

УДК 543.3:628.1

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-125-132

Оптический метод контроля концентрации антибиотиков в воде с целью оценки эффективности ее очистки естественным биоочистителем

А. А. Чернов¹, С. А. Степанова², Г. В. Симонова^{2}*

¹ Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: simgal@list.ru

Аннотация. В настоящее время большую тревогу стало вызывать загрязнение природных источников антибиотиками. Существующие очистные сооружения не решают полностью проблему сохранения пресной воды: методы очистки и контроля процесса очистки от лекарственных препаратов либо сложны, либо отсутствуют. Наиболее перспективным направлением очистки воды от загрязнителей являются биологические методы, поскольку водные растения как естественные очистители способствуют разложению загрязнителей и превращению их в безвредные или менее вредные соединения. Лидером такого типа очистителей в мире признана эйхорния (водяной гиацинт). В данной статье приводятся результаты измерений изменения концентрации антибиотика в воде, полученные оптическим методом с целью оценки эффективности процесса очистки. Выделение измерительного сигнала, обусловленного загрязнителем, осуществлялось дифференциальным способом. Выбор спектрального диапазона соответствовал максимуму поглощательной способности растворенного вещества. Концентрации примеси определялись по полученному для данного вещества градиентному графику. Результаты анализа проб показали значительное уменьшение, практически в три раза, концентрации загрязнителя в зависимости от времени очистки. В статье также обсуждается термический подход к проблеме утилизации отработанной биомассы. Проведенные эксперименты показали, что энергетическая ценность биомассы невысока и составляет менее 8 МДж/кг с большим количеством зольного остатка. Полученный результат может быть полезен для получения источника водорода и синтез-газа или выбора процесса утилизации отработанной биомассы.

Ключевые слова: природные воды, загрязнители, концентрация, антибиотики, очистка воды, природный водоочиститель, эйхорния (водяной гиацинт), оптическая плотность, энергетическая ценность

Введение

Производственная деятельность человека, направленная на его жизнеобеспечение, с момента своего возникновения вступила в противоречие с природой. Источники пресной воды практически во всем мире загрязнены [1]. В настоящее время особое внимание уделяется техногенной метаморфизации воды. Именно данный вид метаморфизации, связан-

ный с бытовой и производственной деятельностью человека, оказывает огромное влияние на изменение химического состава природных вод и их физико-химических свойств [2, 3]. Сейчас большую тревогу стало вызывать загрязнение природных источников антибиотиками, которые широко используются для лечения людей, а также в птицеводстве и животноводстве [4–8]. Особенно опасно, что высокие концентрации были выявлены на

большом удалении от места сброса сточных вод, что говорит о стойкости антибиотиков в природных водах [9]. Например, в сточных водах США зафиксирован ряд антибиотиков, концентрация которых в 25 раз превышает усредненные значения [10].

Поэтому природоохранные ведомства всех стран считают важной задачей очистку сточных вод от антибиотиков, а ученые ищут лучшие способы решения этой задачи. В обзоре, посвященном обобщению результатов работы 262 очистных сооружений, находящихся в странах Европы (Испания, Германия, Италия, Швейцария, Швеция, Австрия, Великобритания, Финляндия, Франция, Греция, Дания), Америки (США, Канада, Бразилия), Ближнего Востока (Израиль), Азии (КНР, Япония, Южная Корея, КНДР) и Австралии, проанализировано поведение на очистных сооружениях концентрации лекарственных препаратов [11, 12] и выявлено, что концентрация антибиотиков в воде слабо меняется после техногенных методов очистки, а контроль изменения их концентрации – трудоемкий и дорогостоящий процесс. Однако из всех огромных запасов воды на планете Земля на долю доступной пресной воды приходится ничтожная доля, а во всех областях человеческой деятельности используется именно пресная вода. В этой связи проблема сохранения водных ресурсов является крайне актуальной и должна иметь статус государственной [13, 14].

Существующие в настоящее время очистные сооружения не решают полностью проблему сохранения пресной воды. Это вызвано в основном двумя факторами: недостаточное количество и мощность очистных сооружений; неполная очистка загрязненной воды, в частности, от лекарственных препаратов, контроль концентрации которых часто вообще отсутствует.

Некоторые специалисты полагают, что для доочистки сточной воды наиболее перспективным направлением являются биологические методы, поскольку водные растения как естественные очистители являются не только механическим фильтром, но также способствуют размножению водных бактерий, которые в свою очередь способствуют разложению загрязнителей и превращению

их в безвредные или менее вредные соединения [15–21].

В качестве естественных очистителей воды используются многие растения: *Acorus calamus*, *Cyperus esculentus*, *Hydrocotyle umbellata*, *Iris versicolor*, *Juncus effusus*, *Phragmites australis* и др. Также используются мхи и лишайники, а на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности используются грибы белой гнили [22], но безусловным победителем среди растений – очистителей воды справедливо считается эйхорния (водяной гиацинт) [23]. Многие исследователи отмечают, что чем выше концентрация загрязнения, тем активнее эйхорния поглощает его [24, 25]. Еще одна ценность этого растения заключается в том, что после очистки водоема эйхорния может быть использована для производства водорода или синтез-газа посредством пиролиза модифицированной биомассы водяного гиацинта, а также как корм для животных [25].

К сожалению, в большинстве рассмотренных работ, которые показывают возможность использования естественных водочистителей (в частности, эйхорнии), отсутствуют количественные характеристики ее очистительных способностей для лекарственных форм [24, 25].

В данном исследовании с помощью оптического метода контроля оптической плотности растворов были получены количественные характеристики способности макрофита эйхорнии удалять примеси лекарственных форм из растворов на примере популярного антибиотика цефтриаксона из загрязненных им вод путем измерения концентрации загрязнителя.

Методы и материалы

Для проведения эксперимента в емкости с водой, загрязненной цефтриаксоном (*ceftriaxonum*, эмпирическая формула – $C_{18}H_{18}N_8O_7S_3$), объемом 3 л каждая, было помещено по одному растению водяного гиацинта (эйхорнии). Выбор лекарственного препарата обусловлен его хорошей растворимостью в воде и избирательностью спектральной поглощательной способности.

После помещения очистителя эйхорнии в емкости с водой, содержащие указанный за-

грязнитель, каждые три дня проводился отбор проб воды для последующего анализа.

Для количественных определений динамики изменения концентрации использовалась методика измерений на основе закона Ламберта – Бугера – Бера. Измерения оптической плотности в выбранном спектральном диапазоне производились с помощью фотометра КФК-2 [26]. Определение концентрации осуществлялось на основе градуировочного графика, полученного в данном исследовании для растворов с известной концентрацией используемой примеси.

Результаты

В данной работе представлены результаты исследования измерений концентрации примеси для оценки эффективности очистки воды от органического загрязнителя цефтриаксона.

Определение изменения концентрации примеси осуществлялось с помощью соотношения связи концентрации примеси и оптической плотности растворов по дифференциальной методике. Устранение влияния на значение оптической плотности обусловленной присут-

ствием в измерительном канале растворителя и кюветы производилось вычитанием из значений суммарной оптической плотности результатов измерений значений оптической плотности образцов без присутствия примеси.

Выбор спектрального интервала для исследования оптических характеристик среды производился сравнением значений оптической плотности для одного и того же образца в разных участках спектра (табл. 1). Значение оптической плотности определялось как среднее значение пяти единичных определений в условиях повторяемости. Среднеквадратичное отклонение среднего значения результатов измерений оптической плотности не превышало 0,006.

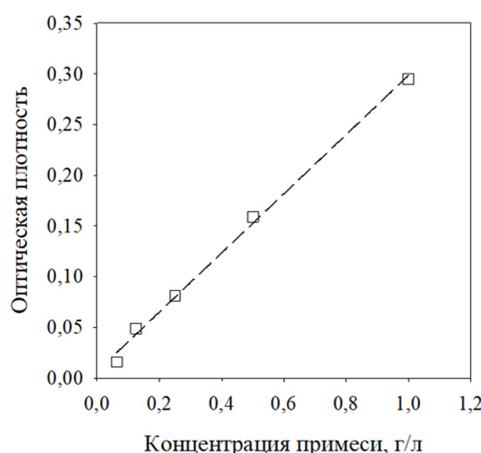
На основании полученных результатов выявлено, что максимальное поглощение светового потока для исследуемой примеси наблюдается в области 400 нм, и дальнейшие измерения проводились в этом спектральном интервале.

Определение концентрации примеси в исследуемых образцах осуществлялось на основе градуировочного графика (рисунок), построенного с помощью измерений оптической плотности для специально приготовленных растворов с известной концентрацией (табл. 2).

Таблица 1

Спектральные характеристики поглотительной способности цефтриаксона

Наименование образца	Оптическая плотность, нм			
	400	440	490	540
Кювета с водой	0,170	0,195	0,174	0,430
Раствор с концентрацией 1 г/л	0,460	0,315	0,200	0,440
Растворенное вещество	0,290	0,120	0,026	0,010



Зависимость оптической плотности от концентрации загрязнителя

Таблица 2

Результаты измерения концентрации для построения градуировочного графика

Наименование образца	Концентрация примеси, г/л				
	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Кювета с водой	0,170	0,171	0,170	0,171	0,170
Оптическая плотность раствора	0,465	0,330	0,252	0,220	0,186
Оптическая плотность, обусловленная примесью	0,295	0,159	0,081	0,049	0,016

Для определения изменения концентрации примеси в растворе через выбранные промежутки времени очистки определялась оптическая плотность образцов, которые отбирались из рабочей емкости.

В табл. 3 представлены значения концентрации примеси в зависимости от продолжительности очистки воды. Концентрация примеси определялась по градуировочному графику на рисунке.

Таблица 3

Результаты определения концентрации примеси растворов при очистке эйхорнией

Загрязнитель	Исходное состояние среды	Концентрация загрязнителя, г/л			
		через 3 дня очистки	через 6 дней очистки	через 9 дней очистки	через 12 дней очистки
Оптическая плотность	0,29	0,14	0,09	0,18	0,22
Концентрация примеси, г/л	1,00	0,48	0,32	0,68	0,74

Из табл. 3 видно, что концентрации загрязнителя воды в течение недели очистки эйхорнией значительно понизились, однако через девять дней очистки значения оптической плотности, обусловленные примесями, стали повышаться. Следует предположить, что изменение результатов измерений после длительного периода очистки соответствует уже не наличию цефтриаксона, а накоплением продуктов жизнедеятельности растения, которое сопровождается заметным помутнением и изменением цвета раствора, что характерно для содержания этого растения в ограниченном объеме жидкости.

Отработанный после очистки биоматериал также может быть полезно использован в качестве источника энергии в виде водорода и синтез-газа [25].

Для количественной оценки такой возможности авторами была определена энергетическая ценность высушенной эйхорнии методом синхронного термического анализа

с помощью прибора ТГ/ДСК-анализатора STA 409 PC (NETZSCH Pumpen & Systeme GmbH, 84478 Waldkraiburg, Германия, 2006-го года выпуска). Тепловыделение высушенного корня эйхорнии в воздухе составило около 7,7 МДж/кг. Остаток от первоначальной массы составил приблизительно 30 %.

Полученный результат может быть полезен при выборе источника водорода и синтез-газа, хотя при таких низких энергетических показателях (более чем в два раза меньше, нежели у дровяного материала), термическая утилизация, по-видимому, возможна только совместно с другим биотопливом.

Заключение

В данной работе приведены измерения изменения концентрации загрязнителя (антибиотика) в образцах воды, полученные оптическим методом, которые показали как высо-

кую эффективность процесса очистки раствора естественным водоочистителем – эйхорнией, так и возможность его контроля. За шесть дней очистки концентрация загрязнителя снизилась в три раза, даже при достаточно большой 1 г/л исходной концентрации.

Этот вывод хорошо согласуется с мировой тенденцией использовать для очистки при-

родных вод естественных биоочистителей – растений, а также водных бактерий.

Также в работе получены результаты исследования энергетических свойств биомассы растения, которые могут быть полезны для получения источника водорода и синтез-газа или выбора процесса утилизации отработанной биомассы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Охрана окружающей среды в России [Электронный ресурс] // Раздел «Официальная статистика» на официальном интернет-портале Росстата. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 18.11.2022).
2. Воробьёва Л. Б., Степанова С. А. Физико-химические процессы в техносфере. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 114 с.
3. Eid E. M., Shaltout K. H., Almuqrin A. H., Aloraini D. A., Khedher K. M., Taher M. A., Alfarhan A. H., Picó Y., Barcelo D. Uptake prediction of nine heavy metals by *Eichhornia crassipes* grown in irrigation canals: A biomonitoring approach // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 782. – P. 146887.
4. Чачина С. Б. Использование высших водных растений: эйхорнии, ряски малой и валлиснерии спиралевидной для доочистки сточных вод ОАО «Газпромнефть-ОМПЗ» // *Омский научный вестник*. – 2011. – № 1 (104). – С. 196–200.
5. Раимбеков К. Т. Биологическая очистка сточных вод животноводческих комплексов с использованием высших водных растений // *Universum: Химия и биология*. – 2017. – Т. 33, № 3. – С. 36–41.
6. Castiglioni S., Bagnati R., Fanelli R. Removal of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Italy // *Environmental Science and Technology*. – 2006. – Vol. 40. – P. 357–363.
7. Kummerer K. Significance of antibiotics in the environment // *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*. – 2003. – Vol. 52 (1). – P. 5–7.
8. Ben W., Pan X., Qiang Z. Occurrence and partition of antibiotics in the liquid and solid phases of swine wastewater from concentrated animal feeding operations in Shandong Province, China // *Environmental Science. Processes & Impacts*. – 2013. – Vol. 15. – P. 870–875.
9. Batt A. L., Bruce I. B. et al. Evaluating the vulnerability of surface waters to antibiotic contamination from varying wastewater treatment plant discharges // *Environmental Pollution*. – 2006. – Vol. 142 (2). – P. 295–302.
10. Kolpin D. W., Furlong E. T. et al. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in US streams / 1999–2000: A national reconnaissance // *Environmental Science and Technology*. – 2002. – Vol. 36 (6). – P. 1202–1211.
11. Verlicchi P., Al Aukidy M., Zambello E. Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load and environmental risk after a secondary // *Science of The Total Environment*. – Vol. 429. – P. 123–155.
12. Batt A. L., Kim S. Comparison of occurrence of antibiotics in four full-scale wastewater treatment plants with varying designs and operations // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 68 (3). – P. 428–435.
13. Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 г. [Электронный ресурс] : Утв. Президентом РФ от 30.04.2012. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
14. Охрана окружающей среды в Новосибирской области, 2010–2015 г. : статистический сборник. – Новосибирск : Территориальный орган Федеральной службы Государственной статистики по Новосибирской области, 2016.
15. Калайда М. Л. Устройство биоплато на озере Средний Кабан как биологический метод очистки вод // *Экология Татарстана*. – 2012. – № 4. – С. 26–30.
16. Степанова С. А., Симонова Г. В. Водяной гиацинт – естественный водоочиститель // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 264–276.
17. Джакупова И. Б., Султангазиева Г. С., Божбанов А. Ж. Биологический метод очистки сточных вод // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – 2014. – № 1 (17). – С. 113–117.

18. Калайда М. Л., Хамитова М. Ф. Возможности применения эйхорнии в доочистке вод целлюлозно-бумажного комбината. Ч. 3. Особенности химического состава *Eichorniacrassipes* // Бутлеровские сообщения. – 2015. – Т. 44, № 1. – С. 113–121. ROI: jbc-01/15-44-11-113.
19. Степанова С. А., Симонова Г. В. Сравнительная оценка методов контроля очистки воды от загрязнителей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 8 : Национальная. науч. конф. с междунар. участием «СибОптика-2021. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – С. 150–155.
20. Флюрик Е. А., Абрамович О. В., Змитрович А. А. Использование *Eichornia crassipes* для очистки сточных вод и получения кормовой добавки // Тр. Белорусского государственного технологического ун-та. Химия и технология органических веществ и биотехнология. – 2014. – № 4. – С. 155–160.
21. Пат. RU 2259961 Российская Федерация. Способ очистки стоков и воды водоемов от токсикантов / Дмитриев А. Г., Кручинин Н. А., Сокол К. А., Николаева Г. М., Кондратьев В. А.; патентообладатели Кручинин Н. А., Дмитриев А. Г. – № 2004126208/15; заявл. 31.08.2004; опубл. 10.09.2005, бюл. № 25. – 6 с.
22. Калайда М. Л., Борисова С. Д., Хамитова М. Ф., Петров А. В. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 19034 ИНИИПИ РАО ОФЭРНиО от 27.03.2013. Компьютерная программа моделирования работы водоочистного сооружения с использованием высшей водной растительности. «БИОПЛАТО».
23. Эйхорния – чудо-растение, очищающее сточные воды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ecologist1.livejournal.com/35721.html?rfrom=a_forester (дата обращения: 18.11.2022).
24. Chai T. T., Ngoi J. C., Wong F. C. Herbicidal potential of *Eichhornia crassipes* leaf extract against *Mimosa pigra* and *Vigna radiata* // International Journal of Agriculture and Biology. – 2013. – Vol. 15, No. 5. – P. 835–842.
25. Thien Khanh Tran, Namkeun Kim, Hoang Jyh Leu, Minh Phuc Pham, Nhat Anh Luong, Hoang Khiem Vo The production of hydrogen gas from modified water hyacinth (*Eichhornia Crassipes*) biomass through pyrolysis process // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Vol. 46, Issue 27. – P. 13976–13984.
26. Фотоколориметр КФК-2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tehno.com/product.phtml?uid=B00120034583> (дата обращения: 18.11.2022).

Об авторах

Анатолий Альбертович Чернов – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории кинетики процессов горения.

Светлана Арсеньевна Степанова – кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств инноватики и метрологии.

Галина Вячеславна Симонова – кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии.

Получено 26.11.2022

© А. А. Чернов, С. А. Степанова, Г. В. Симонова, 2023

An optical method for monitoring the concentration of antibiotics in water in order to assess the effectiveness of its purification by a natural biocleaner

A. A. Chernov¹, S. A. Stepanova², G. V. Simonova^{2}*

¹ Institute of Chemical Kinetics & Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: simgal@list.ru

Abstract. At present, contamination of natural water sources with antibiotics has become of great concern. Existing treatment facilities do not fully solve the problem of fresh water conservation, methods of purification and process control of purification from antibiotics, are either complex or do not work at all. The most promising direction of water purification from pollutants is biological methods, since aquatic plants, as natural

cleaners, contribute to the decomposition of pollutants and their transformation into harmless or less harmful compounds. Eichornia (water hyacinth) recognized, as the leader of this type of cleaner in the world. This article presents the measurement results of antibiotic concentration changes in water obtained by optical methods in order to assess the effectiveness of the purification process. The selection of the measuring signal due to the pollutant carried out in a differential way. The choice of the spectral range corresponded to the maximum absorption capacity of the dissolved substance. The impurity concentration was determined according to the calibration curve obtained for the given substance. The results of the samples analysis showed a significant decrease, almost three times, in the concentration of the pollutant, depending on the cleaning time. The article also discusses the thermal approach to the problem of waste biomass disposal. The conducted experiments showed that the energy value of the biomass is not high and is less than 8 MJ/kg with a large amount of ash residue. The result obtained can be useful for obtaining a source of hydrogen and synthesis gas or choosing a process for utilizing spent biomass.

Keywords: natural waters, contaminants, water purification, antibiotics, natural water purifier, eichornia (water hyacinth), concentration, optical density, energy value

REFERENCES

1. Environmental protection in Russia (n. d.). "Official statistics" on the official Internet portal of Rosstat. Retrieved from <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (accessed November 18, 2022) [in Russian].
2. Vorobieva, L. B., & Stepanova, S. A. (2008). *Fiziko-khimicheskie protsessy v tekhnosfere [Physical and chemical processes in the technosphere]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 114 p. [in Russian].
3. Eid, E. M., Shaltout, K. H., Almuqrin, A. H., Aloraini, D. A., Khedher, K. M., Tahe, r M. A., Alfarhan, A. H., Picó, Y., & Barcelo, D. (2021). Uptake prediction of nine heavy metals by Eichhornia crassipes grown in irrigation canals: A biomonitoring approach. *Science of the Total Environment*, 782, P.146887.
4. Chachina, S. B. (2011). The use of higher aquatic plants: eichhornia, duckweed and spiral vallisneria for post-treatment of wastewater. OAO Gazpromneft-ONPZ. *Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 1(104), 196–200 [in Russian].
5. Raimbekov, K. T. (2017). Biological wastewater treatment of livestock complexes using higher aquatic plants. *Zhurnal Universum: Khimiya i biologiya [Universum Journal: Chemistry and Biology]*, 33(3), 36-41 [in Russian].
6. Castiglioni, S., Bagnati, R., & Fanelli, R. (2006). Removal of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Italy. *Environmental Science and Technology*, 40, 357–363.
7. Kummerer, K. (2003). Significance of antibiotics in the environment. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 52(1), 5–7.
8. Ben, W., Pan, X., & Qiang, Z. (2013). Occurrence and partition of antibiotics in the liquid and solid phases of swine wastewater from concentrated animal feeding operations in Shandong Province, China. *Environmental Science. Processes & Impacts*, 15, 870–875.
9. Batt, A. L., Bruce, I. B., & et al. (2006). Evaluating the vulnerability of surface waters to antibiotic contamination from varying wastewater treatment plant discharges. *Environmental Pollution*, 142(2), 295–302.
10. Kolpin, D. W., Furlong, E. T., & et al. (2002). Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in US streams / 1999–2000: A national reconnaissance. *Environmental Science and Technology*, 36(6), 1202–1211.
11. Verlicchi, P., Al Aukidy, M., & Zambello, E. (2012). Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load and environmental risk after a secondary. *Science of the Total Environment*, 429, 123–155.
12. Batt, A. L., & Kim, S. (2007). Comparison of occurrence of antibiotics in four full-scale wastewater treatment plants with varying designs and operations. *Chemosphere*, 68(3), 428–435.
13. Fundamentals of state policy in the field of environmental development of Russia for the period up to 2030. Approved by the President of the Russian Federation on April 30, 2012. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
14. Environmental protection in the Novosibirsk region 2010–2015. (2016). Statistical collection. Novosibirsk: Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Novosibirsk region [in Russian].
15. Kalaida, M. L. (2012). Arrangement of a bioplateau on the Sredny Kaban lake as a biological method of water purification. *Ekologiya Tatarstana [Ecology of Tatarstan]*, 4, 26–30 [in Russian].

16. Stepanova, S. A., & Simonova, G. V. (2019). Water hyacinth is a natural water purifier. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(1), 264–276 [in Russian].
17. Dzhakupova, I. B., Sultangazieva, G. S., & Bozhbanov, A. Zh. (2014). Biological method of wastewater treatment. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus [XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus]*, 1(17), 113–117 [in Russian].
18. Kalaida, M. L., & Khamitova, M. F. (2015). Possibilities of using eichornia in post-treatment of waters of a pulp and paper mill. Part 3. Features of the chemical composition of Eichornia crassipes. *Butlerovskie soobshcheniya [Butlerov Communications]*, 44(1), 113–121. ROI:jbc-01/15-44-11-113.
19. Stepanova, S. A., & Simonova, G. V. (2021). Comparative evaluation of control methods for water purification from pollutants. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2021: Natsional'noy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: T. 8: SibOptika-2021. Aktual'nye voprosy vysokotekhnologichnykh otrasley [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2021: National Scientific Conference with International Participation. Vol. 8: SibOptika-2021. Topical Issues of High-Tech Industries]* (pp. 150–155). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
20. Flyurik, E. A., Abramovich, O. V., & Zmitrovich, A. A. (2014). Use of Eichornia crassipes for wastewater treatment and feed additive production. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya [Proceedings of the Belarusian State Technological University. Chemistry and Technology of Organic Substances and Biotechnology]*, 4, 155–160 [in Russian].
21. Dmitriev, A. G., Kruchinin, N. A., Sokol, K. A., Nikolaeva, G. M., & Kondratiev, V. A. (2005). Method for Purifying Effluent and Water from Ponds from Toxicants. Patent RU 2259961 [in Russian].
22. Kalaida, M. L., Borisova, S. D., Khamitova, M. F., & Petrov, A. V. (2013). Electronic resource registration certificate No. 19034 IIIPI RAO OFERNiO of March 27, 2013. Computer program for modeling the operation of a water treatment plant using higher aquatic vegetation. "BIOPLATO".
23. Eichornia – a miracle plant that purifies wastewater. (n. d.). Retrieved from https://ecologist1.livejournal.com/35721.html?rfrom=a_forester (accessed November 18, 2022) [in Russian].
24. Chai, T. T., Ngoi, J. C., & Wong, F. C. (2013). Herbicidal potential of Eichhornia crassipes leaf extract against Mimosa pigra and Vigna radiate. *International Journal of Agriculture and Biology*, 15(5), 835–842.
25. Thien Khanh Tran, Namkeun Kim, Hoang Jyh Leu, Minh Phuc Pham, Nhat Anh Luong, & Hoang Khiem Vo (2021). The production of hydrogen gas from modified water hyacinth (Eichhornia Crassipes) biomass through pyrolysis process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 19 13976–13984.
26. Photocolorimeter KFK-2. (n. d.). Retrieved from <http://www.tehno.com/prod-uct.phtml?uid=B00120034583> (accessed November 18, 2022) [in Russian].

Author details

Anatoly A. Chernov – Ph. D., Researcher, Laboratory of Kinetics of Combustion Processes.

Svetlana A. Stepanova – Ph. D., Associate Professor, Department of Special-Purpose Devices, Innovatics and Metrology.

Galina V. Simonova – Ph. D., Associate Professor Department of Special-Purpose Devices, Innovatics and Metrology.

Received 26.11.2022

© A. A. Chernov, S. A. Stepanova, G. V. Simonova, 2023