

С. Ю. ТЕПЛЫХ
Д. С. БОЧКОВ
А. О. БАЗАРОВА

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ФОСФАТОВ ИЗ СТОЧНОЙ ВОДЫ

PROMISING METHODS FOR BIOLOGICAL REMOVAL
OF PHOSPHATES FROM WASTEWATER

В статье сравнивается удаление фосфатов из сточных вод перспективными биологическими методами, а именно биотехнологиями, основанными на использовании фосфат-аккумулирующих организмов. Исследуемое микробное сообщество является альтернативным как для дальнейших фундаментальных исследований метаболизма фосфат-аккумулирующих организмов, так и для совершенствования биотехнологий очистки сточных вод от фосфора.

Ключевые слова: биологическое удаление фосфора, фосфат-аккумулирующие организмы, активный ил, очистка сточных вод, технология усовершенствованного биологического удаления фосфора, фосфатация, дефосфатация.

Одним из биогенных элементов, входящих в состав биомассы всех живых организмов, является фосфор, который выполняет важную роль в конструктивном и энергетическом метаболизме. Фосфаты широко используются в различных областях, поэтому они становятся компонентом сточных вод коммунального хозяйства и агропромышленного комплекса. Поступление избыточного количества фосфора в реки и озера нарушает сбалансированность этих экосистем и приводит к их эвтрофикации. Таким образом, очистка сточных вод от фосфатов является важной практической задачей.

Все чаще на станциях очистки сточных вод применяются биотехнологии для удаления фосфатов. Данные технологии основаны на способности организмов к внутриклеточному накоплению полифосфатов, которая встречается среди про- и эукариот.

При исследовании активного ила биореакторов в системе очистки сточных вод были обнаружены фосфат-аккумулирующие организмы (ФАО), неорганические фосфаты из среды и включающие их в свою биомассу в виде полифосфатов при циклическом росте в анаэробных и аэробных условиях.

The article compares the removal of phosphates from wastewater by promising biological methods, namely biotechnologies based on the use of phosphate-accumulating organisms. The microbial community under study gives great hopes for further fundamental studies of the metabolism of phosphate-accumulating organisms, and for improving biotechnologies for purifying wastewater from phosphorus.

Keywords: biological phosphorus removal, phosphate-accumulating organisms, activated sludge, wastewater treatment, technology for improved biological phosphorus removal, phosphatation, dephosphate

Исследования микробных сообществ активного ила промышленных установок очистки сточных вод и обогащенных ФАО лабораторных культур указывают на то, что основную роль в удалении фосфора играют бета-протеобактерии, относящиеся к роду "Candidatus Accumulibacter".

Протеобактерии являются весьма неоднородной группой. В эту группу включены симбионты эукариот и большое число патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, фото- и хемотрофные виды бактерий (автотрофы, гетеротрофы). Все протеобактерии грам-отрицательны, внешняя мембрана построена из липополисахарида. Группа включает как облигатно, так и факультативно аэробные и анаэробные бактерии. Кроме того, отличны и типы движения: в группу входят бактерии, имеющие жгутики, и неподвижные бактерии, а также бактерии, имеющие так называемый «скользящий» тип движения, т. е. движение отдельных бактериальных клеток или их колоний по твердой поверхности вдоль их длинной оси без участия бактериальных жгутиков.

Был проведен метагеномный анализ микробного консорциума, сформировавшегося в лабораторной установке по очистке сточ-

ных вод от фосфатов и обеспечивающего удаление до 80 % фосфора из среды. В сообществе преобладали представители филумов Proteobacteria (82,5 %), Bacteroidetes (10,5 %) и Chloroflexi (1,6 %). Среди протеобактерий были обнаружены Betaproteobacteria, среди которых преобладали представители рода 'Ca. Accumulibacter' и Gammaproteobacteria (26,8 %), большинство из них относилось к семейству 'Ca. Competibacteraceae'. На основе метагеномных данных получен геном доминирующей в сообществе фосфат-аккумулирующей бактерии, который представляет новый вид рода 'Ca. Accumulibacter'. Исследуемое микробное сообщество является перспективным объектом как для дальнейших фундаментальных исследований метаболизма фосфат-аккумулирующих организмов, так и для совершенствования биотехнологий очистки сточных вод от фосфора [1].

Направление разработки новых подходов биологического удаления фосфора из сточных вод связано с достижениями в области синтетической биологии и метаболической инженерии микроорганизмов. Учитывая, что выделить ФАО в чистые культуры до настоящего времени не удается, одним из способов повышения эффективности удаления фосфора является использование генно-инженерных штаммов бактерий других видов, способных эффективно поглощать фосфаты из среды. Например, был получен штамм *Pseudomonas aeruginosa* с инактивируемым геном *phoU* и рекомбинантный штамм магнитотактической бактерии *Magnetospirillum gryphiswaldense*, в которой был дополнительно экспрессирован ген полифосфат-киназы (*ppk*). В результате этих модификаций полученные генно-инженерным способом бактерии стали более эффективно аккумулировать полифосфаты из окружающей среды. Использование таких микроорганизмов является перспективным направлением разработки новых эффективных биотехнологических подходов для удаления фосфатов из сточных вод [2].

За рубежом активно используется очистка канализационных стоков методом установки локальных систем по технологии последовательно-переменного действия SBR (sequencing batch reactor). Системы компактны и построены по принципу миниатюрных промышленных очистных сооружений активного типа. Реактор системы активно участвует в процессе очистки стоков.

В отличие от традиционного метода аэробной биологической очистки, при котором вода протекает через несколько последовательных ёмкостей разного назначения, в реакторе SBR

все этапы очистки проходят в одной ёмкости (биореакторе) последовательно, с разделением по времени. Последовательные периодические реакторы или SBR используют отдельную секцию предварительной обработки для механического удержания твердых частиц и биологического аэрационного и отстойного резервуара. Небольшие системы очистки сточных вод SBR очищают поступающие сточные воды в течение нескольких циклов. Работа биореактора осуществляется в циклах, каждый из которых включает следующие фазы: наполнение, реакция (аэрация, периодическая или непрерывная), седиментация, удаление очищенной воды, удаление избыточного ила. Продолжительность каждого цикла определяется с учётом свойств поступающей на сооружения сточной воды, требуемых показателей для очищенной воды и других условий. Исходя из удобства эксплуатации обычно выбирают 6-, 8-, 12-часовые циклы. При наличии двух реакторов начало циклов смещено относительно друг друга так, чтобы фазы наполнения и слива не пересекались во времени. Продолжительность фаз при изменении характеристик сточных вод с учётом сезонных колебаний, расширения и т. п. можно настраивать в определённых диапазонах с помощью интерфейса системы управления. Такая особенность является одним из главных технологических преимуществ SBR, поскольку обеспечивает максимальную гибкость в управлении процессом очистки.

Основная особенность технологии периодической биологической очистки состоит в том, что все биохимические процессы (полного окисления органики, нитрификации аммоний-ионов, денитрификации нитрит- и нитрат-анионов, биологического удаления фосфора), а также вспомогательные процессы загрузки, отстаивания, выгрузки (декантации) очищенной воды осуществляются в одном резервуаре – по международной терминологии SBR (рис. 1).

Эта технология позволяет принимать стоки с высоким коэффициентом неравномерности поступления и практически не зависит от качества поступающей воды.

Первый простейший непрерывный процесс для биологического удаления фосфора из сточной воды Phoredox (PHOsphorus REDuction OXidation) был разработан еще в 70-е гг. XX в. (рис. 2). Цикличность условий для развития ФАО реализуется в результате прохождения иловой смеси через две последовательно расположенные зоны. В первой, анаэробной (без аэрации) зоне происходит смешивание возвратного активного ила и сточной воды. Вместе со сточной водой поступают легкодоступные

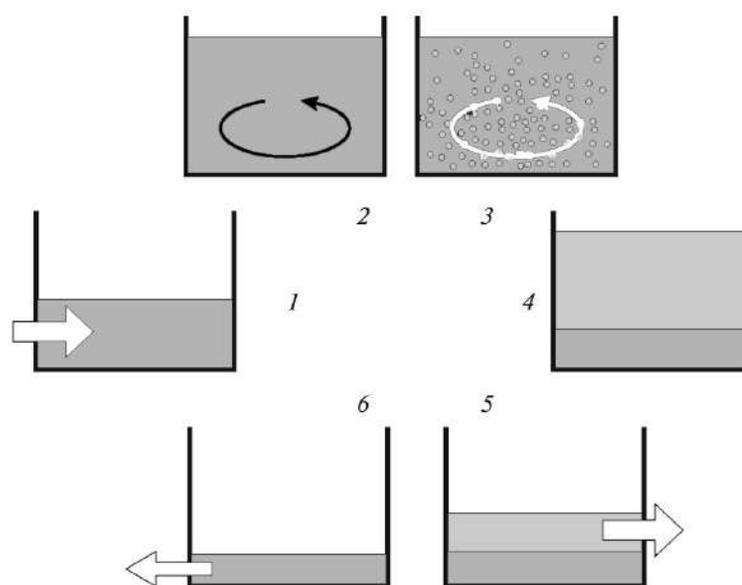


Рис. 1. Вариант биологического удаления фосфора из сточных вод в биореакторе типа SBR:

1 – подача в биореактор с активным илом сточной воды; 2 – анаэробная фаза; 3 – аэробная фаза; 4 – отстаивание; 5 – удаление очищенной сточной воды; 6 – удаление приросшего (избыточного) активного ила, обогащенного полифосфатами [2]

органические вещества, а отсутствие или крайне низкие концентрации O_2 создают условия для их ферментации с образованием летучих жирных кислот. В этой зоне ФАО потребляют органическое вещество и выбрасывают в среду фосфаты. Затем иловая смесь поступает в аэробную зону, обогащающуюся кислородом принудительной аэрацией. В этой зоне ФАО поглощают фосфаты, а затем ил поступает в илоотделитель. После отделения ила часть обогащенного фосфором активного ила (избыточный активный ил или прирост активного ила) выводится из процесса, а остальная часть возвращается в анаэробную зону и цикл удаления фосфора повторяется. Длительность пребывания в зонах и концентрация активного ила подбираются таким образом, чтобы концентрация фосфора на выходе из аэробной зоны была ниже, чем в поступающей воде, и соответствовала проектному значению. Процесс Phoredox (Phosphorus Reduction Oxidation) предназначен для очистки сточных вод от органического вещества и фосфора, однако в настоящее время к очистным сооружениям предъявляются требования очистки не только от этих загрязнителей, но и от азота.

Ведутся работы и в направлении оптимизации традиционной схемы удаления фосфора за счет повышения разнообразия взаимовыгодных полезных связей между организмами внутри биоценоза активного ила. Напрямую, появились обнадеживающие результаты использования в качестве источника кислорода

фотосинтетических микроорганизмов (цианобактерии, зеленые и коричневые водоросли и др.), заменяющих принудительную аэрацию и, тем самым, существенно повышающих экономическую привлекательность такой технологии [3].

Среди факторов среды (параметров обработки сточных вод), которые по данным целого ряда исследований оказывают существенное влияние на эффективность биологической очистки сточных вод от фосфатов, выделяют [4–10]: температуру иловой смеси; pH среды; БПК; концентрации в сточных водах летучих жирных кислот (ЛЖК), железа, калия, кальция и магния, азота, фосфора и соотношение их концентраций с концентрациями органических загрязнений; концентрацию растворенного кислорода, нитратов; нагрузку на ил (гидравлическую и удельную); возраст ила и продолжительность обработки.

Поскольку в настоящее время механизм процесса биологического удаления фосфора далеко не полностью изучен, он создает ряд проблем для стабильного и эффективного применения на практике. Исследования миграции фосфора в системе сточная вода – активный ил, выявление оперативно контролируемых управляющих воздействий этим процессом очень актуальны для разработки способов повышения эффективности извлечения фосфатов без существенных капитальных и эксплуатационных затрат, в том числе и на сооружения, работающих по традиционной схеме [11].

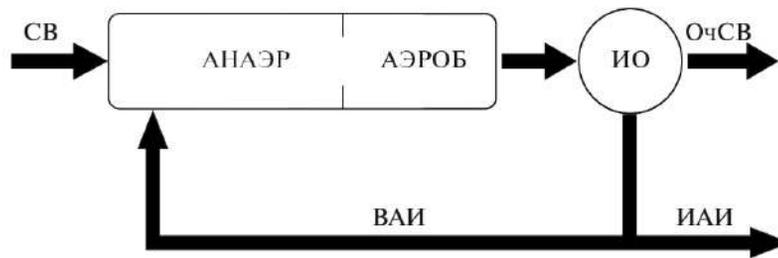


Рис. 2. Схема процесса Phoredox:
 СВ – сточная вода; АНАЭР – анаэробная зона биореактора; АЭРОБ – аэробная зона биореактора; ИО – отделитель ила; ОчСВ – очищенная сточная вода; ВАИ – возвратный активный ил; ИАИ – избыточный активный ил [2]

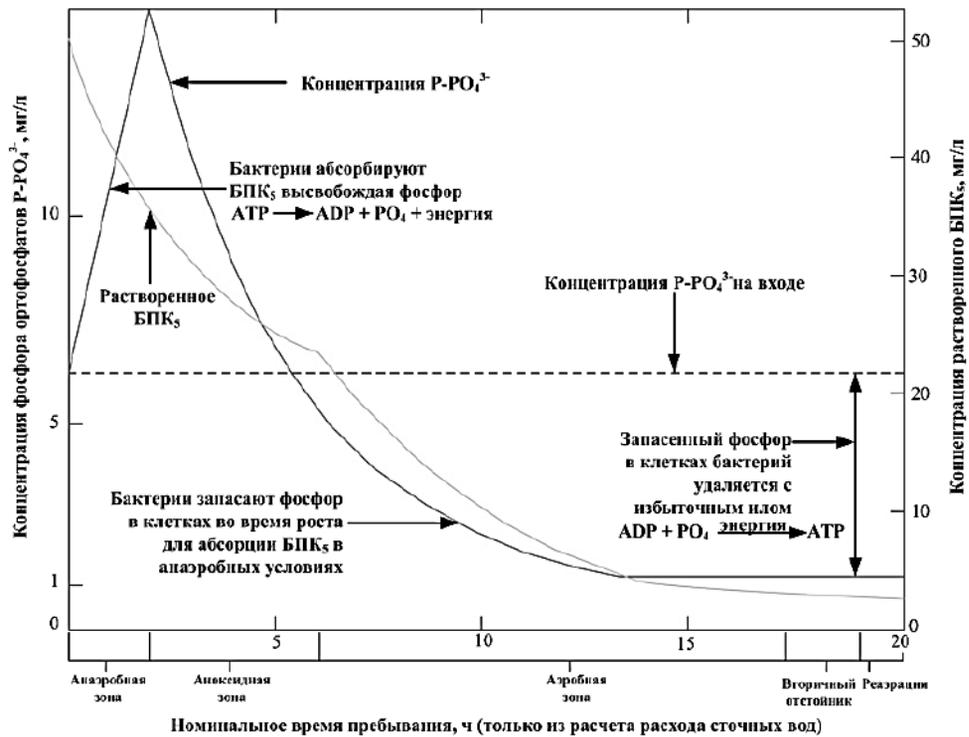


Рис. 3. Профиль изменения концентрации фосфатов при биологической очистке городских сточных вод от фосфора [12]

Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) иловой жидкости является оперативно контролируемым показателем окислительно-восстановительной ситуации в этой среде.

В лабораторных экспериментах и на городских очистных сооружениях были установлены количественные характеристики корреляции между переменными параметрами очистки сточных вод – ОВП среды, разностью ОВП в течение обработки и миграцией фосфатов в системе активный ил–сточная вода.

Установлено, что более объективно (в том числе при обосновании миграций фосфатов в аноксидной зоне) на динамику концен-

трации фосфатов воздействует не абсолютное значение ОВП среды, а разность в ОВП между зонами.

Отмечено позитивное влияние на величину фосфат-аккумулирующей емкости исследованных активных илов и их адаптации к чередованию анаэробных и аэробных зон [13].

Вывод. Обзор литературы показал, что исследуемое микробное сообщество, относящееся к роду “*Candidatus Accumulibacter*”, до конца не изучено и будет исследоваться в диссертационной работе, так как является перспективным объектом для дальнейших фундаментальных исследований метаболизма фосфат-аккумулирующих организмов и для совершенство-

вания биотехнологий очистки сточных вод от фосфора. Методы биологического окисления позволяют удалить фосфор вместе с избытком активного ила в количестве, составляющем около полутора процентов от его массы по сухому веществу. Для устойчивого и стабильного удаления фосфора фосфатов при биологической очистке сточной воды важно наличие достаточного количества органического вещества для процессов денитрификации и биологической дефосфатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котляров Р.Ю., Белецкий А.В., Каллистова А.Ю. Новые фосфат-аккумулирующие бактерии, обнаруженные в установке для очистки сточных вод от фосфатов // *Микробиология*. 2019. № 6. С. 710–714.
2. Дорофеев А.Г., Николаев Ю.А., Марданов А.В., Пименов Н.В. Роль фосфат-аккумулирующих бактерий в биологической очистке сточных вод от фосфора // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2020. № 1. С. 3–18.
3. Oyserman B.O., Martirano J.M., Wipperfurth S., Owen B.R., Noguera D.R., McMahon. K.D. // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51. № 6. P. 3165–3175.
4. Амбросова Г.Т., Меркель О.М., Бойко Т.А., Хвостова Е.В., Перминов А.А. Закономерности процесса дефосфатизации активного ила в анаэробных условиях // *Известия вузов. Строительство*. 2003. № 6. С. 73–78.
5. Дзюба И.П., Маркевич Р.М., Сигиневич Т.М. Исследование процесса накопления фосфора фосфор-аккумулирующими бактериями // *Труды БГТУ*. № 4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2011. № 4 (142). С. 182–184.
6. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.
7. Этов А.Н., Канунникова М.А. Сравнение методик расчета сооружений с биологическим удалением азота и фосфора и применение математического моделирования // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2016. № 1. С. 3–14.
8. Blackall L.L., Crocetti G.R., Saunders A.M. and Bond P.L. A review and update of the microbiology of enhanced biological phosphorus removal in wastewater treatment plants. *Antonie Van Leeuwenhoek*, Vol. 81, Issue 1–4, pp. 681–691. DOI: 10.1023/a:1020538429009.
9. Randall C.W., Barnard J.L. and Stensel H.D. Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal. Lancaster: Technomic Publishing Company, 420 p.
10. The Cadmus Group, Inc. EPA/600/R-09/012. Nutrient Control Design Manual—State of the Technology Review Report. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2009. 102 p.
11. Юрченко В.А., Смирнов А.В., Бахарева А.Ю. Влияние редокс-потенциала среды на миграцию фосфора в иловой смеси // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 6, № 6 (78). С. 78–84.
12. Stark K., Plaza B. and Hultman B. Phosphorus release from ash, dried sludge and sludge residue from supercritical water oxidation by acid or base. *Chemosphere*, Vol.62, Issue5, pp.827832. DOI:10.1016/j.chemosphere.2005.04.069.
13. Юрченко В.А., Смирнов А.В., Есин М.А., Левашова Ю.С. Влияние редокс-потенциала на фосфатацию иловой жидкости в технологиях биологического удаления фосфора // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2019. № 3. С. 26–37.

REFERENCES

1. Kotlyarov R.Yu., Beletsky A.V., Callistova A.Yu., etc. New phosphate-accumulating bacteria found in a phosphate-removing plant. *Mikrobiologiya* [Microbiology], 2019, no. 6, pp. 710-714. (in Russian)
2. Dorofeev A.G., Nikolaev Yu.A., Mardanov A.V., Pimenov N.V. The role of phosphate-accumulating bacteria in biological wastewater treatment from phosphorus (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* [Applied Biochemistry and Microbiology], 2020, no. 1, pp. 3-18. (in Russian)
3. Oyserman B.O., Martirano J.M., Wipperfurth S., Owen B.R., Noguera D.R., McMahon. K.D. *Environ. Sci. Technol.* 2017, vol. 51, no. 6, pp. 3165–3175.
4. Ambrosova, G. T., Merkel, O. M., Boiko, T. A., Khvostova, E. V. and Perminov, A. A. Regularity of dephosphotization process of active sludge in anaerobic conditions. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2003, no. 6, pp. 73–78. (in Russian)
5. Dzyuba, I. P., Markevich, R. M. and Siginevich, T. M. Studying the process of phosphorus accumulation by phosphorus accumulating bacteria. *Trudy BGTU. № 4. Himiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya* [Proceedings of BSTU. 4 Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology], 2011, no. 4 (142), pp. 182–184. (in Russian)
6. Jmour, N.S. (2003). Technological and biochemical processes of wastewater treatment plants with aerotanks. Moscow. AKVAROS [AKVAROS], 512 p.
7. Epov, A. N. and Kanunnikova, M. A. Comparison of structural analysis methods of nitrogen/phosphorus biological removal plants with mathematical modeling application. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and Ecology], 2016, no. 1, pp. 3–14. (in Russian)
8. Blackall, L. L., Crocetti, G. R., Saunders A. M. and Bond, P. L. A review and update of the microbiology of enhanced biological phosphorus removal in wastewater treatment plants. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 2002, vol. 81, is. 1–4, pp. 681–691. DOI: 10.1023/a:1020538429009.
9. Randall, C. W., Barnard, J. L. and Stensel, H. D. Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal. Lancaster: Technomic Publishing Company, 1992. 420 p.
10. The Cadmus Group, Inc. EPA/600/R-09/012. Nutrient Control Design Manual—State of the Technology Review Report. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2009. 102 p.

11. Yurchenko, V. A., Smyrnov, O. V. and Bakhareva, A. Yu. Influence of redox potential of the medium on phosphorus migration in sludge liquor. *Vostochno-Evropskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 2015, vol. 6, no. 6 (78), pp. 78–84. (in Russian)

12. Stark, K., Plaza, B. and Hultman, B. Phosphorus release from ash, dried sludge and sludge residue from supercritical water oxidation by acid or base. *Chemosphere*, 2006, vol. 62, no. 5, pp. 827–832. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.04.069.

13. Yurchenko, V. A., Smyrnov, O. V. and Bakhareva, A. Yu. Influence of the redox potential on the sludge phosphatation in the technologies of biological phosphorus removal. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions], 2019, no. 3, pp. 26-37. (in Russian)

Об авторах:

ТЕПЛЫХ Светлана Юрьевна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: kafvv@mail.ru

БОЧКОВ Дмитрий Сергеевич

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: b.o.c.h.k.o.v@icloud.com

БАЗАРОВА Анастасия Олеговна

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: bystranova14@mail.ru

TEPLYKH Svetlana Yu

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: kafvv@mail.ru

BOCHKOV Dmitrii S.

Postgraduate Student of the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: b.o.c.h.k.o.v@icloud.com

BAZAROVA Anastasya O.

Postgraduate Student of the Watter Supply and Wastwater Chair Samara State Technical University, Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: bystranova14@mail.ru

Для цитирования: Теплых С.Ю., Бочков Д.С., Базарова А.О. Перспективные методы биологического удаления фосфатов из сточной воды // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 2. С. 42–47. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.07.

For citation: Teplykh S.Yu, Bochkov D.S., Bazarova A.O. Promising Methods for Biological Removal of Phosphates from Wastewater. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol. 11, no. 2, Pp. 42–47. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.07.