

УДК 628.15

**А. В. Игнатенко**

Белорусский государственный технологический университет

**СВЧ-ОБЕЗВОЖИВАНИЕ И ДЕТОКСИКАЦИЯ  
ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД**

В работе рассмотрены достоинства и недостатки используемых методов обезвоживания осадков сточных вод городских очистных сооружений и возможность их устранения путем применения СВЧ-обработки. Цель работы – анализ безреагентного СВЧ-способа обработки осадков сточных вод. Изучена кинетика изменения влажности, температуры иловых осадков сточных вод в зависимости от мощности, времени СВЧ-обработки и начальной влажности осадков. Показано, что СВЧ-воздействие на иловые осадки сточных вод носит комплексный характер и позволяет одновременно быстро снизить уровень их влажности с 99 до 75%, обеспечить температуру пастеризации 60–80°C, провести детоксикацию осадков и снизить уровень их токсичности в 3–4 раза. Применение СВЧ-обработки иловых осадков позволяет отказаться от использования центрифугирования и коагулянт-флокулянтов при обезвоживании осадков и повысить их безопасность для окружающей среды и практического использования в качестве удобрений.

**Ключевые слова:** сточные воды, осадки, седиментация, обезвоживание, коагулянт-флокулянты, центрифугирование, обеззараживание, водные вытяжки, биотестирование, токсичность, детоксикация.

**Для цитирования:** Игнатенко А. В. СВЧ-обезвоживание и детоксикация осадков сточных вод // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 115–120.

**A. V. Ignatenko**

Belarusian State Technological University

**MICROWAVE DEWATERING AND DETOXIFICATION OF SEWAGE SLUDGE**

The paper considers the advantages and disadvantages of the methods used for dewatering sewage sludge from urban wastewater treatment plants, and the possibility of eliminating them by using microwave treatment of precipitates. The aim of the work is to analyze the reagent-free microwave method of sewage sludge treatment. The kinetics of changes in the humidity and temperature of sewage sludge wastewater precipitates depending on the power, time of microwave treatment and the initial humidity of sewage sludge is studied. It is shown that the microwave effect on the sewage sludge of wastewater is complex and can simultaneously and quickly reduce the level of their humidity from 99 to 75%, provide pasteurization temperature 60–80°C and carry out detoxification of sewage sludge and decrease their index of toxicity in 3–4 times. The application of microwave treatment of sewage sludge makes it possible to abandon the use of centrifugation and coagulant flocculants in the dewatering of sediments and to increase the safety of sewage sludge for environment and for practical use as fertilizers.

**Key words:** sewage, sludge, sedimentation, dewatering, coagulant-flocculants, centrifugation, aquatic extracts, biotesting, toxicity, detoxification.

**For citation:** Ignatenko A. V. Microwave dewatering and detoxification of sewage sludge. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 115–120 (In Russian).

**Введение.** Снижение уровня антропогенного воздействия человека на окружающую среду и обеспечение ее безопасности для живых организмов является одной из актуальных эколого-биотехнологических задач.

Ежегодно на городских очистных сооружениях образуются сырые осадки сточных вод в количестве порядка 1% от объема вод, поступающих на очистку.

Содержание незагрязненных иловых осадков сточных вод (ОСВ), которые можно использовать в Республике Беларусь для практического применения без обработки не превышает 10%, остальные осадки загрязнены токсичными веществами.

Полученные осадки в основном не перерабатываются и в виду их токсичности транспортируются к местам депонирования на значительные расстояния от городских очистных сооружений,

где они хранятся на иловых площадках в течение 20–30 лет, медленно разлагаясь. Проблема детоксикации осадков сточных вод, таким образом, перекладывается на природу и будущие поколения населения.

В настоящее время общий объем накопленных иловых осадков сточных вод в РБ превышает 9 млн т [1].

Для уменьшения объема ОСВ и снижения расходов на их транспортировку сырые осадки подвергаются обезвоживанию. Наряду с естественной сушкой для обезвоживания ОСВ применяются гравитационное уплотнение, вакуум-фильтрование, центрифугирование, а также фильтр-прессование, термосушка, сжигание.

На практике наиболее широкое применение получило центрифугирование на осадительных шнековых центрифугах. Каждая из центрифуг марки ОГШ-631 К2 работает по 24 ч в сутки, обрабатывает 20–40 м<sup>3</sup>/ч осадков и производит кек с влажностью 75% [2].

Поскольку иловые ОСВ обладают высокой влагоудерживающей способностью, для ее снижения при центрифугировании дополнительно применяют коагулянт-флокулянты [3].

К основным недостаткам реагентно-центрифужного способа обезвоживания ОСВ относится использование дорогостоящего центрифужного оборудования стоимостью порядка 150 000–250 000 евро, высокие энергозатраты на обезвоживание (30–35 квт·ч/т) и потребление синтетических анион-катионных коагулянт-флокулянтов, расход которых может составлять десятки тонн в год.

Воздействовать на водоотдающие свойства осадков можно не только с помощью химических реагентов, но и путем физической безреагентной обработки, например, сверхвысокочастотным электромагнитным полем (СВЧ).

СВЧ-обработка уже несколько десятилетий используется в быту для приготовления пищи, размораживания продуктов, получает все более широкое применение в народном хозяйстве для высушивания пищевых продуктов [4], древесины [5], обеззараживания медицинских отходов [6] и в других областях [7, 8]. Однако для обработки осадков сточных вод этот способ еще находится на стадии лабораторного исследования [9].

**Основная часть.** Цель работы – анализ безреагентного СВЧ-способа обработки осадков сточных вод.

В качестве образцов ОСВ использовали избыточный активный ил МОС-1, отобранный из илоуплотнителя, а также кек из цеха обезвоживания осадков.

Реагентами служили: коагулянт Floguat-4540; флокулянт Floram FO 4440 SH (производство SNF FLOERGER, Франция); полиакриламид и акриламид (Reanal, Венгрия).

СВЧ-обработку ОСВ массой 20–100 г и влажностью 95–99% проводили в бытовой СВЧ-печи Samsung CE935GR, работающей на частоте 2450 МГц. Мощность СВЧ-излучения изменяли от 300 до 900 Вт, время обработки – в интервале 0–600 с.

Температуру ОСВ после обработки регистрировали термометром с погрешностью 0,5°C.

Для определения содержания сухих веществ осадок высушивали до постоянной массы при 105°C в термостате в течение 2 ч. Массу удаленной влаги из ОСВ находили весовым методом. Относительную влажность осадков определяли по формуле

$$W = m_v / m_o \cdot 100 (\%), \quad (1)$$

где  $m_v$  – масса влаги в осадке, г;  $m_o$  – масса высушенного осадка, г.

Долю остаточной воды в ОСВ находили как

$$w = W / W_o \cdot 100 (\%), \quad (2)$$

где  $W$ ,  $W_o$  – текущая и начальная влажность соответственно, %.

Пробоподготовку ОСВ для биотестирования токсичности их вытяжек осуществляли, как описано ранее [10]. В качестве тест-объекта служила 3-суточная культура клеток микроводоросли *E. gracilis*, выращенная на свету при 20°C в среде Лозино-Лозинского.

Полученные результаты обрабатывали статистически, используя программное обеспечение Microsoft Excel.

Особенностью иловых осадков сточных вод является высокая влагоудерживающая способность ( $W = 99,2–99,7\%$ ), при этом влага может находиться в них в свободной, физико-механически, физико-химически и химически связанной формах [11].

Самым простым и дешевым способом удаления влаги является гравитационное уплотнение осадков в отстойниках и илоуплотнителях, где влажность осадка может снижаться до 97–98%, при длительности уплотнения до 2 ч (рис. 1).

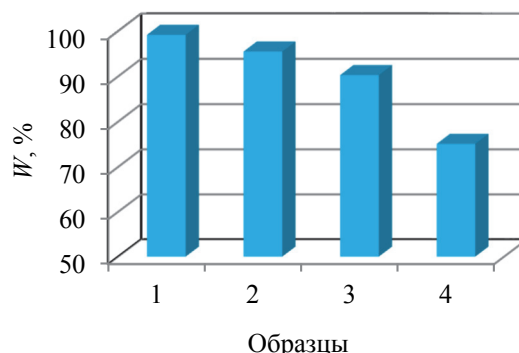


Рис. 1. Изменение влажности образцов ОСВ после: 1 – отстаивания (1 ч); 2 – отстаивания с коагулянт Floguat-4540 (0,1%); 3 – центрифугирования (2000 об./мин, 10 мин); 4 – центрифугирования с флокулянт Floram FO 4440 SH (0,1%)

Отстаивание с коагулянтом снижает влажность осадков до 95%. Центрифугирование позволяет усиливать взаимодействие частиц и снижать влажность ОСВ до 90%. Реагентно-центрифужная обработка активного ила флокулянтами снижает влажность осадков с 99 до 75% (рис. 1), а также повышает на порядок скорость осаждения частиц по сравнению с отстаиванием.

К недостаткам реагентно-центрифужного метода обезвоживания ОСВ относится дополнительное загрязнение иловых осадков синтетическими коагулянт-флокулянтами на основе полимеров акриламида, акрилата и их производных, которые медленно разлагаются в окружающей среде.

Полиакриламид считается экологически малоопасным веществом (ПДК = 2 мг/л), в то время как акриламид и продукты его превращения относят к опасным ксенобиотикам. Акриламид обладает канцерогенным, мутагенным и генотоксичным действием, его ПДК для водных объектов составляет 0,0001 мг/л [12].

На рис. 2 приведены результаты анализа токсичности акриламида для клеток *E. gracilis*.

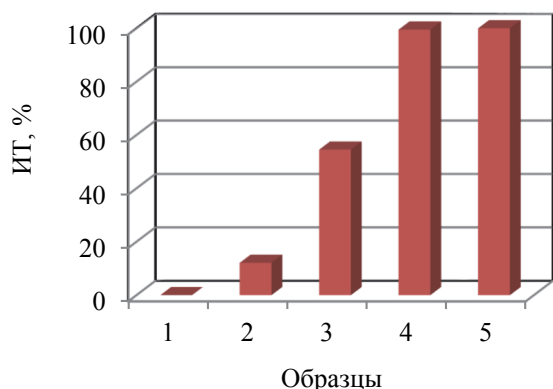


Рис. 2. Зависимость изменения индекса токсичности от концентрации водных растворов акриламида при действии на клетки *E. gracilis*:  
 1 – контрольная среда; 2 – 0,0001%;  
 3 – 0,0004%; 4 – 0,0008%; 5 – 0,0015%

Как видно из рис. 2, акриламид оказывает сильное токсичное действие на клетки микроводоросли *E. gracilis*. Это позволяет с помощью метода биотестирования быстро обнаруживать данное опасное вещество в водной среде или осадках в концентрациях, равных ПДК, не прибегая к сложным и дорогостоящим методам ВЭЖХ, масс-спектрометрии.

На гидратную оболочку молекул и влагоудерживающую способность осадков можно влиять как с помощью химических веществ (коагулянты, флокулянты), так и путем безреагентной СВЧ-обработки ОСВ.

На рис. 3 приведена кинетика обезвоживания иловых осадков сточных вод и влияние на нее СВЧ-мощности и начальной влажности осадков.

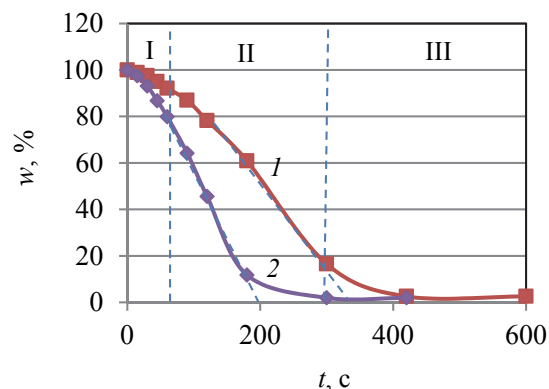


Рис. 3. Изменение остаточной доли воды в ОСВ при СВЧ-обработке:  
 1 –  $P = 300$  Вт ( $W_0 = 97,0\%$ );  
 2 –  $P = 600$  Вт ( $W_0 = 98,0\%$ )

Как видно из рис. 3, на кривой 1 наблюдаются три типичные для ОСВ области сушки:

I – участок медленного снижения влагосодержания, связанного с разогревом ОСВ;

II – область постоянной скорости сушки, связанной с удалением свободной влаги;

III – участок, характеризующий снижение скорости сушки и удаления более прочно связанной влаги.

Из рис. 3 (кривая 2) видно, что чем выше мощность СВЧ-обработки и исходная влажность ОСВ, тем больше скорость их обезвоживания, определяемая тангенсом угла наклона зависимости в области II.

Наблюдаемые изменения влажности ОСВ могут быть связаны с ростом их температуры при СВЧ-обработке (рис. 4).

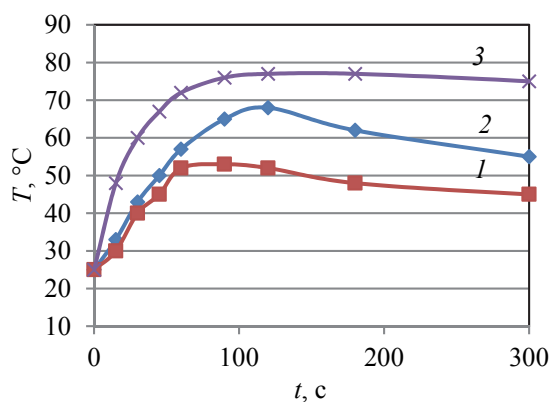


Рис. 4. Зависимость изменения температуры ОСВ от времени СВЧ-обработки:  
 1 –  $P = 300$  Вт ( $W_0 = 97,4\%$ );  
 2 –  $P = 300$  Вт ( $W_0 = 99,2\%$ );  
 3 –  $P = 600$  Вт ( $W_0 = 98,0\%$ )

Как видно из рис. 4, с увеличением продолжительности СВЧ-обработки температура ОСВ возрастает, достигает максимума и затем снижается. Она зависит от  $P$  обработки и  $W_0$  ОСВ.

Начальный рост температуры может быть описан экспоненциальной зависимостью изменения  $\Delta T$  от времени  $\tau$  и мощности СВЧ-излучения,  $P$ :

$$\Delta T = \Delta T_{\max} (1 - e^{-kP\tau}), \quad (3)$$

где  $\Delta T$ ,  $\Delta T_{\max}$  – текущее и максимальное изменение температуры соответственно;  $k$  – константа скорости разогрева, зависящая от влажности осадка.

Максимальный рост температуры достигается при увеличении мощности СВЧ-излучения и влажности осадков. Это связано с преимущественным поглощением микроволн водной компонентой ОСВ.

Поглощение СВЧ-энергии и преобразование ее в тепловые колебания молекул воды приводят к испарению свободной влаги и разрушению гидратных оболочек молекул, образованных связанной водой, что снижает влагоудерживающую способность ОСВ.

Особенностью СВЧ-воздействия на ОСВ по сравнению с другими тепловыми способами их обезвоживания является возможность быстрого разогрева осадков по всему объему, а также усиленный нагрев их изнутри, где влажность выше, чем в наружном слое.

Это способствует более сильному испарению воды внутри пор осадков, созданию градиента температур и формированию объемных потоков влаги и тепла, направленных изнутри осадков наружу. Вынос влаги приводит к обезвоживанию осадков, что согласуется с результатами [13].

Дальнейшее снижение температуры осадков при СВЧ-обработке, наблюдаемое на рис. 4, может быть обусловлено несколькими взаимосвязанными процессами.

Одной из причин может быть эффект Дарси, вызванный фильтрационными потоками внутренней влаги осадков, в результате чего она выносится наружу и уносит с собой часть энергии ОСВ.

Удаление свободной воды приводит с течением времени к снижению влагосодержания осадков, в результате чего уменьшается количество поглощаемой СВЧ-энергии, что приводит к падению скорости разогрева осадков.

В области спада температуры процессы термоизлучения нагретых ОСВ преобладают над процессами их СВЧ-разогрева, что приводит к снижению температуры ОСВ.

В таблице приведены значения температуры и влажности ОСВ в зависимости от мощности СВЧ-излучения при постоянном времени обработки – 1 мин.

#### Зависимость влажности и температуры ОСВ от мощности СВЧ-энергии

Режимы СВЧ-обработки		Характеристики ОСВ	
$P$ , Вт	$t$ , с	$T$ , °С	Влажность, %
0	0	20	99,0
300	60	60	95,8
600	60	72	85,0
900	60	80	75,0

Как видно из таблицы, при СВЧ-воздействии быстро снижается влажность ОСВ до значений, обеспечиваемых реагентно-центрифужным способом обезвоживания, и одновременно достигается температура их пастеризации 60–80°С. Это обеспечивает безреагентное обеззараживание ОСВ [14].

Увеличение температуры при СВЧ-обработке ОСВ также способствует протеканию процессов десорбции веществ с внутренней поверхности осадков, при этом наблюдается эффект детоксикации осадков, зависящий от мощности СВЧ-обработки (рис. 5).

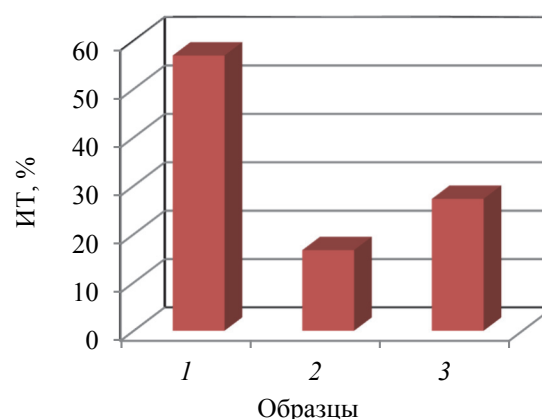


Рис. 5. Изменение индекса токсичности иловых осадков сточных вод после СВЧ-обработки ( $t = 1$  мин):

1 – контроль; 2 –  $P = 900$  Вт; 3 –  $P = 600$  Вт

Как видно из рис. 5, исходный индекс токсичности ОСВ – 56,9% снижается при СВЧ-обработке  $P = 900$  Вт в 3–4 раза и в 2,1 раза при  $P = 600$  Вт. Это согласуется с результатами [15].

Проведенное исследование указывает на комплексный характер действия СВЧ-излучения на ОСВ. СВЧ-обработка осадков позволяет быстро и одновременно проводить процессы их обезвоживания, обеззараживания, а также детоксикации (рис. 5), что имеет важное значение для дальнейшего безопасного практического использования иловых ОСВ в качестве удобрений.

**Заключение.** Обезвоживание – одна из важных стадий обработки ОСВ, необходимая для

замедления процессов их гниения, снижения объемов транспортировки осадков к местам их депонирования, высушивания с целью повышения их калорийности при сжигании.

Анализ реагентно-центрифужного способа обработки осадков, широко применяемого для их обезвоживания на городских очистных сооружениях, показал, что он обладает высокой эффективностью удаления влаги из осадков. Вместе с тем данный способ содержит ряд существенных недостатков, связанных с высокой стоимостью оборудования и его обслуживанием, необходимостью использования дорогостоящих импортных коагулянт-флокулянтов, наличием дополнительного загрязнения осадков ксенобиотиками, продукты распада которых обладают высокой токсичностью. Применение коагулянтов и флокулянтов загрязняет окружающую среду и не позволяет использовать ОСВ в качестве удобрений.

Одной из альтернатив реагентно-центрифужного способа обезвоживания ОСВ может быть применение безреагентной СВЧ-обработки

осадков. Использование СВЧ-энергии обеспечивает быстрый нагрев осадков по всему объему до температуры пастеризации и повышает их биологическую безопасность, а десорбция веществ и направленный вынос влаги при СВЧ-нагреве обеспечивают также безреагентную детоксикацию, удаление тяжелых металлов и других токсичных веществ из осадков сточных вод.

Комплексный характер действия СВЧ-энергии, включающий обезвоживание, обеззараживание и детоксикацию ОСВ, позволяет снизить общие затраты на обработку осадков, исключить расход синтетических коагулянт-флокулянтов и устранить дополнительное загрязнение осадков ксенобиотиками и токсичными веществами, образующимися в процессе распада синтетических органических полимеров, а также сократить длительность процесса обезвоживания и обработки осадков сточных вод. Это представляет интерес для защиты окружающей среды и безопасного использования иловых осадков в качестве органоминеральных удобрений.

#### Список литературы

1. Войтов И. В., Маркуль В. Н. Проблемы и основные направления совершенствования обращения с осадками очистных сооружений канализации в Республике Беларусь // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения: материалы Междунар. конференции, посвященной 145-летию УП «Минскводоканал», Минск, 13–14 февр. 2019 г.: в 2 ч. Минск, 2019. Ч. 2. С. 137–140.
2. Новикова О. К. Обработка осадков сточных вод. Гомель: БелГУТ, 2015. 96 с.
3. Полиакриламидные флокулянты / В. А. Мягченков [и др.]. Казань: Изд-во Каз. гос. технол. ун-та. 1998. 288 с.
4. Рогов И. А., Некрутман С. В. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. М.: Агропром, 1986. 351 с.
5. Гареев Ф. Х. Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины // ЛесПромИнформ. 2004. № 1. С. 50–52.
6. Использование электромагнитного излучения сверхвысокой частоты для обеззараживания инфицированных медицинских отходов: метод. рекомендации / Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. М., 2006. 12 с.
7. Klimarev S. I., Pyin V. K., Smireny A. L. Microwave Sterilizer of Potable Water in Stream // The 28-th International Conference on Environmental Systems. SAE Technical Paper Series. Denvers, Massachusetts, USA, July, 13–16, 1998. P. 1–6.
8. Климарев С. И. Перспективы использования электромагнитного поля сверхвысокой частоты для интенсификации технологических процессов при разработке физико-химических систем жизнеобеспечения нового поколения // Проблемы обитаемости в гермообъектах: материалы Всерос. конф. Москва, 4–8 июня 2001 г. / Рос. акад. наук. М., 2001. С. 87–89.
9. Гапоненков И. А., Федорова О. А. СВЧ-обработка осадков сточных вод пищевых производств // Вестн. МГТУ. 2013. Т. 16, № 4. С. 681–686.
10. Игнатенко А. В. Пробоподготовка и биотестирование токсичности иловых осадков сточных вод // Химическая безопасность, 2018. Т. 2, № 2. С. 251–271.
11. Карманов А. П., Полина И. Н. Технология очистки сточных. Сыктывкар: СЛИ, 2015. 208 с.
12. Chen Z., Afzal M. T., Salema A. A. Microwave drying of wastewater sewage sludge // J. Clean Energy Technology. 2014. Vol. 2, no. 2. P. 282–286.
13. Игнатенко А. В. Безреагентное обеззараживание и контроль биобезопасности осадков сточных вод // Труды БГТУ. 2017. № 1: Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. С. 102–105.
14. Microwave-induced heavy metal removal from dewatered biosolids for cost-effective composting / Simeng Li [et al.] // J. of Cleaner Production, 2019. 241: 118342.

## References

1. Voitov I. V., Martsul' V. N. Problems and main directions of improving the treatment of sediments of sewage treatment plants in the Republic of Belarus. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 145-letiyu UP "Minskvodokanal" "Sovremennyye tendentsii v razvitii vodosnabzheniya i vodootvedeniya"* [Materials of the International Conference dedicated to the 145th anniversary of UE "Minskvodokanal" "Modern trends in the development of water supply and sanitation": in 2 parts]. Minsk, 2019, part 2, pp. 137–140 (In Russian).
2. Novikova O. K. Treatment of sewage sludge. Gomel', BelGUT Publ., 2015. 96 p.
3. Myagchenkov V. A., Baran A. A., Bekturov E. A., Bulidorova G. V. *Poliakrilamidnyye flokulyanty* [Polyacrylamide flocculants]. Kazan, KGTU Publ., 1998. 288 p.
4. Rogov I. A., Nekrutman S. V. *Sverchvysokochastotnyy nagrev pishchevykh produktov* [Ultra-high-frequency heating of food products]. Moscow, Agroprom Publ., 1986. 351 p.
5. Gareev F. Kh. Problems and prospects of microwave drying of wood. *LesPromInform* [LesPromInform], 2004, no. 1, pp. 50–52 (In Russian).
6. *Ispol'zovaniye elektromagnitnogo izlucheniya sverkhvysokoy chastoty dlya obezzarazhivaniya infitsirovannykh meditsynskikh otkhodov: metodicheskiye rekomendatsii* [The use of electromagnetic radiation of ultra-high frequency for disinfection of infected medical waste: methodological recommendations]. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2006. 12 p.
7. Klimarev S. I., Ilyin V. K., Smirenyy A. L. Microwave Sterilizer of Potable Water in Stream. *The 28th International Conference on Environmental Systems. SAE Technical Paper Series*, Denvers, Massachusetts, USA, 1998, pp. 1–6.
8. Klimarev S. I. Prospects of using the ultrahigh frequency electromagnetic field for the intensification of technological processes in the development of physico-chemical life support systems of a new generation. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii "Problemy obitaemosti v germoob'yektakh"* [Materials of the All-Russian Conference "Problems of habitability in hermetic objects"]. Moscow, 2001, pp. 87–89 (In Russian).
9. Gaponenkov I. A., Fedorova O. A. Microwave treatment of sewage sludge from food production. *Vestnik MGTU* [Bulletin of the MSTU], 2013, vol. 16, no. 4, pp. 681–686 (In Russian).
10. Ignatenko A. V. Sample preparation and bioassay of the toxicity of sludge wastewater. *Khimicheskaya bezopasnost'* [Chemical safety], 2018, vol. 2, no. 2, pp. 251–271 (In Russian).
11. Karmanov A. P., Polina I. N. *Tekhnologiya ochistki stochnykh vod* [Technology of wastewater treatment]. Syktyvkar, SLI Publ., 2015. 208 p.
12. Chen Z., Afzal M. T., Salema A. A. Microwave drying of wastewater sludge. *J. Clean Energy Technology*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 282–286.
13. Ignatenko A. V. Reagent-free disinfection and biosafety control of sewage sludge. *Trudy BGTU* [Proceedings of BGTU], 2017, no. 1: Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology, pp. 102–105 (In Russian).
14. Simeng Li, Runwei Li, Youneng Tang, Gang Chen. Microwave-induced heavy metal removal from dewatered biosolids for cost-effective composting. *J. of Cleaner Production*, 2019, 241: 118342.

## Информация об авторе

**Игнатенко Аркадий Васильевич** – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ignatenko\_av@tut.by

## Information about the author

**Ignatenko Arkadiy Vasil'yevich** – PhD (Biology), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Biotechnology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatenko\_av@tut.by

Поступила 29.04.2021