fuel oil // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2021. V. 23. № 2. P. 785. <https://doi.org/10.1039/D0CP05153E>
26. *Warrag S.E., Darwish A.S., Abuhatab F.O., Adeyemi I.A., Kroon M.C., AlNashef I.M.* Combined extractive dearomatization, desulfurization, and denitrogenation of oil fuels using deep eutectic solvents: a parametric study // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2020. V. 59. № 25. P. 11723. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c01360>
27. *Зиновьева И.В., Заходяева Ю.А., Вошкин А.А.* Экстракция молочной кислоты с использованием системы полиэтиленгликоль—сульфат натрия—вода // *Теор. осн. хим. технол.* 2021. Т. 55. № 1. С. 110. [*Zinova I.V., Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A.* Extraction of Lactic Acid Using the Polyethylene Glycol—Sodium Sulfate—Water System // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. V. 55 № 1. P. 101.] <https://doi.org/10.1134/S0040579521010188>
28. *Li M., Yu X., Zhou C., Yagoub A.E.A., Sun Y., Yang H., Chen L.* Development of back-extraction recyclability of IL-ATPS for the efficient recovery of syringic and caffeic acid // *J. Mol. Liq.* 2021. V. 328. Article 115390. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115390>
29. *Федорова М.И., Заходяева Ю.А., Баранчиков А.Е., Крнев В.А., Вошкин А.А.* Экстракционная переработка Fe, Ni-содержащих элементов Ni-МН аккумуляторов // *Журн. неорг. хим.* 2021. Т. 66. № 2. С. 274. [*Fedorova M.I., Zakhodyaeva Y.A., Baranchikov A.E., Krenev V.A., Voshkin A.A.* Extraction Reprocessing of Fe, Ni-Containing Parts of Ni—MH Batteries // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. Т. 66. № 2. P. 266.] <https://doi.org/10.1134/S003602362102008X>
30. *Huang Y., Chen D., Chen S., Su M., Chen Y., Yuvaraja G.* A green method for recovery of thallium and uranium from wastewater using polyethylene glycol and ammonium sulfate based on aqueous two-phase system // *J. Cleaner Prod.* 2021. V. 297. Article 126452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126452>
31. *da Silveira Leite D., de Assis R.C., Domingues J.T., Carvalho P.L.G., de Castro M.C.M., da Cruz G.H., Rodrigues G.D.* Selective recovery of zinc from mining sulfuric liquor employing aqueous two-phase systems // *J. Water Process Eng.* 2021. V. 42. Article 102138. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102138>
32. *Gao J., Zhu S., Dai Y., Xiong C., Li C., Yang W. et al.* Performance and mechanism for extractive desulfurization of fuel oil using modified polyethylene glycol // *Fuel.* 2018. V. 233. P. 704. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.101>
33. *Meng X., Zhou P., Li L., Liu L., Guo M., Sun T.* A study of the desulfurization selectivity of a reductive and extractive desulfurization process with sodium borohydride in polyethylene glycol // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67235-8>