

# ПРИМЕНЕНИЕ КАРКАСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ ОКРАШЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

**Е.А. Власова, Н.К. Кулешова,  
А.В. Афанасьева**

**Ивановский государственный химико-технологический  
университет**



Синтезированы алюмо-, железо- и титансодержащие металлоорганические каркасные соединения на основе терефталевой кислоты и охарактеризованы с использованием широкого круга физико-химических методов: БЭТ, рентгенофазового и термогравиметрического анализов, ИК спектроскопии. Изучена сорбционная активность полученных каркасных соединений в отношении пищевых красителей – Индигокармина, Тартразина и Понсо 4R в широком интервале pH. Показано, что все исследуемые красители лучше сорбируются в кислых средах. Установлено, что указанные сорбенты сохраняют работоспособность не менее пяти циклов (с учетом регенерации путем обработки этанолом). Металлоорганические каркасные соединения могут быть использованы в качестве эффективных и легко регенерируемых сорбентов для очистки сточных вод от органических красителей пищевых производств.

*Ключевые слова: металлоорганические каркасные соединения, адсорбция, Индигокармин, Понсо 4R, Тартразин*

## Application of Metal-Organic Frameworks for Purification of Colored Waste Water of Food Industry

**E.A. Vlasova, N.K. Kuleshova, A.V. Afanas'eva**

**Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 153000 Ivanovo, Russia**

Aluminum-, iron- and titanium-containing metal-organic frameworks based on terephthalic acid was prepared and was characterized using BET, XRD, TGA and FT-IR techniques. Sorption of food dyes Indigo carmine, Tartrazine and Ponceau 4R with synthesized metal-organic frameworks was investigated in wide range of pH. It was established that the sorption of all dyes is better in acid media. It is found that the used metal-organic frameworks can be easily recycled at least five times, via ethanol washing. Metal-organic frameworks can be used as effective and easy regenerable sorbents for wastewater treatment from organic dyes of food industry.

*Keywords: metal-organic frameworks, adsorption, Indigo carmine, Ponceau 4R, Tartrazine*

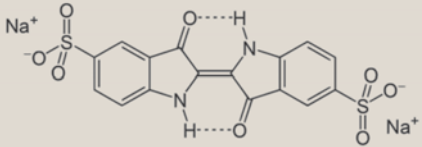
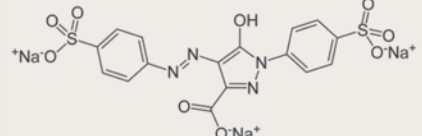
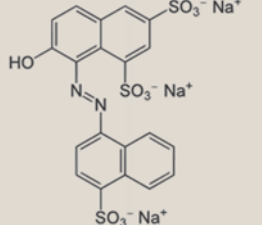
DOI: 10.18412/1816-0395-2019-01-15-19

**Д**ля придания продуктам питания цвета и улучшения их вида в пищевой промышленности используются натуральные и синтетические красители. Натуральные красители неустойчивы и легко разлагаются в промышленных условиях, поэтому использование синтетических органических красителей считается наиболее надежным и экономически эффективным способом придания окраски пище [1]. Результатом производства и потребления таких продуктов является выброс окрашенных

отходов в окружающую среду, загрязняющих тем самым сточные воды пищевых производств. Наличие красителей в стоках является небезопасным для водных организмов, так как многие пищевые красители обладают токсичными и канцерогенными свойствами [2]. Сброс неочищенных или плохо очищенных сточных вод в различные водоемы может привести к исчезновению всякой жизни в воде, например из-за нехватки кислорода. Очистка сточных вод, содержащих синтетические красители, является

сложной задачей, так как многие красители имеют сложную ароматическую структуру, которая делает их весьма стабильными и не поддающимися биохимическому разложению [3]. Из всех специальных методов очистки окрашенных сточных вод адсорбционные методы являются наиболее простыми, эффективными и экономически выгодными [4]. Преимущество применения адсорбции состоит также и в том, что адсорбенты могут быть достаточно легко регенерированы и использованы повторно [5]. В ка-

**Таблица 1. Структурные формулы красителей**  
**Table 1. Structural dye formulas**

| Краситель                              | Структурная формула   | $\lambda_{max}$ , нм |
|--|---|----------------------|
| Индигокармин<br>(пищевая добавка E132) |  | 610                  |
| Тартразин<br>(пищевая добавка E102)    |  | 425                  |
| Понсо 4R<br>(пищевая добавка E124)     |  | 507                  |

честве адсорбентов чаще всего используют торф, цеолиты, силикагели, опилки, глины и глинистые минералы [6]. Однако степень очистки сточных вод данными сорбентами обычно невелика и они эффективны лишь в узких интервалах pH. Также их недостаток — малая удельная площадь поверхности и поры небольшого размера. Получившие в последние годы широкую известность металлоорганические каркасные соединения (МОКС) обладают высокоразвитой поверхностью (до 10000 м<sup>2</sup>/г), низкой плотностью, возможностью модификации как органической, так и неорганической составляющих комплекса, отличаются порами больших размеров и, как следствие, имеют высокую сорбирующую способность по отношению ко многим соединениям [7]. МОКС интенсивно исследуются в связи с перспективами их широкого использования для разделения, сорбции и хранения органических соединений и газов

(CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) [8], в качестве катализаторов [9], носителей для лекарств пролонгированного действия [10] и в ряде других областей [11]. Необходимо отметить, что МОКС практически нетоксичны [12].

В настоящей работе изучена сорбирующая способность алюмо- (Al-МОКС), железосодержащих (Fe-МОКС) и титансодержащих (Ti-МОКС) МОКС на основе терефталевой кислоты по отношению к красителям Индигокармин (I), Тартразин (II), Понсо 4R (III), представляющих опасность для здоровья человека и окружающей среды вследствие своей канцерогенности. Структурные формулы используемых красителей приведены в табл. 1.

### Экспериментальная часть

В работе использовали Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O (Sigma Aldrich 98 %), Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O (Sigma Aldrich 98 %), буюксид титана(IV) (Sigma Aldrich 97 %), терефталевую кислоту (Sigma Aldrich 98 %), диметилформа-

мид (ос.ч.) и этанол (96 %), а также красители — Индигокармин, Тартразин и Понсо 4R, очищенные перекристаллизацией из водноспиртового раствора.

Рентгенофазовый анализ сорбентов проводили на приборе ДРОН 3М (Россия). ИК спектры регистрировали при комнатной температуре в таблетках с KBr с использованием спектрометра Avatar 360 (США). Термическую стабильность изучали с помощью дериватографа Netzsch STA449F3 (Германия). Наличие Al-, Fe- и Ti-МОКС в растворе после сорбции из него красителей определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрометра AAS BUCK 210 VGP (США). Сорбцию красителя МОКС осуществляли при 25 °С при непрерывном перемешивании в течение 20–60 мин. Сорбент (0,005–0,5 г) вводили в 20 мл водного раствора, содержащего краситель. Концентрация всех исследуемых красителей в растворе составляла 7,0·10<sup>-5</sup> моль·л<sup>-1</sup>. Далее сорбент отфильтровывали и определяли спектрофотометрически с помощью спектрофотометра Cary 50 (Австралия) концентрацию несорбированного красителя по изменению оптической плотности в максимуме поглощения красителя (см. табл. 1). Полученные данные анализировали с помощью программы Origin 8,0. Удельная поверхность Al-, Fe- и Ti-МОКС определялась с использованием метода БЭТ; размер и объем пор рассчитывался методом функциональной теории нелокальной плотности. Все анализируемые МОКС синтезированы гидротермальным методом [13]. Физические свойства синтезированных в работе МОКС приведены в табл. 2.

После завершения сорбции красителя МОКС отделяли центрифугированием в течение 5 мин при 5000 мин<sup>-1</sup>, промывали трижды этанолом, высушивали в вакууме при 150 °С в течение 4 ч. Далее чистый сорбент использовался в последующих циклах.

**Таблица 2. Физические свойства МОКС**  
**Table 2. The physical properties of MOF**

| Образец | Площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г | Размер пор, нм | Общий объем пор, см <sup>3</sup> /г | Выход МОКС, % |
|---------|--|----------------|-------------------------------------|---------------|
| Al-МОКС | 1195,7                                 | 0,97           | 0,76                                | 78,5          |
| Fe-МОКС | 180,2                                  | 0,63           | 0,25                                | 79,0          |
| Ti-МОКС | 1310                                   | 1,2            | 0,97                                | 75,0          |

**Таблица 3. Степень сорбции раствора красителя при разной концентрации МОКС****Table 3. The degree of sorption of the dye solution at different concentrations of MOF**

| Краситель                           | Количество МОКС, г* | Степень сорбции красителя**, % |        |         |        |         |        |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------|---------|--------|---------|--------|
|                                     |                     | Al-МОКС                        |        | Fe-МОКС |        | Ti-МОКС |        |
|                                     |                     | 20 мин                         | 60 мин | 20 мин  | 60 мин | 20 мин  | 60 мин |
| Индигокармин (пищевая добавка E132) | 0,005               | 2,5                            | 18,5   | 3,2     | 19,4   | 1,5     | 15,3   |
|                                     | 0,05                | 9,0                            | 76,1   | 10,0    | 77,7   | 5,0     | 68,6   |
|                                     | 0,1                 | 17,8                           | 86,3   | 19,8    | 87,9   | 15,4    | 84,6   |
|                                     | 0,2                 | 20,7                           | 97,5   | 22,7    | 99,6   | 16,7    | 97,1   |
|                                     | 0,3                 | 20,5                           | 98,1   | 23,5    | 98,8   | 16,5    | 97,6   |
|                                     | 0,5                 | 20,6                           | 98,2   | 23,3    | 99,0   | 16,5    | 97,2   |
| Тартразин (пищевая добавка E102)    | 0,005               | 9,2                            | 34,1   | 8,5     | 32,3   | 2,0     | 15,7   |
|                                     | 0,05                | 15,3                           | 48,8   | 14,1    | 46,5   | 7,4     | 33,3   |
|                                     | 0,1                 | 29,9                           | 89,0   | 28,8    | 88,1   | 14,6    | 80,0   |
|                                     | 0,2                 | 35,3                           | 99,4   | 32,1    | 97,9   | 19,4    | 90,7   |
|                                     | 0,3                 | 35,8                           | 99,0   | 32,0    | 98,0   | 19,7    | 96,1   |
|                                     | 0,5                 | 36,0                           | 99,1   | 32,2    | 98,0   | 20,0    | 96,2   |
| Понсо 4R (пищевая добавка E124)     | 0,005               | 7,9                            | 30,5   | 8,6     | 31,4   | 1,4     | 12,2   |
|                                     | 0,05                | 13,3                           | 82,2   | 15,2    | 78,6   | 13,5    | 27,7   |
|                                     | 0,1                 | 25,5                           | 90,1   | 20,2    | 88,6   | 19,9    | 91,2   |
|                                     | 0,2                 | 30,0                           | 98,8   | 29,9    | 97,2   | 28,9    | 97,6   |
|                                     | 0,3                 | 30,1                           | 99,0   | 30,0    | 98,5   | 29,4    | 97,9   |
|                                     | 0,5                 | 29,9                           | 99,0   | 30,1    | 98,4   | 29,1    | 98,0   |

\*Количество МОКС в 20 мл раствора красителя.

\*\* рН = 4.

### Результаты и их обсуждение

Полученные МОКС охарактеризованы с использованием широкого круга физико-химических методов. Согласно данным ИК спектроскопии в Al-, Fe- и Ti-МОКС наблюдается расщепление полос валентных колебаний связей C=O в области 1500–1700 см<sup>-1</sup>. В целом ИК спектр полученных МОКС по своему характеру и положению основных полос поглощения схож с ИК спектрами других МОКС, полученных на основе терефталевой кислоты [14]. Структуры синтезированных МОКС приведены в работах [13–15].

Данные рентгенофазового анализа также подтверждают образование высокоорганизованных металлоорганических каркасных соединений. На рис. 1 показана дифрактограмма полученных МОКС.

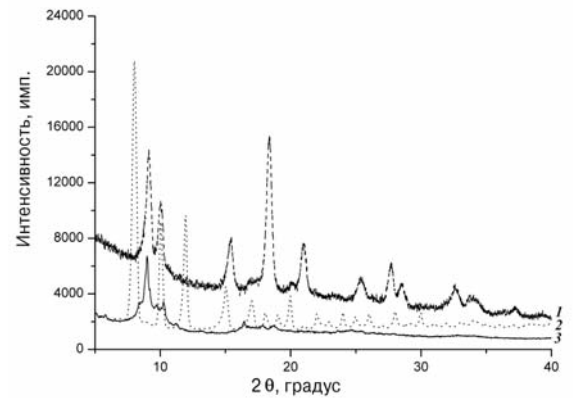
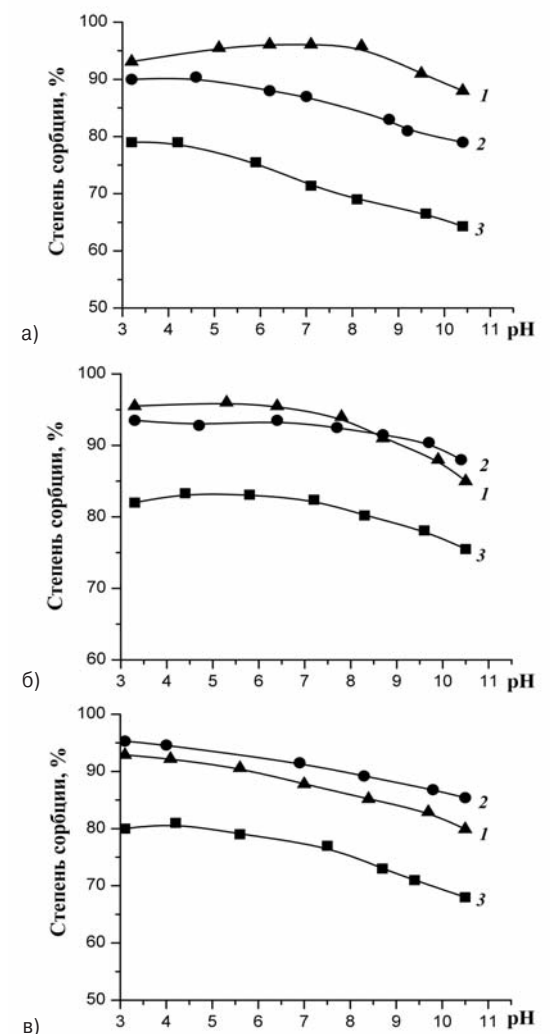
Из рис. 1 видно, что в области малых углов (до 10°) существует самый интенсивный пик, указывающий на наличие дегидратированной формы МОКС, имеющих в своей структуре большие поры [14].

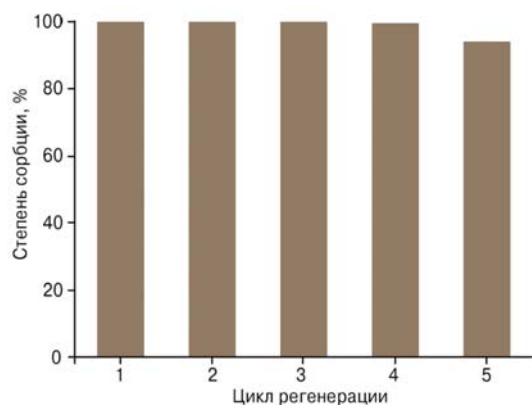
Установлено, что все три МОКС обладают высокой термической стабильностью, их термодеструкция начинается при температурах выше 500 °С — для Al-МОКС, 425 °С — для Ti-МОКС, 410 °С — для Fe-МОКС.

Далее была изучена возможность использования МОКС в качестве сорбентов пищевых красителей (Индигокармина, Тартразина и Понсо 4R).

Влияние рН на сорбционную способность металлоорганической каркасной структуры для всех трех красителей представлено на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что для всех трех красителей эффективность сорбции исследуемыми металлоорганическими каркасными соединениями выше в кислых средах, чем в щелочных. Подобное поведение сорбентов обусловлено тем, что на их поверхности имеются свободные карбоксильные группы, склонные к ионизации в нейтральных и щелочных средах. В щелочных средах кислотные красители имеют общий отрицательный заряд, поэтому с ростом рН сорбция красителей затрудняется.

**Рис. 1. Дифрактограмма Al-МОКС (1), Ti-МОКС (2) и Fe-МОКС (3)****Fig. 1. The diffractogram of Al-MOF (1), Ti-MOF (2) and Fe-MOF (3)****Рис. 2. Зависимость степени сорбции железо- (1), алюмо- (2) и титансодержащей (3) каркасной структурой красителей Понсо 4R (а), Тартразина (б) и Индигокармина (в) от рН ([Краситель] = 7,0·10<sup>-5</sup> моль/л; m(Al-, Fe- и Ti-МОКС) = 0,2 г в 20 мл раствора красителя; время сорбции – 30 мин; T = 293 К)****Fig. 2. Dependence of the degree of sorption of iron- (1), aluminum- (2) and titanium-containing (3) framework structure of the dyes Ponce 4R (a), Tartrazine (b) and Indigo carmine (c) on pH ([Dye] = 7.0·10<sup>-5</sup> mol/l; m(Al-, Fe- and Ti-MOF) = 0.2 g in 20 ml of the dye solution; sorption time – 30 minutes; T = 293 K)**



**Рис. 3. Степень сорбции красителя Понсо 4R при разном числе циклов регенерации Al-МОКС ([Краситель] =  $8 \cdot 10^{-5}$  моль/л,  $m(\text{Al-МОКС}) = 0,1$  г в 20 мл раствора красителя, 298 К)**

**Fig. 3. The sorption rate of the dye Ponso 4R with a different number of regeneration cycles Al-MOF ([Dye] =  $8 \cdot 10^{-5}$  mol/l,  $m(\text{Al-MOF}) = 0.1$  g in 20 ml of the dye solution, 298 K)**

Результаты влияния добавок Al-, Fe- и Ti-МОКС на степень сорбции трех рассматриваемых красителей во времени приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что по мере увеличения времени контакта и с ростом концентрации МОКС степень извлечения всех рассматриваемых красителей увеличивается. При максимально используемой в работе навеске Al-МОКС (0,5 г) значение сорбции красителей близко к 100 %.

Методом атомно-абсорбционной спектроскопии показано, что Al-, Fe- и Ti-МОКС отсутствуют в растворе после сорбции из него исследуемых красителей.

Степень сорбции рассматриваемых красителей оксидом

алюминия или пенополиуретаном (при одинаковых условиях ведения эксперимента — температура, pH, концентрация красителя, масса сорбента, время контактирования сорбента с красителем [16]) в 1,3 и 7 раз соответственно меньше значения степени сорбции, достигаемой в настоящей работе при использовании МОКС.

Важным вопросом является возможность регенерации сорбента. От способности сохранять свою сорбционную активность несколько циклов зависит стоимость сорбента, что очень важно для промышленного применения. В настоящей работе после каждого эксперимента по взаимодействию красителя и МОКС сорбент промывали трижды этанолом, сушили и использовали в новом эксперименте. Влияние количества циклов регенерации на работоспособность сорбента показано на рис. 3 на примере Al-МОКС.

Из рис. 3 видно, что сорбционная активность Al-МОКС не изменяется даже после четвертого цикла и остается на постоянном (высоком) уровне. После пятого цикла каталитическая активность Al-МОКС снизилась на 6 %, но по-прежнему остается на высоком уровне. Аналогичная тенденция наблюдалась и при использовании других полученных в настоящей работе МОКС. Данные ИК спектроскопии и рентгено-

структурного анализа исходного образца Al-МОКС и пятикратно используемого показали, что практически никаких изменений в структуре Al-МОКС не происходит.

Таким образом, Al-МОКС сохраняет высокую сорбционную активность даже после пятикратного использования без каких-либо изменений в своей структуре.

### Выводы

Показано, что алюмо-, железо- и титансодержащие металлоорганические каркасные соединения на основе терефталевой кислоты обладают высокой сорбирующей способностью по отношению к пищевым красителям. Установлено, что все исследуемые в работе кислотные красители лучше сорбируются в кислых средах. Выявлено, что указанные сорбенты сохраняют работоспособность не менее пяти циклов (с учетом регенерации путем трехкратной обработки этанолом). Таким образом, все полученные металлоорганические каркасные соединения могут быть рекомендованы к использованию в качестве эффективных и легко регенерируемых сорбентов для очистки сточных вод от органических красителей пищевой, текстильной, бумажной, косметической, фармацевтической промышленностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России в рамках базовой части государственного задания.

### Литература

1. Yamjala K., Nainar M.S., Ramiseti N.R. Methods for the analysis of azo dyes employed in food industry. A review. Food Chemistry. 2016. V. 192. P. 813–824.
2. Oplatomska M., Donnelly R.F., Majithiya R.J., Kennedy D.G., Elliott C.T. The potential for human exposure, direct and indirect, to the suspected carcinogenic triphenylmethane dye Brilliant Green from green paper towels. Food and Chemical Toxicology. 2011. V. 49. P. 1870–1876.
3. Pereira R.A., Pereira M.F.R., Alves M.M., Pereira L. Carbon based materials as novel redox mediators for dye wastewater biodegradation. Applied Catalysis B. 2014. V. 144. P. 713–720.

### References

1. Yamjala K., Nainar M.S., Ramiseti N.R. Methods for the analysis of azo dyes employed in food industry. A review. Food Chemistry. 2016. V. 192. P. 813–824.
2. Oplatomska M., Donnelly R.F., Majithiya R.J., Kennedy D.G., Elliott C.T. The potential for human exposure, direct and indirect, to the suspected carcinogenic triphenylmethane dye Brilliant Green from green paper towels. Food and Chemical Toxicology. 2011. V. 49. P. 1870–1876.
3. Pereira R.A., Pereira M.F.R., Alves M.M., Pereira L. Carbon based materials as novel redox mediators for dye wastewater biodegradation. Applied Catalysis B. 2014. V. 144. P. 713–720.



4. Rovani S., Censi M.T., Pedrotti S.L., Lima E.C., Cataluna R., Fernandes A.N. Development of a new adsorbent from agro-industrial waste and its potential use in endocrine disruptor compound removal. *Journal of Hazardous Materials*. 2014. V. 271. P. 311–320.
5. Prola L.D.T., Machado F.M., Bergmann C.P., de Souza F.E., Gally C.R., Lima E.C., Adebayo M.A., et al. Adsorption of Direct Blue 53 dye from aqueous solutions by multi-walled carbon nanotubes and activated carbon. *Journal of Environmental Management*. 2013. V. 130. P. 166–175.
6. Man X., Wu R., Lv H., Wang W. Synthesis of a montmorillonite-supported titania nanocomposite with grafted cellulose as a template and its application in photocatalytic degradation. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. V. 132. № 41. P. 42627–42632.
7. MacGillivray L.R., Lukehart C.M. *Metal-Organic Framework Materials*. Weinheim, Wiley, 2014. 592 p.
8. Ma S., Zhou H.-C. Gas storage in porous metal-organic frameworks for clean energy applications. *Chemical Communications*. 2010. V. 46. № 1. P. 44–53.
9. Liu J., Chen L., Cui H., Zhang L., Su C.-Y. Applications of metal-organic frameworks in heterogeneous supramolecular catalysis. *Chemical Society Reviews*. 2014. V. 43. № 16. P. 6011–6061.
10. Koukaras E.N., Montagnon T., Trikalitis P., Zdetsis A.D., Froudakis G.E. Toward efficient drug delivery through suitably prepared metal-organic frameworks: A first-principles study. *Journal of Physical Chemistry C*. 2014. V. 118. № 17. P. 8885–8890.
11. Czaja A.U., Trukhan N., Muller U. Industrial applications of metal-organic frameworks. *Chemical Society Reviews*. 2009. V. 38. № 5. P. 1284–1293.
12. Horcajada P., Serre C., McKinlay A.C., Morris R.E. Biomedical applications of metal-organic frameworks. *Metal-organic frameworks. Applications from catalysis to gas storage*. Weinheim, 2011. P. 251–264.
13. Vlasova E.A., Yakimov S.A., Naidenko E.V., Kudrik E.V., Makarov S.V. Application of metal-organic frameworks for purification of vegetable oils. *Food Chemistry*. 2016. V. 190. P. 103–109.
14. Hendon C.H., Tiana D., Fontecave M., Sanchez C., D'arras L., Sassoie C., Rozes L., Mellot-Draznieks C., Walsh A. Engineering the Optical Response of the Titanium-MIL-125 Metal – Organic Framework through Ligand Functionalization. *Journal of the American Chemical Society*. 2013. V. 135. № 30. P. 10942–10945.
15. Zlotea C., Phanon D., Mazaj M., Heurtaux D., Guillerm V., Serre C., Horcajada P., Devic T., Magnier E., Cuevas F., Ferey G., Llewellyn P.L., Latroche M. Effect of NH<sub>2</sub> and CF<sub>3</sub> functionalization on the hydrogen sorption properties of MOFs. *Dalton Transactions*. 2011. V. 40. P. 4879–4881.
16. Ramazanova G.R., Tikhomirova T.I., Apyari V.V. Sorption of food dyes on polyurethane foam and aluminum oxide. *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2013. V. 68. № 4. P. 175–180.
4. Rovani S., Censi M.T., Pedrotti S.L., Lima E.C., Cataluna R., Fernandes A.N. Development of a new adsorbent from agro-industrial waste and its potential use in endocrine disruptor compound removal. *Journal of Hazardous Materials*. 2014. V. 271. P. 311–320.
5. Prola L.D.T., Machado F.M., Bergmann C.P., de Souza F.E., Gally C.R., Lima E.C., Adebayo M.A., et al. Adsorption of Direct Blue 53 dye from aqueous solutions by multi-walled carbon nanotubes and activated carbon. *Journal of Environmental Management*. 2013. V. 130. P. 166–175.
6. Man X., Wu R., Lv H., Wang W. Synthesis of a montmorillonite-supported titania nanocomposite with grafted cellulose as a template and its application in photocatalytic degradation. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. V. 132. № 41. P. 42627–42632.
7. MacGillivray L.R., Lukehart C.M. *Metal-Organic Framework Materials*. Weinheim, Wiley, 2014. 592 p.
8. Ma S., Zhou H.-C. Gas storage in porous metal-organic frameworks for clean energy applications. *Chemical Communications*. 2010. V. 46. № 1. P. 44–53.
9. Liu J., Chen L., Cui H., Zhang L., Su C.-Y. Applications of metal-organic frameworks in heterogeneous supramolecular catalysis. *Chemical Society Reviews*. 2014. V. 43. № 16. P. 6011–6061.
10. Koukaras E.N., Montagnon T., Trikalitis P., Zdetsis A.D., Froudakis G.E. Toward efficient drug delivery through suitably prepared metal-organic frameworks: A first-principles study. *Journal of Physical Chemistry C*. 2014. V. 118. № 17. P. 8885–8890.
11. Czaja A.U., Trukhan N., Muller U. Industrial applications of metal-organic frameworks. *Chemical Society Reviews*. 2009. V. 38. № 5. P. 1284–1293.
12. Horcajada P., Serre C., McKinlay A.C., Morris R.E. Biomedical applications of metal-organic frameworks. *Metal-organic frameworks. Applications from catalysis to gas storage*. Weinheim, 2011. P. 251–264.
13. Vlasova E.A., Yakimov S.A., Naidenko E.V., Kudrik E.V., Makarov S.V. Application of metal-organic frameworks for purification of vegetable oils. *Food Chemistry*. 2016. V. 190. P. 103–109.
14. Hendon C.H., Tiana D., Fontecave M., Sanchez C., D'arras L., Sassoie C., Rozes L., Mellot-Draznieks C., Walsh A. Engineering the Optical Response of the Titanium-MIL-125 Metal – Organic Framework through Ligand Functionalization. *Journal of the American Chemical Society*. 2013. V. 135. № 30. P. 10942–10945.
15. Zlotea C., Phanon D., Mazaj M., Heurtaux D., Guillerm V., Serre C., Horcajada P., Devic T., Magnier E., Cuevas F., Ferey G., Llewellyn P.L., Latroche M. Effect of NH<sub>2</sub> and CF<sub>3</sub> functionalization on the hydrogen sorption properties of MOFs. *Dalton Transactions*. 2011. V. 40. P. 4879–4881.
16. Ramazanova G.R., Tikhomirova T.I., Apyari V.V. Sorption of food dyes on polyurethane foam and aluminum oxide. *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2013. V. 68. № 4. P. 175–180.

E.A. Власова – канд. хим. наук, науч. сотрудник, Ивановский государственный химико-технологический университет, 153000 Россия, г. Иваново, пр-кт Шереметевский 7, e-mail: vea@isuct.ru • Н.К. Кулешова – магистрант, e-mail: Nadi0407@mail.ru • А.В. Афанасьева – магистрант, e-mail: nuch1993@mail.ru

E.A. Vlasova – Cand. Sci. (Chem.), Research Fellow, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 153000 Russia, Ivanovo, Sheremetevskii av. 7, e-mail: vea@isuct.ru • N.K. Kuleshova – Undergraduate Student, e-mail: Nadi0407@mail.ru • A.V. Afanas'eva – Undergraduate Student, e-mail: nuch1993@mail.ru