

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА(III) ОСТАТОЧНОЙ БИОМАССОЙ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ *CHLORELLA SOROKINIANA*

Ю.А. Смятская, А.А. Фазуллина, Н.А. Политаева, А.Н. Чусов, А.А. Безбородов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Казанский национальный исследовательский технологический университет

Исследованы сорбционные свойства остаточной биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana*, которая образуется после извлечения липидов. Остаточная биомасса, является отходом и используется для очистки сточных вод от ионов железа(III). Проведены микроструктурные исследования микроводорослей *Chlorella sorokiniana* и остаточной биомассы после извлечения липидов. Изучена очистка модельных сточных вод от ионов железа(III) в статических условиях, рассчитаны эффективность очистки и адсорбционная ёмкость остаточной биомассы *Chlorella sorokiniana*. Создан модельный фильтр, где в качестве фильтрующей загрузки использовали остаточную биомассу *Chlorella sorokiniana* и изучены процессы сорбции в динамических условиях. Рассчитаны эффективности очистки модельных сточных вод от ионов железа(III) и проведен сравнительный анализ эффективности очистки в статических и динамических условиях. Предложен способ утилизации отработанных сорбентов в качестве дополнительного топлива. Экспериментальным путем определена удельная теплота сгорания ($q = 20\,674$ кДж/кг) отработанных сорбентов из остаточной биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana*, значение которой не уступают традиционным энергоносителям.

Ключевые слова: остаточная биомасса, микроводоросли *Chlorella Sorokiniana*, очистка вод, ионы железа, сорбционные материалы

Wastewater Treatment of Iron(III) Ions with Residual Biomass of Microalgae *Chlorella Sorokiniana*

Yu.A. Smyatskaya, A.A. Fazullina, N.A. Politaeva, A.N. Chusov, A.A. Bezborodov

St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 194021 Petersburg, Russia, Kazan National Research Technological University, 420015 Kazan, Russia

The sorption properties of the residual biomass of microalgae *Chlorella sorokiniana*, which is formed after the extraction of lipids, were investigated. Residual biomass is waste and is used for wastewater treatment from iron(III) ions. Microstructural studies of *Chlorella sorokiniana* microalgae and residual biomass after lipid extraction were carried out. The purification of model wastewater from iron(III) ions under static conditions has been studied, the purification efficiency and adsorption capacity of the residual biomass of *Chlorella sorokiniana* have been calculated. A model filter was created, where residual biomass of *Chlorella sorokiniana* was used as a filtering load and sorption processes were studied under dynamic conditions. The efficiency of purification of model wastewater from iron(III) ions has been calculated and a comparative analysis of the effectiveness of purification under static and dynamic conditions has been carried out. A method for the disposal of spent sorbents as an additional fuel is proposed. The specific heat of combustion ($q = 20,674$ kJ/kg) of the spent sorbents from the residual biomass of microalgae *Chlorella sorokiniana*, the value of which is not inferior to traditional energy sources, was determined experimentally.

Keywords: residual biomass, microalgae *Chlorella Sorokiniana*, water purification, iron ions, sorption materials

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-06-22-27

Один из четырех законов Барри Коммонера (1917–2012) гласит: "Природа знает лучше". Процессы самоочищения происходят и без участия человека, но для их ускорения необходимы дополнительные условия [1]. Так, в работах [2, 3] изучена возможность применения высших водных ра-

стений на примере ряски малой для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Для ускорения процесса фиторемедиации стоков с применением высших водных растений (ряски, эйхорнии, лимнофилы) используют различные физические воздействия (магнитное поле, лазерное излучение) [4, 5].

Многие российские и зарубежные авторы предлагают использовать микроводоросли для очистки воды. В работе [6] изучен новый метод борьбы с сине-зелеными водорослями, вызывающими цветение водоемов, с помощью зеленой водоросли хлореллы. В работе [7] проведены исследования, посвященные очистке городских

сточных вод, изучению роста, а также накоплению липидов представителями зелёных водорослей *C. sorokiniana* и *Scenedesmus obliquus*. Известны опыты по извлечению ионов тяжелых металлов — меди, никеля, кадмия — из питьевых вод с помощью *C. sorokiniana*, иммобилизованной на вытяжке из водорослей ламинарии [8]. В работе [9] изучена возможность использования сточных вод пищевого производства, богатых биоорганическими соединениями, в качестве питательных сред для культивирования микроводорослей, при этом параллельно происходит очистка стоков. Это позволило объединить технологии биологической очистки водных ресурсов и накопления биомассы микроводорослей.

Работы [10–12] посвящены механизмам и закономерностям процесса очистки вод от ионов железа общего с использованием растительного сорбционного материала на основе листового опада различных пород деревьев: березы повислой (*Betula pendula*), дуба черешчатого (*Quercus robur*), а также смешанных пород деревьев.

Цель данной работы — изучение сорбционных свойств остаточной биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana* после извлечения из них липидов для очистки сточных вод от ионов железа и разработка способа утилизации отработанных сорбентов в качестве дополнительного топлива.

Для синтеза биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana* (*C. Sorokiniana*) спроектирован и изготовлен из оргстекла фотобиореактор (ФБР) (рис. 1) конусообразной формы объемом 100 л с аэрацией в нижней части, что обеспечивает перемешивание суспензии, с датчиками контроля pH-среды и температуры [13]. Ширина ФБР составляет 10 см, для освещения используются лампы дневного света модели OSRAM DULUX S 11W/21-840 с интенсивностью освещенно-

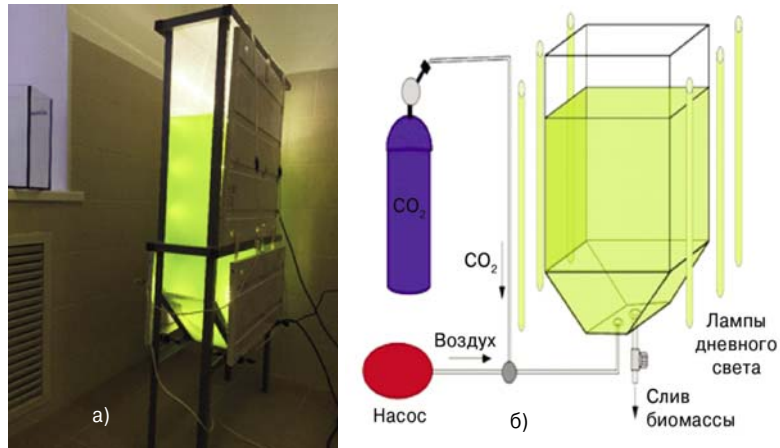


Рис. 1. Пилотный фотобиореактор для культивирования биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana*:

a – внешний вид; *б* – схема

Fig. 1. Pilot photobioreactor for the cultivation of microalgae biomass *Chlorella sorokiniana*:

a – appearance; *b* – scheme

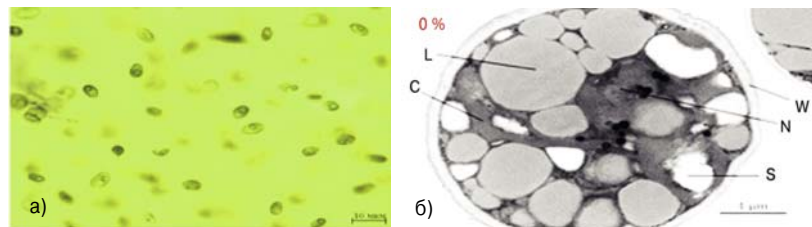


Рис. 2. Результаты микроструктурных исследований микроводорослей *Chlorella sorokiniana*:

L – липидные капли; S – крахмальные гранулы; C – хлоропласт; N – ядрышко; W – клеточная оболочка

Fig. 2. The results of microstructural studies of microalgae *Chlorella sorokiniana*:

L – lipid drops; S – starch granules; C – chloroplast; N – nucleolus; W – cell wall

сти 2200–2800 Лк. Основные условия для высокоскоростного культивирования микроводорослей приведены в работе [14].

Были проведены микроструктурные исследования микроводорослей *Chlorella sorokiniana* (рис. 2), которые показали наличие толстой клеточной стенки (липидной оболочки). Из литературы известно, что хлорелла содержит, %:

белок — 55; липиды — 12; углеводы — 25; зола — 8.

Из культивированной биомассы методом экстракции были выделены липидные фракции, которые нашли дальнейшее применение как биологически активная добавка с содержанием ОМЕГА-3 и как сырье для получения биотоплива. После выделения липидной фракции [15] из биомассы микроводорос-

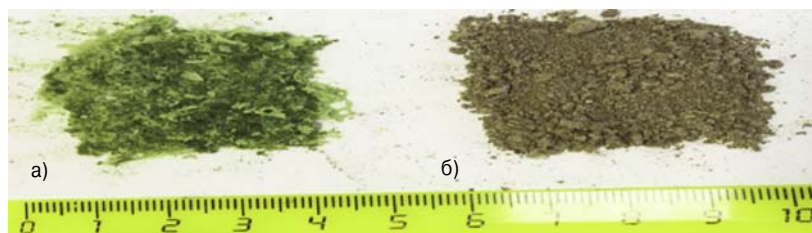


Рис. 3. Внешний вид биомассы микроводорослей *Chlorella sorokiniana*:

a – исходная; *б* – остаточная, после извлечения липидов

Fig. 3. The appearance of the biomass of microalgae *Chlorella sorokiniana*:

a – initial; *b* – residual, after lipid extraction

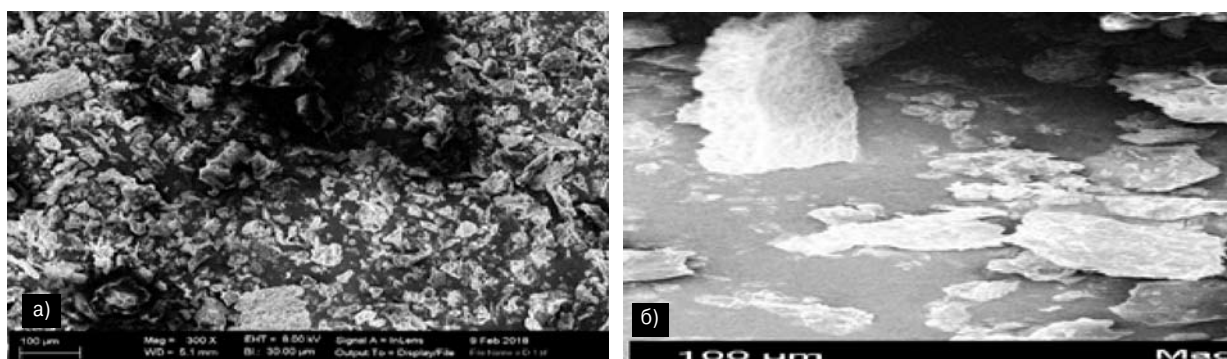


Рис. 4. Микроструктура поверхности остаточной биомассы микроводорослей *C. Sorokiniana* после выделения липидов:
 а – х300; б – х500

Fig. 4. The microstructure of the surface of the residual biomass of *C. Sorokiniana* microalgae after lipid extraction:
 а – х300; б – х500

лей *Chlorella sorokiniana* образуется отход (остаточная биомасса). Из литературных данных [14] известно, что исходная биомасса микроводорослей содержит помимо липидов и пигментов целлюлозу (23,5%), крахмал, а также гемицеллюлозы, хитино- и пектиноподобные вещества, которые остаются в остаточной биомассе и обуславливают её сорбционные свойства. Внешний вид исходной и остаточной биомассы представлен на рис. 3

Из рис. 3 видно, что остаточная биомасса представляет мелкодисперсный порошок серо-зеленого цвета. На растровом электронном микроскопе марки Zeiss Leo 1530 был проведен микроструктурный анализ остаточной биомассы (рис. 4), который показал на-

личие рыхлой поверхности из разрушенных клеток микроводорослей (рис. 4, а). При увеличении разрушенных фрагментов наблюдается пористая поверхность клеточной оболочки (рис. 4, б), следовательно, мы предполагаем, что остаточная биомасса должна обладать сорбционными свойствами и ее можно использовать для очистки сточных вод. Схема образования и использования остаточной биомассы представлена на рис. 5.

Наличие пористой поверхности остаточной биомассы позволяет предположить механизм физической сорбции ионов тяжелых металлов в поры материала. Хемосорбционные процессы извлечения ионов тяжелых металлов возможны при наличии функцио-

нальных групп. Для этого проводилась регистрация ИК-спектров исходной и остаточной биомассы (рис. 6) с помощью ИК-Фурье спектрометра ФСМ 1201. Принцип действия прибора основан на регистрации спектра во времени по волновым числам. В качестве образца сравнения использовали таблетку КВг, полученную путем прессования кристаллического порошка при вакуумной откачке. Образцы получали путем прессования смеси исследуемого (5 мг) порошка и КВг. Общая масса таблетки с исследуемым образцом 300 мг. Полученные результаты ИК-спектров, характерные для исходной и остаточной биомассы хлореллы, представлены в табл. 1.

Из рис. 6 и табл. 1 видно, что валентные колебания –ОН групп, которые могут участвовать в хемосорбционных процессах, обнаружены и для исходной, и для остаточной биомассы. Поэтому извлечение ионов тяжелых металлов может протекать за счет процессов физической и химической сорбции.

Для изучения сорбционных свойств остаточной биомассы проводили статическую сорбцию. Для этого остаточную биомассу в количестве 20 г/л добавляли в модельные растворы, содержащие ионы железа(III) с различной начальной концентрацией (табл. 2), и проводили процесс сорбции в течении 24 ч. Первые 2 ч – с

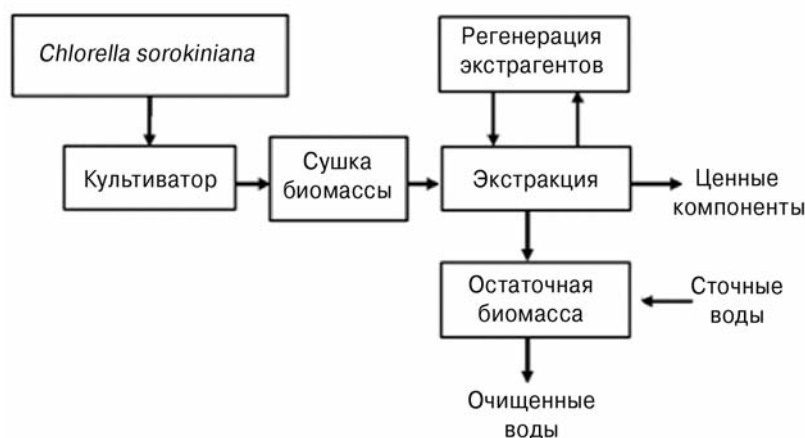


Рис. 5. Схема образования остаточной биомассы после экстракции ценных компонентов из *Chlorella sorokiniana* и использование её для очистки сточных вод

Fig. 5. Scheme of the formation of residual biomass after extraction of valuable components from *Chlorella sorokiniana* and its use for wastewater treatment

использованием шейкера OS-20 фирмы BIOSAN при скорости встряхивания 150 об/мин, а затем оставляли остаточную биомассу в модельном растворе в статических условиях на 22 ч. Значение pH раствора составляло 4, при постоянном перемешивании и термостатировании в интервале температур 293 ± 2 К. Затем модельные растворы отфильтровывали и анализировали остаточное содержание ионов железа спектрофотометрическим методом по методике (ПНД Ф 14.1:2.4.50-96) на многоцелевом спектрофотометре UV-1280 фирмы "SHIMADZU". По начальным и конечным концентрациям были рассчитаны эффективность очистки (\mathcal{E} , %) модельных вод от ионов железа и сорбционная емкость (A , мг/г) (см. табл. 2).

Из табл. 2 видно, что при небольших концентрациях эффективность очистки высокая и составляет 90 %.

Для оценки сорбционных свойств остаточной биомассы микроводорослей *C. Sorokiniana* в динамическом режиме был создан модельный фильтр, где в качестве фильтрующей загрузки использовали остаточную биомассу микроводорослей *C. Sorokiniana*. Высота фильтра $h = 35$ мм, диаметр фильтра $d = 15$ мм, скорость фильтрации 7,5 мл/мин. По конечным $C_{\text{кон}}$ и начальным $C_{\text{нач}}$ концентрациям рассчитаны эффективности очистки модельных сточных вод (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что эффективность очистки при небольших значениях начальных концентраций высокая, как и в случае статической сорбции — до 90 %. При высоких концентрациях эффективность очистки снижается до 32 %.

На рис. 7 представлены сравнительные данные по эффективности очистки в статических и динамических условиях. Из рис. 8 видно, что динамическая сорбция при малых концентрациях эффективней, что связано с неболь-

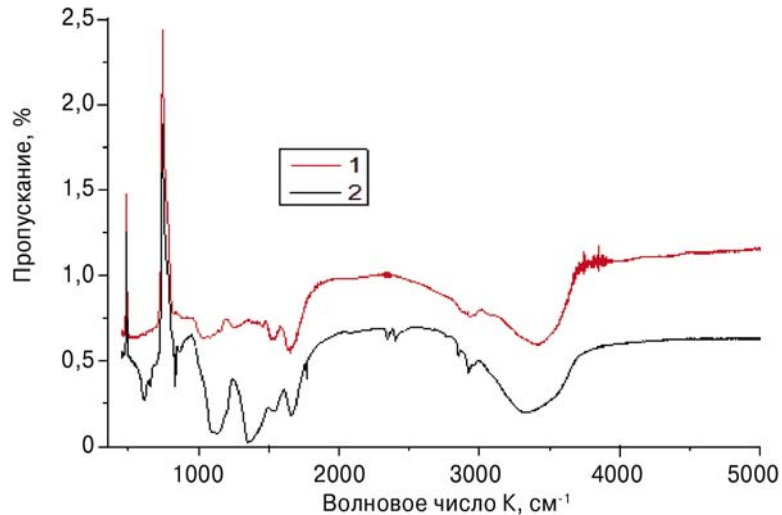


Рис. 6. ИК-спектры, снятые на остаточной (1) и исходной (2) биомассе микроводорослей *C. Sorokiniana*

Fig. 6. IR spectra taken on the residual (1) and initial (2) biomass of microalgae *C. Sorokiniana*

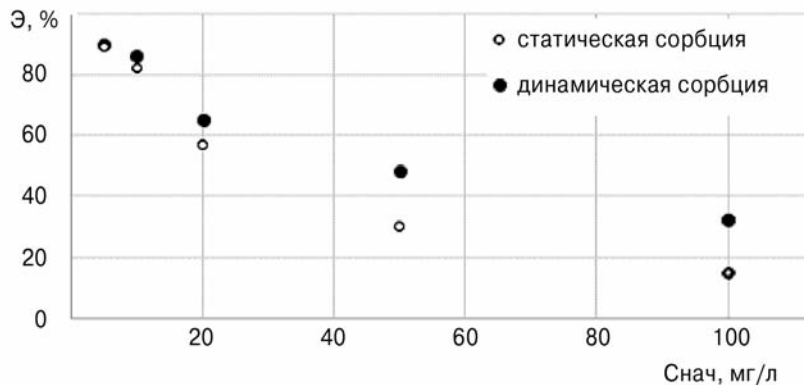


Рис. 7. Эффективность очистки \mathcal{E} модельных сточных вод от ионов железа остаточной биомассой микроводорослей *C. Sorokiniana* в статических и динамических условиях

Fig. 7. Efficiency of purification \mathcal{E} of model wastewater from iron ions by the residual biomass of *C. Sorokiniana* microalgae under static and dynamic conditions

Таблица 1. Спектры, характерные для биомассы хлореллы

Table 1. Spectra characteristic of chlorella biomass

k , cm^{-1}	Интерпретация
3539	Валентные колебания –ОН групп
3323	
2961	Валентные колебания С-Н связи
2925	Валентные колебания С-Н связи в CH_2 антисимметричное
2852	Валентные колебания С-Н связи в CH_2 симметричное
1659	Валентные колебания С=О, сопряженные с ароматическим кольцом
1651	
1528	Скелетные колебания ароматического кольца
1352	Деформационные колебания С-Н связей
1135	Плоскостные деформационные колебания ароматических связей С-Н
863	Внеплоскостные деформационные колебания С-Н связей в ароматическом кольце
834	

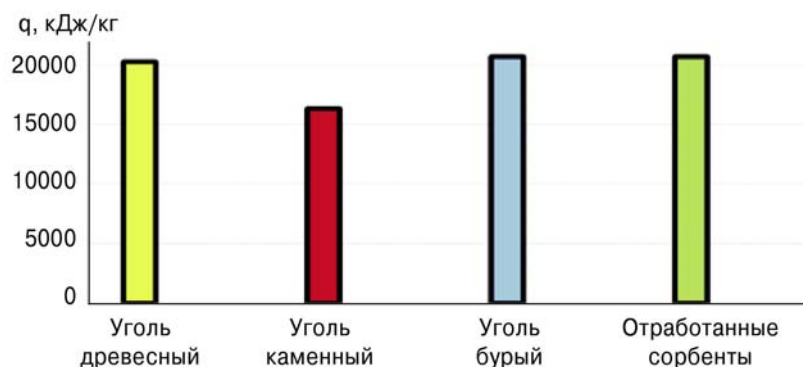


Рис. 8. Удельная теплота сгорания q отработанных сорбентов из остаточной биомассы микроводорослей *C. Sorokiniana* и традиционных энергоносителей

Fig. 8. Specific heat of combustion q of spent sorbents from the residual biomass of *C. Sorokiniana* microalgae and traditional energy sources

Таблица 2. Эффективность очистки E модельных сточных вод от Fe^{+3} остаточной биомассой микроводорослей *C. Sorokiniana* при статической сорбции и сорбционная емкость A

Table 2. Purification efficiency E of model wastewater from Fe^{+3} with residual biomass of *C. Sorokiniana* microalgae during static sorption and sorption capacity A

$C_{нач}$, мг/л	$C_{кон}$, мг/л	E , %	A , мг/г
5	0,5±0,03	90±0,6	0,22
10	1,6±0,07	84±1,4	0,43
20	8,6±0,09	57±1,8	0,63
50	35±0,22	30±0,6	1,3
100	85±0,45	15±0,6	1,6

Таблица 3. Эффективность очистки E модельных сточных вод от Fe^{+3} при динамической сорбции через модельный фильтр с фильтрующей загрузкой из остаточной биомассы микроводорослей *C. Sorokiniana*

Table 3. Efficiency of purification E of model wastewater from Fe^{+3} during dynamic sorption through a model filter with a filtering load from the residual biomass of microalga *C. Sorokiniana*

$C_{нач}$, мг/л	$C_{кон}$, мг/л	E , %
5	0,51	90
10	1,4	86
20	7,4	63
50	24	48
100	68	32

шим объемом сточных вод при контакте с остаточной биомассой.

После очистки вод образуется отход — отработанные сорбенты. Процесс регенерации отработанных сорбентов небезопасен и экономически нецелесообразен, так как для регенерации необходимо использовать промывку кислотным раствором. Поэтому нами была изучена возможность использования отработанных

сорбентов в качестве дополнительного топлива. С использованием калориметра ИКА С 5000 определена удельная теплота сгорания (q , кДж/кг) отработанных сорбентов из остаточной биомассы микроводорослей *C. Sorokiniana* после очистки сточных вод от ионов железа, которая составила 20 674 кДж/кг. При сравнении данной величины q и традиционных энергоносителей (рис. 8) видно, что по-

следние не уступают классическим видам топлива — каменным и древесным углям. В результате проведенного анализа можно рекомендовать использование отработанных сорбентов в качестве дополнительного топлива.

Из приведенного выше можно сделать следующие выводы.

1. Изучена возможность использования остаточной биомассы микроводорослей *C. Sorokiniana* в качестве сорбента для очистки сточных вод от ионов железа(III) и показано, что эффективность очистки при небольших значениях начальных концентраций высокая как для динамической, так и для статической сорбции и достигает 90 %.

2. Проведенные микроструктурные исследования поверхности остаточной биомассы микроводорослей *C. Sorokiniana* свидетельствуют о наличии пористой поверхности остаточной биомассы, что позволяет предположить механизм физической сорбции ионов тяжелых металлов в поры материала.

3. Снятые ИК-спектры на исходной и остаточной биомассе микроводорослей *C. Sorokiniana* показали наличие валентных колебаний —ОН групп, что говорит о возможности протекания хемосорбционных процессов. Поэтому извлечение ионов тяжелых металлов из вод остаточной биомассой микроводорослей *C. Sorokiniana* может протекать за счет процессов физической и химической сорбции.

4. Предложена утилизация отработанных сорбентов в качестве дополнительного топлива. Определена удельная теплота сгорания ($q = 20\ 674$ кДж/кг) отработанных сорбентов из остаточной биомассы микроводорослей *C. Sorokiniana*, которая по своим значениям не уступает классическим видам топлива — каменным и древесным углям.

Исследования проводились в рамках реализации федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" по теме проекта: "Разработка и внедрение инновационных биотехнологий переработки микроводорослей *Chlorella sorokiniana* и ряски *Lemna minor*" (соглашение № 14.587.21.0038 от 17 июля 2017 г.). Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58717X0038.

Литература

1. Коммонер Б. Замыкающийся круг. М., Гидрометеоиздат, 1974. 280 с.
2. Валиев Р.Ш., Ольшанская Л.Н. Некоторые физиологические аспекты фитоэкстракции тяжелых металлов. Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. № 1. С. 30–35.
3. Ольшанская Л.Н., Собгайда Н.А., Валиев Р.Ш. Извлечение тяжелых металлов из загрязненных стоков с использованием адсорбентов и фитосорбентов. Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 11. С. 18–23.
4. Стоянов А.В., Собгайда Н.А., Ольшанская Л.Н. Влияние лазерного излучения на процессы фиторемедиации меди из сточных вод эйхорний. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 6. С. 38–41.
5. Ольшанская Л.Н., Собгайда Н.А., Тарушкина Ю.А., Стоянов А.В. Влияние магнитного поля на процессы извлечения тяжелых металлов из сточных вод рясковой. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 8. С. 41–43.
6. Горбунов О. Водоросли против водорослей. Изобретатель и рационализатор. 2012. № 12. С. 9.
7. Gupta S.K., Ansari F.A., Shrivastav A. et al. Dual role of *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus obliquus* for comprehensive wastewater treatment and biomass production for bio-fuels. Journal of Cleaner Production. 2016. V. 115. P. 255–264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.040>.
8. Petrovič A., Simonič M. Removal of heavy metal ions from drinking water by alginate-immobilised *Chlorella sorokiniana*. International Journal of Environmental Science Technology. 2016. V. 13. Iss. 7. P. 1761–1780.
9. Мамедова Т.Т. Различные подходы к накоплению биомассы водорослей *Chlorella vulgaris* и процессам ее биокаталитической трансформации. Дисс. ... канд. хим. наук. М., 2015. 176 с.
10. Alekseeva A.A., Fazullin D.D., Kharlyamov D.A., Mavrin G.V., Stepanova S.V., Shaikhiyev I.G., Shaimardanova A.S. The use of leaves of different tree species as a sorption material for extraction of heavy metal ions from aqueous media. International Journal Of Pharmacy & Technology. 2016. Vol. 8 No. 2. P. 14375–14391.
11. Шаймарданова А.Ш., Степанова С.В. Использование химических реагентов для увеличения сорбционной емкости листового опада по отношению к ионам железа (II). Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 3. С. 31–35.
12. Шаймарданова А.Ш., Степанова С.В., Шайхив И.Г. Физико-химические основы удаления ионов железа из модельных растворов березовым опадом. Вода: химия и экология. 2016. № 1. С. 53–59.
13. Смятская Ю.А., Политаева Н.А., Собгайда В.С. Фотобиореакторы для культивирования микроводоросли *Chlorella sorokiniana*. Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 2. С. 224–227.
14. Политаева Н.А., Смятская Ю.А., Кузнецова Т.А., Ольшанская Л.Н., Валиев Р.Ш. Культивирование и использование микроводорослей *Chlorella* и высших водных растений ряска *Lemna*. Саратов, ИЦ "Наука", 2017. 125 с.
15. Politaeva N.A., Kuznetsova T.A., Smyatskaya Y.A., Trukhina E.V., Atamanyuk I. Energy Production from *Chlorella* Algae Biomass Under St. Petersburg Climatic Conditions. Chemical and Petroleum Engineering. 2018. 53. P. 801–805.

References

1. Kommoner B. Zamykayushchiysya krug. M., Gidrometeoizdat, 1974. 280 s.
2. Valiev R.Sh., Ol'shanskaya L.N. Nekotorye fiziologicheskie aspekty fitoekstratsii tyazhelykh metallov. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. 2016. T. 59. № 1. S. 30–35.
3. Ol'shanskaya L.N., Sobgaida N.A., Valiev R.Sh. Izvlechenie tyazhelykh metallov iz zagryaznennykh stokov s ispol'zovaniem adsorbentov i fitosorbentov. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2015. T. 19. № 11. S. 18–23.
4. Stoyanov A.V., Sobgaida N.A., Ol'shanskaya L.N. Vliyaniye lazernogo izlucheniya na protsessy fitoremediatsii medi iz stochnykh vod eikhorniei. Khimicheskoe i neftegazovoye mashinostroeniye. 2010. № 6. C. 38–41.
5. Ol'shanskaya L.N., Sobgaida N.A., Tarushkina Yu.A., Stoyanov A.V. Vliyaniye magnitnogo polya na protsessy izvlecheniya tyazhelykh metallov iz stochnykh vod ryaskoi. Khimicheskoe i neftegazovoye mashinostroeniye. 2008. № 8. C. 41–43.
6. Gorbunov O. Vodorosli protiv vodoroslei. Izobretatel' i ratsionalizator. 2012. № 12. S. 9.
7. Gupta S.K., Ansari F.A., Shrivastav A. et al. Dual role of *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus obliquus* for comprehensive wastewater treatment and biomass production for bio-fuels. Journal of Cleaner Production. 2016. V. 115. P. 255–264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.040>.
8. Petrovič A., Simonič M. Removal of heavy metal ions from drinking water by alginate-immobilised *Chlorella sorokiniana*. International Journal of Environmental Science Technology. 2016. V. 13. Iss. 7. P. 1761–1780.
9. Mamedova T.T. Razlichnyye podkhody k nakopleniyu biomassy vodoroslei *Chlorella vulgaris* i protsessam ee biokataliticheskoi transformatsii. Diss. ... kand. khim. nauk. M., 2015. 176 s.
10. Alekseeva A.A., Fazullin D.D., Kharlyamov D.A., Mavrin G.V., Stepanova S.V., Shaikhiyev I.G., Shaimardanova A.S. The use of leaves of different tree species as a sorption material for extraction of heavy metal ions from aqueous media. International Journal Of Pharmacy & Technology. 2016. Vol. 8 No. 2. P. 14375–14391.
11. Shaimardanova A.Sh., Stepanova S.V. Ispol'zovanie khimicheskikh reagentov dlya uvelicheniya sorbtionnoi emkosti listovogo opada po otnosheniyu k ionam zheleza (II). Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN. 2015. № 3. S. 31–35.
12. Shaimardanova A.Sh., Stepanova S.V., Shaikhiyev I.G. Fiziko-khimicheskie osnovy udaleniya ionov zheleza iz model'nykh rastvorov berezovym opadom. Voda: khimiya i ekologiya. 2016. № 1. S. 53–59.
13. Smyatskaya Yu.A., Politaeva N.A., Sobgaida V.S. Fotobioreaktory dlya kul'tivirovaniya mikrovodorosli *Chlorella sorokiniana*. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2018. T. 21. № 2. S. 224–227.
14. Politaeva N.A., Smyatskaya Yu.A., Kuznetsova T.A., Ol'shanskaya L.N., Valiev R.Sh. Kul'tivirovaniye i ispol'zovaniye mikrovodoroslei *Chlorella* i vysshikh vodnykh rastenii ryaska *Lemna*. Saratov, ITs "Nauka", 2017. 125 s.
15. Politaeva N.A., Kuznetsova T.A., Smyatskaya Y.A., Trukhina E.V., Atamanyuk I. Energy Production from *Chlorella* Algae Biomass Under St. Petersburg Climatic Conditions. Chemical and Petroleum Engineering. 2018. 53. P. 801–805.

Ю.А. Смятская – канд. техн. наук, ведущий специалист, докторант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 194021 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29 • А.А. Фазуллина – аспирант, зав. лабораторией, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015 Россия, г. Казань, ул. К. Маркса 68 • Н.А. Политаева – д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 194021 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, e-mail: Politaevana1971@gmail.com • А.Н. Чусов – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой • А.А. Безбородов – канд. техн. наук, доцент

Yu.A. Smyatskaya – Cand. Sci. (Eng.), Leading Specialist, Doctoral Candidate, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 194021 Russia, Petersburg, Polytechnicheskaya Str. 29 • A.A. Fazullina – Post-graduate Student, Head of Laboratory, Kazan National Research Technological University, 420015 Russia, Kazan, Karl Marx Str. 68 • N.A. Politaeva – Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Scientist, Professor, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 194021 Russia, Petersburg, Polytechnicheskaya Str. 29, e-mail: Politaevana1971@gmail.com • A.N. Chusov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department • A.A. Bezborodov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor