



УДК 628.38

А. А. ВЕКШИН, магистрант кафедры водоснабжения и водоподготовки;
Е. В. РАССОХИНА, магистрант кафедры водоснабжения и водоподготовки;
М. Ю. ДЯГЕЛЕВ, канд. техн. наук, доц. кафедры водоснабжения и водоподготовки;
В. Г. ИСАКОВ, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой водоснабжения и водоподготовки

СЖИГАНИЕ ОСАДКА КАК БЕЗОТХОДНЫЙ СПОСОБ УТИЛИЗАЦИИ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД

ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова»

Россия, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7. Тел.: (3412) 77-60-55 доб. 3270;
эл. почта: m.yu.dyagelev@istu.ru

Ключевые слова: осадок сточных вод, сжигание осадка, моносжигание, пиролиз.

Рассматривается метод утилизации осадка сточных вод – сжигание. Наибольшее распространение получил процесс сжигания в псевдооживленном слое песка, преимуществами которого является отсутствие механических движущихся частей.

Одной из основных задач практически любого сооружения очистки городских сточных вод – это утилизация осадка городских сточных вод. К сожалению, в большинстве водоканалов России эта задача решается неудовлетворительно. Причиной этому являются законодательные нормы, создающие почти непреодолимые препятствия для любых методов утилизации осадка. В результате этого подавляющая часть осадка (по документам) размещается на полигонах отходов либо складывается на территории существующих иловых площадок. Вывоз на полигоны ТБО требует значительных транспортных затрат, а также внесения платы за размещение отходов с длительным периодом эксплуатации, поскольку процесс биодegradации отхода является продолжительным во времени. Технология сжигания осадков сточных вод известна уже много десятилетий как рациональный метод решения проблемы утилизации осадка, сопровождающийся получением тепловой энергии. Но такие установки не распространены в большом количестве из-за экономических перспектив и законодательных норм.

В настоящее время утилизация осадков очистных сооружений бытовых сточных вод является серьезной проблемой. В мире активно функционируют системы водоснабжения, возникают сточные воды, при очистке которых только в России ежегодно образуется около 2 млн тонн осадков в пересчете на сухое вещество. Исходная влажность осадков 98 %, соответственно их масса составляет порядка 100 млн тонн [1]. Доля минерального вещества в осадке (зольность) составляет 30–35 %. В состав органической части осадков входят белково-, жиро- и углеводоподобные вещества. В сыром остатке преобладают жиры и углеводы, а в активном иле – белки (микроорганизмы) [1].

Управление осадком сточных вод (ОСВ) является глобальной проблемой из-за того, что очистные сооружения постоянно производят большое количество осадка. Многие исследования [2–9] сосредоточены на разработке и оптимизации



различных технологий обращения с ОСВ для экологически безвредной обработки или утилизации. Термическая обработка ОСВ вызывает все больший интерес, в частности в крупных городских районах с большим количеством осадка и там, где другие технологии обработки и утилизации могут быть затруднены из-за ограничений в площадях и других сопутствующих проблемах. Сжигание ОСВ, при котором сжигание происходит при высоких температурах с избытком кислорода, является хорошо зарекомендовавшей себя технологией и доказала свою эффективность во многих городах. Также появляются новые технологии термической обработки ОСВ, в которых используются технологии ограничения подачи кислорода или полное его отсутствие (пиролиз), а также есть различные данные по вариации температуры для термической обработки ОСВ.

Эти технологии имеют уникальные особенности. Сжигание может извлекать энергию из сгорания в виде электричества и тепла, в то время как газификация и пиролиз генерируют богатые энергией продукты, такие как смола и синтетический газ, которые потенциально могут быть очищены или использованы в качестве топлива. В результате пиролиза также образуется уголь, который потенциально можно использовать в качестве активированного угля. Например, *Ronda A., Gómez-Barea A., Haro P., Almeida V. F., Salinero J.* [10] обнаружили, что 35 % углерода присутствует в полукоксе после пиролиза ОСВ при 500 °С.

Помимо питательных веществ, таких как фосфор, азот, калий и гумусообразующая органика, осадок сточных вод содержит тяжелые металлы, органические остатки (например, фармацевтические остатки, гормонально активные вещества [11]), наноразмерные вещества, микропластик и различные возбудители. Если осадок сточных вод обрабатывается термически, т. е. сжигая, многие из этих веществ, в частности органика, разрушается.

Наиболее распространенная в России схема обработки осадков биологических очистных сооружений включает стабилизацию (окисление и частичную минерализацию органического вещества) осадков, уплотнение в отстойниках, обезвоживание на фильтр-прессах или центрифугах до влажности 70–80 % и складирование на полигонах [12–13]. Также, кроме механического обезвоживания, все еще остается широко применяемой технология обезвоживания осадка на иловых площадках. Существенный недостаток такой схемы в том, что складированный на полигонах и иловых площадках осадок никак не используется, места складирования занимают огромные территории и представляют угрозу в санитарном отношении из-за высокого содержания патогенных бактерий, вредных газов и опасных химических соединений [12].

Для решения данной проблемы в России и за рубежом разрабатываются и внедряются различные способы переработки и дальнейшего использования осадков городских сточных вод. Основными перспективными направлениями утилизации осадка являются сжигание, анаэробное сбраживание с получением биогаза, пиролиз и использование в сельском хозяйстве и рекультивации почв [1]. В данной работе авторы рассматривают такой метод утилизации осадка сточных вод, как сжигание.

Сжигание всегда было весьма дорогостоящим решением, доступным, в основном, для наиболее крупных станций в развитых странах. Эти установки применяются в основном за рубежом в странах Северной Европы, во Франции, Японии, США, в таких мегаполисах как Берлин, Мюнхен, Париж, Вена, Лондон, Манчестер и т. д. [12, 14–16].



По стоимости это один из наиболее дорогостоящих методов обработки осадка. В частности, это связано с тем, что оборудование для его реализации выпускается очень немногими компаниями, что способствует поддержанию высоких цен. Согласно Информационно-техническому справочнику по НДТ ИТС 10-2019, по имеющимся данным (по данным трех существующих объектов, включающих установки сушки, сжигания, а также сушки и сжигания совместно), стоимость по релевантному диапазону капитальных вложений установки по сжиганию для крупных станций в расчете на 1 м³/сут суточной производительности составляет 5–7 тыс. руб., что сопоставимо со стоимостью комплексной реконструкции самих очистных сооружений с переводом на технологию удаления азота и фосфора [12].

В ИТС 10-2019 приведен анализ доступности работ по внедрению НДТ, согласно которой соотношение стоимости работ с доходом от деятельности по очистке сточных оценивается в 2,3–3,6 объема годовой выручки предприятия и оценивается в 800 млн руб. необходимых инвестиций. Это делает данную технологию финансово недоступной для российских водоканалов без преимущественного участия внешних инвестиций.

Хорошей иллюстрацией все большего использования термического обезвреживания осадка является пример очистных сооружений Германии. Около двух третей осадка сточных вод в настоящее время обрабатывается термически в виде совместного или моносжигания, при этом только 24 % общего объема осадка сточных вод используется непосредственно в сельском хозяйстве. Также следует отметить, что после переработки осадок также используется для ландшафтного дизайна или рекультивации, которые в совокупности составляют около 12 % от общего объема удаления осадка сточных вод.

По данным Евростата [17], к термической утилизации осадков сточных вод перешли большинство стран ЕС: Нидерланды, Австрия, Бельгия, Польша, Турция, Чехия и т. д. Однако статистика объемов сжигаемого осадка неоднозначна. Например, из рис. 1 видно, что количество утилизируемого осадка в Нидерландах с 2009 по 2020 г. снизилось с 336 тыс. т. в год до 294 тыс. т., а в Польше повысилось почти в 11 раз за этот же период.

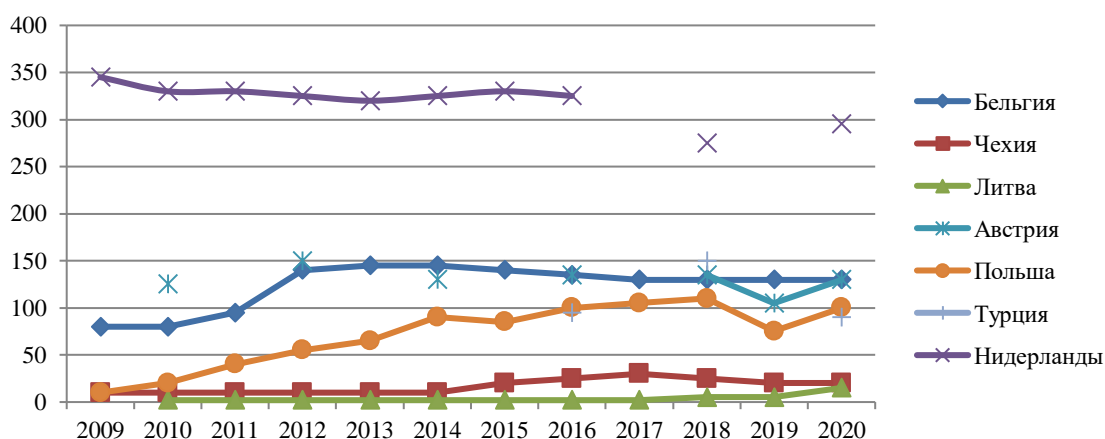


Рис. 1. Количество сжигаемого осадка сточных вод в пересчете на сухое вещество, тыс. т



На сегодняшний день существует несколько доступных технологий термической обработки осадка сточных вод. Эти технологии можно классифицировать по-разному. В данной статье методы термической обработки были сгруппированы в три категории: моносжигание, совместное сжигание, новые и альтернативные термические процессы (рис. 2)



Рис. 2. Виды установок термической обработки осадка

Заключение

При применении технологий термической обработки осадков сточных вод необходимо учитывать следующее:

1. После сжигания до 50 % вводимой сухой массы осадков сточных вод остается в виде золы, а большая часть токсичных тяжелых металлов в осадках сохраняется, что усложняет золоудаление.

2. Во время сушки осадок сточных вод проходит через фазу, при которой содержание сухого вещества составляет около 50–60 %, и осадок уже не текучий, что усложняет процесс сушки осадка.

3. Азот, хлор, сера, диоксины, фураны и другие газы, присутствующие в осадке, высвобождаются в виде газообразных загрязняющих веществ в различных формах во время сжигания, что требует очистки дымовых газов.

4. При влажности 70–80 % чистой теплотворной способности механически обезвоженного шлама недостаточно для автотермического сжигания, и может потребоваться дополнительное топливо.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ручкина, О. И. Методы утилизации осадков городских очистных сооружений / О. И. Ручкина, А. Н. Зверева. – Текст : непосредственный // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2020. – Том 1. – С. 192–196.



2. Wastewater generation and treatment by various eco-friendly technologies: Possible health hazards and further reuse for environmental safety / B. Pratap, S. Kumar, S. Nand [et al.] // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 313. – P. 137547. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137547.
3. Patent analysis of chemical treatment technology for wastewater: Status and future trends / X. Sun, L. Jin, F. Zhou [et al.] // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 307 (4). – P. 135802. – DOI: org/10.1016/j.chemosphere.2022.135802.
4. Технологии очистки сточных вод малых населенных пунктов: модели и методики расчета : монография / А. М. Непогодин, М. Ю. Дягелев, А. А. Абрамова, А. М. Пантюхина ; Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова. – Ижевск : ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021. – 75 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47199783&ysclid=lh60lzeuv75466252>. – Текст : электронный.
5. Белоногова, П. И. Малоотходные технологии биологической очистки сточных вод / П. И. Белоногова, М. Ю. Дягелев – Текст : электронный // *Экология и безопасность в техносфере : современные проблемы и пути решения : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Юрга, 23–25 ноября 2017 г. / Юргинский технологический институт. – Томск : ТПУ, 2017. – С. 143–145. – URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rvpthh&ysclid=lh62m5atkc395273495>.*
6. Анализ методов очистки иловых вод после обезвоживания осадка городских сточных вод / А. Л. Васильев, С. М. Гусейнова, С. А. Луков, Т. Л. Боровкова. – Текст : непосредственный // *Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2020. – № 3 (55). – С. 58–63.*
7. Губанов, Л. Н. Компостирование осадков сточных вод, обработанных аминокислотными реагентами / Л. Н. Губанов, Д. В. Бояркин. – Текст : непосредственный // *Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2008. – № 2. – С. 126–131.*
8. Анализ и обоснование методов обезвреживания и утилизации осадков сточных вод биологических очистных сооружений / И. С. Гуляева, М. С. Дьяков, Я. Н. Савинова [и др.]. – Текст : непосредственный // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 2. – С. 18–32.*
9. Review of inventory data for the thermal treatment of sewage sludge / H. Chang, Y. Zhao, S. Zhao [et al.] // *Waste Management*. – 2022. – Vol. 146. – P. 106–118. – DOI: org/10.1016/j.wasman.2022.05.002.
10. Elements partitioning during thermal conversion of sewage sludge / A. Ronda, A. Gómez-Barea, P. Haro [et al.] // *Fuel Processing*. – 2019. – Vol. 186. – P. 156–166. – DOI: org/10.1016/j.fuproc.2019.01.001.
11. Оценка специфических загрязнений в составе городских сточных вод / Н. М. Мезрин, А. А. Абрамова, М. Ю. Дягелев, В. Г. Исаков. – Текст : электронный // *Водоснабжение и санитарная техника. – 2022. – № 7. – С. 34–41. – DOI: 10.35776/VST.2022.07.05.*
12. Данилович, Д. А. Сжигание осадков сточных вод становится доступным для водоканалов / Д. А. Данилович, А. В. Макрушин. – Текст : непосредственный // *Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2017. – № 3. – С. 40–48.*
13. Дягелев, М. Ю. Седиментационные характеристики сброженного осадка при центрифугировании / М. Ю. Дягелев, Ф. Пилыц // *Яковлевские чтения-2022: Системы водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения: сборник докладов участников XVII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева, Москва, 17–18 марта 2022 года / Национальный*



исследовательский Московский государственный строительный университет. – Москва, 2022. – С. 73–79.

14. Schnell, M. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review / M. Schnell, T. Horst, P. Quicker // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 263. – P. 110367. – DOI: [org/10.1016/j.jenvman.2020.110367](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110367).

15. Donatello, S. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review / S. Donatello, C.R. Cheeseman // *Waste Management*. – 2013. – Vol. 33 (11). – P. 2328–2340. – DOI: [org/10.1016/j.wasman.2013.05.024](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.024).

16. Thermodynamic and economic analyses of sewage sludge resource utilization systems integrating Drying, Incineration, and power generation processes / Z. Chen, Y. Hou, M. Liu [et al.] // *Applied Energy*. – 2022. – Vol. 327. – P. 120093. – DOI: [org/10.1016/j.apenergy.2022.120093](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120093).

17. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater (in dry substance (d.s)). – 2022. – URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/>.

VEKSHIN Anton Andreevich, undergraduate student of the chair of water supply and water treatment; RASSOKHINA Evgeniya Vadimovna, undergraduate student of the chair of water supply and water treatment; DYAGELEV Mikhail Yurevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of water supply and water treatment; ISAKOV Vitaly Germanovich, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of water supply and water treatment

SLUDGE INCINERATION AS A NON-WASTE METHOD OF SEWAGE SLUDGE DISPOSAL

Kalashnikov Izhevsk State Technical University

7, Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russia. Tel.: +7(3412) 77-60-55 ext. 3270;

e-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru

Key words: sewage sludge, sludge incineration, mono-combustion, pyrolysis.

The article considers a method of waste water sludge disposal, i.e. incineration. The most widespread is the fluidized bed sand incineration process, which has the following advantages: no mechanical moving parts.

REFERENCES

1. Ruchkinova O. I., Zvereva A. N. Metody utilizatsii osadkov gorodskikh ochistnykh sooruzheniy [Methods of utilization of sludge of municipal sewage treatment plants]. *Sovremennye tekhnologii v stroitelstve. Teoriya i praktika* [Modern technologies in construction. Theory and practice]. 2020. Vol. 1. P. 192–196.

2. Pratap B., Kumar S., Nand S., Azad I., Bharagava R. N., Ferreira L. F. R., Dutta V. Wastewater generation and treatment by various eco-friendly technologies: Possible health hazards and further reuse for environmental safety. *Chemosphere*, 2023. Vol. 313. P. 137547. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2022.137547](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137547).

3. Sun X., Jin L., Zhou F., Jin K., Wang L., Zhang X., Ren H., Huang H. Patent analysis of chemical treatment technology for wastewater: Status and future trends. *Chemosphere*, 2022. Vol. 307(4). P. 135802. DOI: [org/10.1016/j.chemosphere.2022.135802](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135802).

4. Nepogodin A. M., Dyagelev M. Yu., Abramova A. A., Pantyukhina A. M. *Tekhnologii ochistki stochnykh vod malykh naselyonnykh punktov: modeli i metodiki raschyota* [Technologies of wastewater treatment of small settlements: models and calculation methods] : monografiya. Izhevsk State Technical University named after



M. T. Kalashnikov Izhevsk, 2021. 75 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47199783&ysclid=lh60olzeuv75466252>.

5. Belonogova P. I., Dyagelev M. Yu. Malootkhodnye tekhnologii biologicheskoy ochistki stochnykh vod [Low-waste technology of biological wastewater treatment]. *Ekologiya i bezopasnost v tekhnosfere: sovremennye problemy i puti resheniya [Ecology and safety of technosphere: modern problems and solutions]* : Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchyonykh, aspirantov i studentov, g. Yugra, 23–25 noyabrya 2017 goda / Iurginskiy tekhnologicheskii institut. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2017. P. 143–145. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rvpthh&ysclid=lh62m5atkc395273495>.

6. Vasilev A. L., Guseynova S. M., Lukov S. A., Borovkova T. L. Analiz metodov ochistki ilovykh vod posle obezvozhivaniya osadka gorodskikh stochnykh vod [Analysis of methods of purification of sludge water after dehydration of urban wastewater sludge]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. 2020, № 3(55). P. 58–63.

7. Gubanov L. N., Boyarkin D. V. Kompostirovanie osadkov stochnykh vod, obrabotannykh aminokislotnymi reagentami [The composting of sewage sludge treated with aminoacidic reagents]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. 2008, № 2. P. 126–131.

8. Gulyaeva I. S., Dyakov M. S., Savinova Ya. N. [et al]. Analiz i obosnovanie metodov obezvrezhivaniya i utilizatsii osadkov stochnykh vod biologicheskikh ochistnykh sooruzheniy [Analysis and justification of methods of neutralization and utilization of sewage sludge of biological treatment plants]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushey sredy, transport, bezopasnost zhiznedeyatel'nosti [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Environmental Protection, Transportation, Life Safety]*. 2012, № 2. P. 18–32.

9. Chang H., Zhao Y., Zhao S., Damgaard A., Christensen T. H. Review of inventory data for the thermal treatment of sewage sludge. *Waste Management*. 2022. Vol. 146. P. 106–118. DOI: [org/10.1016/j.wasman.2022.05.002](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.002).

10. Ronda A., Gómez-Barea A., Haro P., de Almeida V. F., Salinero J. Elements partitioning during thermal conversion of sewage sludge. *Fuel Processing Technology*. 2019. Vol. 186. P. 156–166. DOI: [org/10.1016/j.fuproc.2019.01.001](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.01.001).

11. Mezrin N. M., Abramova A. A., Gyagelev M. Yu., Isakov V. G. Otsenka spetsificheskikh zagryazneniy v sostave gorodskikh stochnykh vod [Assessment of specific pollutants in urban wastewater]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]*, 2022, № 7. P. 34–41. DOI [10.35776/VST.2022.07.05](https://doi.org/10.35776/VST.2022.07.05).

12. Danilovich D. A., Makrushin A. V. Szhiganie osadkov stochnykh vod stanovitsya dostupnym dlya vodokanalov [Combustion of sewage sludge becomes available for water utilities]. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya [The best available technologies of water supply and sanitation]*. 2017, № 3. P. 40–48.

13. Dyagelev M. Yu., Pilz F. Sedimentatsionnye kharakteristiki sbrozhennogo osadka pri tsentrifugirovani [Sedimentation characteristics of digested sludge during centrifugation]. *Yakovlevskie chteniya-2022: Sistemy vodosnabzheniya i vodootvedeniya. Sovremennye problemy i resheniya goda [Yakovlevsky readings-2022: Systems of water supply and sanitation. Modern problems and solutions]* : Sbornik dokladov uchastnikov XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyaschyonnoy pamyati akademika RAN S. V. Yakovleva, Moscow, 17–18 marta 2022. *Nats. Issled. Mosk. Gos. Stroit. Un-t. Moscow*, 2022. P. 73–79.

14. Schnell M., Horst T., Quicker P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 263. P. 110367. DOI: [org/10.1016/j.jenvman.2020.110367](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110367).



15. Donatello S., Cheeseman C. R. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review. *Waste Management*. 2013. Vol. 33(11). P. 2328–2340. DOI: org/10.1016/j.wasman.2013.05.024.

16. Chen Z., Hou Y., Liu M., Zhang G., Zhang K., Zhang D., Yang L., Kong Y., Du X. Thermodynamic and economic analyses of sewage sludge resource utilization systems integrating Drying, Incineration, and power generation processes. *Applied Energy*. 2022. Vol. 327. P. 120093. DOI: org/10.1016/j.apenergy.2022.120093.

17. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater (in dry substance (d.s)). 2022. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00030__custom_3980828/default/table?lang=en (data obrascheniya: 27.12.2022).

© **А. А. Векшин, Е. В. Рассохина, М. Ю. Дягелев, В. Г. Исаков, 2023**

Получено: 02.03.2023 г.