



Глубокое удаление фосфора в технологиях очистки сточных вод

Рецензия эксперта на статью получена
26.05.2023 [The expert review of the article
was received on May 26, 2023]

Соединения фосфора постоянно присутствуют в коммунальных сточных водах, поскольку являются продуктами жизнедеятельности человека. Количество канализованных объектов будет со временем увеличиваться в связи с ростом населения и повышением уровня благоустройства жилищного фонда, обеспечивающего вывод загрязнённых вод за пределы поселений системами водоотведения. И потому там, где есть человек, задача удаления биогенных веществ будет присутствовать всегда. При этом постоянно будет учитываться вопрос экономичности принимаемых решений.

В настоящее время внедряется выполнение требований удаления биогенных веществ из сточных вод. Это связано с состоянием водных объектов и подкреплено выполнением закона о плате за пользование природными ресурсами. Жёсткие требования удаления фосфатов из сточных вод, сбрасываемых в водные объекты, являются неотъемлемой составляющей нормативных документов. В нормах сброса сточных вод в водоёмы рыбохозяйственного водопользования (что следует рассматривать как экологическое нормирование) утверждены предельно

допустимые концентрации (ПДК) в водах водоёмов рыбохозяйственного водопользования [1, 2]. При технологическом проектировании, базирующемся на достижениях наилучших доступных показателей (НДТ), также обязательно глубокое изъятие фосфатов из сточных вод. В данном случае показатели содержания фосфатов нормируются непосредственно для сточных вод, поступающих в водные объекты [3, 4]. Наиболее строгим из установленных требований является необходимость достижения ПДК при сбросе сточных вод в водоёмы, отнесённые к рыбохозяйственной категории водопользования. Величины ПДК фосфатов составляют (по Р): при сбросе в олиготрофные водные объекты — 0,05 мг/л, в мезотрофные — 0,15 мг/л, в эвтрофные — 0,2 мг/л.

При технологическом подходе к нормированию нормы содержания фосфатов также зависят от категории водного объекта. В данном случае рассматривается четыре типа категорий собственно водных объектов (А, Б, В, Г), для которых установлены ПДК от 0,5 до 5,0 мг/л (по PO_4). Рекомендации относятся к станциям, имеющих производительность от 0,1 м³/сут. до более 800 тыс. м³/сут.

УДК 628.3. Научная специальность: 2.1.4 (05.23.04).

Глубокое удаление фосфора в технологиях очистки сточных вод

Н. А. Залётова, д.т.н., профессор; **С. В. Залётов**, к.т.н., доцент; **А. Ю. Виноградов**, аспирант, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», [Московский государственный строительный университет \(НИУ МГСУ\)](#)

Современные технологии очистки сточных вод, включающие анаэробные, аэробные процессы, предназначенные для удаления азота и фосфора, часто не позволяют обеспечить удаление фосфатов на уровне современных требований. Для обеспечения глубокого удаления фосфатов требуется включить в технологическую схему очистки дополнительный метод обработки сточных вод. Наиболее простым путём достижения требуемого эффекта является использование реагентов, которые связывают фосфор в нерастворимые соединения. Фосфаты удаляются из очищаемой воды с осадком. Однако применение химического метода сдерживается большой потребностью в реагентах и образованием дополнительного количества осадка, подлежащего обработке. Большое внимание привлекает возможность глубокого удаления фосфатов биологическим методом. На сегодняшний день разработано несколько вариантов технологических схем с разной степенью проработки. Данная статья посвящена оценке возможностей глубокого удаления фосфатов биологическим методом.

Ключевые слова: фосфаты, биологическая очистка, аэробные и анаэробные условия, механическая очистка.

UDC 628.3. The number of scientific specialty: 2.1.4 (05.23.04).

Deep phosphorus removal in wastewater treatment technologies

N. A. Zaletova, Doctor of Technical Sciences, Professor; **S. V. Zaletov**, PhD, Associate Professor; **A. Ju. Vinogradov**, postgraduate student, the Department of Water Supply and Sanitation, [National Research Moscow State University of Civil Engineering \(NRU MGSU\)](#)

Modern wastewater treatment technologies, including anoxic, anaerobic, aerobic processes designed to remove nitrogen and phosphorus, often do not allow for the removal of phosphates at the level of modern requirements. To ensure deep removal of phosphates, it is required to include an additional method of wastewater treatment in the technological scheme of purification. The simplest way to achieve the desired effect is to use reagents that bind phosphorus into insoluble compounds. Phosphates are removed from the treated water with sediment. However, the use of the chemical method is constrained by the great need for reagents and the formation of an additional amount of sediment to be treated. Great attention is drawn to the possibility of achieving deep removal of phosphates by biological method. To date, several variants of technological schemes have been developed with varying degrees of elaboration. This article is devoted to assessing the possibilities of deep removal of phosphates by biological method.

Key words: phosphates, biological treatment, aerobic and anaerobic conditions, mechanical treatment.

Абсолютная величина ПДК в конкретном случае будет зависеть от категории водоёма и производительности очистного сооружения. Для категории Б, например, которая, как предполагается, станет наиболее распространённой категорией водных объектов, диапазон ПДК составит от 0,7 до 1 мг/л (по PO_4) или от 0,23 до 0,33 мг/л (по Р).

Хотя при различных подходах к нормированию абсолютные величины требований к остаточному содержанию фосфатов различаются, основной массив известных технологических приёмов, позволяющих обеспечивать установленные требования, общий. Он включает химическую обработку сточных вод реагентами либо биологическую очистку с последовательным пребыванием сточной воды в ёмкостях с чередующимися аэробными и анаэробными условиями обработки, или их комбинацию.

Известно, что фосфор может быть связан реагентом в нерастворимые соединения и выведен из сточных вод, сбрасываемых в водные объекты. Применение метода химической обработки сточных вод имеет положительные стороны. Во-первых, этот метод достаточно просто реализовать на практике. Необходимо только приготовить раствор реагента рекомендованной крепости и обеспечить его дозирование в выбранную точку технологической цепи биологической очистки. Реагент может быть введён в различные точки технологической цепи очистных сооружений: в сооружения механической очистки, в сооружения биологической очистки и доочистки. Необходимо учитывать особенности процессов очистки при введении реагентов. Применение реагента надёжно обеспечивает заданное качество воды при соблюдении параметров технологических процессов [5]. Подача реагента может быть автоматизирована в соответствии с характерной для объекта применения неравномерностью содержания фосфора в очищаемых сточных водах или концентрациями фосфатов в поступающих на очистку сточных водах, что обеспечит стабильное качество очищенной воды.

Наиболее сложным моментом практического применения реагента является потребность значительного количества реагента. Так, например, для станции с типичной для наших городов относительно небольшой производительностью (порядка 100 тыс. $\text{м}^3/\text{сут.}$) при характерном для городских сточных вод уровне загрязнения фосфатами необходимо ежедневно вводить около 2,5 тонн хлорного железа. Принимая во внимание механизм



очистки сточных вод от фосфора за счёт образования нерастворимых соединений фосфора и вывода их из очищенной воды с осадком, использование реагента приводит к увеличению количества осадка, который должен быть обезвожен и вывезен за пределы очистных сооружений.

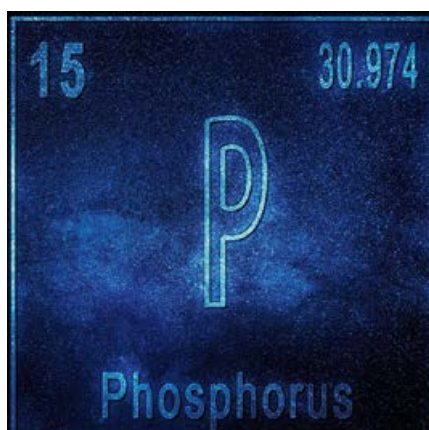
В последние годы развитие начинает получать биологический метод повышенного удаления фосфора. В основе технологических процессов увеличенного изъятия фосфора данным методом лежит обработка сточных вод и/или активного ила (либо сырого осадка) в чередующихся аэробных и анаэробных условиях. Обработка в анаэробных условиях позволяет

увеличить количество летучих жирных кислот и далее использовать их в качестве субстрата для обеспечения более глубокого (по сравнению с традиционной биологической очисткой) удаления фосфора.

Преимуществом данного типа технологических схем является практически полное отсутствие потребности в дополнительном использовании реагентов для обеспечения глубокого удаления фосфатов из очищаемого потока сточных вод. Общее требование — наличие дополнительных ёмкостных сооружений для осуществления анаэробной обработки потоков технологической схемы, подлежащих анаэробной обработке. Потребность в дополнительных ёмкостных сооружениях может быть решена при новом строительстве либо за счёт использования незагруженных отстойных сооружений на станциях аэрации.

Технология биологического удаления фосфора с обработкой рециркулирующего ила в анаэробных условиях была изучена нами в лабораторных, опытно-технологических и полномасштабных производственных условиях. Схема с глубоким удалением фосфора предусматривает обработку сточных вод в сооружениях традиционной биологической очистки. Дополнительно в схему вводятся сооружения для высвобождения фосфатов из рециркулирующей части активного ила в анаэробных условиях. Ёмкости для высвобождения фосфатов оборудованы устройствами для обеспечения мягкого перемешивания активного ила с целью перемещения выделившихся фосфатов в жидкую фазу (сливную воду). Сливная вода отводится по лотку и далее трубопроводом во внутреннюю канализацию.

В основе технологических процессов увеличенного изъятия фосфора биологическим методом лежит обработка сточных вод и активного ила (или сырого осадка) в чередующихся аэробных и анаэробных условиях



Принципиальная схема биологической очистки с глубоким удалением соединений фосфора приведена на рис. 1. Очищаемая сточная вода 7 после механической очистки на решётках, в песколовках (на рис. 1 не показаны) и в первичных отстойниках 1 поступает в аэротенк 2, где проходит процесс биологической очистки. Иловая смесь поступает во вторичный отстойник 3, где отделяется очищенная вода, которая выводится из системы по трубопроводу 8. Рециркулирующая часть активного ила из вторичных отстойников направляется в ёмкости для высвобождения фосфатов 4, избыточный ил удаляется на обработку осадков 13. Активный ил, прошедший обработку в анаэробной

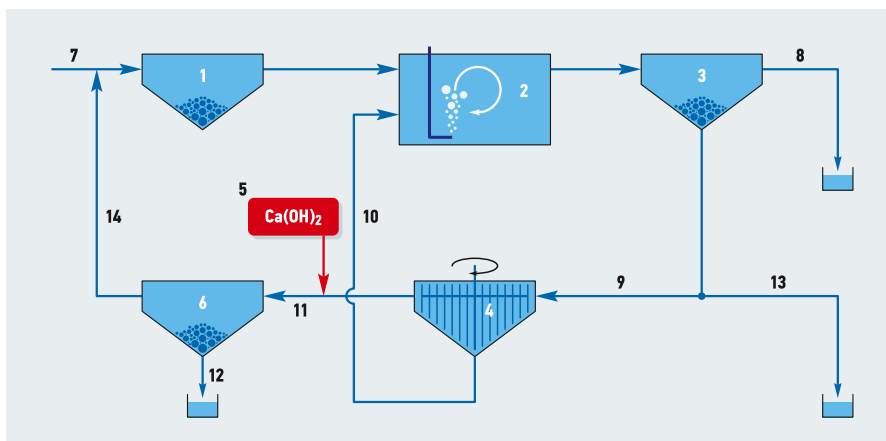


Рис. 1. Технологическая схема биологической очистки с глубоким удалением фосфора (1 и 3 — первичный и вторичный отстойники; 2 — аэротенк; 4 — ёмкость для анаэробной обработки активного ила; 5 — известь; 6 — химический отстойник; 7 и 8 — исходная и очищенная сточная вода; 9 — рециркулирующий поток ила перед анаэробной обработкой; 10 — возвратный ил после анаэробной обработки; 11 — сливная вода после уплотнения активного ила в анаэробных условиях; 12 — осадок; 13 — избыточный активный ил; 14 — сливная вода после химического отстойника)



ёмкости, по трубопроводу 10 возвращается в начало аэротенка. Сливная вода 11, содержащая повышенные концентрации фосфатов, выводится из ёмкостей для высвобождения 4 и направляются на дальнейшую обработку и утилизацию.

Особенностью процесса анаэробной обработки рециркулирующего активного ила является значительный рост концентраций фосфатов в жидкой фазе в анаэробных условиях.

Известно, что концентрация фосфатов в поступающей на очистку сточной воде постоянно меняется. На рис. 2 приведён пример результатов суточного анализа общего фосфора и фосфатов в реальной сточной воде, подававшейся на экспериментальную установку биологического удаления фосфора (кривые 1 и 2), и в сточной воде, очищенной на установке (кривые 3 и 4). Как следует из приведённых данных, концентрация общего фосфора и фосфатов в течение суток меняют свою величину. Изменения концентрации фосфатов проходили в диапазоне 1–3 мг/л (изменение в три раза), колебания концентраций общего фосфора в этот же пе-

риод времени составили от 2,5 до 7,8 мг/л (изменение в шесть раз). При этом из графика следует, что и содержание других форм фосфора (сложных и органических, величина которых представляет разность концентраций общего фосфора и фосфатов в отобранной пробе), также постоянно значительно меняется.

В очищенной воде концентрации общего фосфора и фосфатов снизились, причём колебания фосфатов составляли 0,1–0,2 мг/л, общего фосфора 0,5–0,8 мг/л. Практически вся часть сложных и органических форм фосфора подверглась гидролизу. При этом в технологическом процессе обеспечивается стабильное качество очищенной воды.

Несмотря на возврат в аэротенк циркулирующего ила с повышенными концентрациями фосфатов, эффект очистки от фосфатов по схеме в целом превышал 90–95 % и позволял обеспечивать ПДК фосфатов в очищенной воде

Результаты опытов показали, что, несмотря на возврат в аэротенк циркулирующего ила с повышенными концентрациями фосфатов, эффект очистки от фосфатов по схеме в целом превышал 90–95 % и позволял обеспечивать ПДК фосфатов в очищенной воде.

Полученные данные о характере изъятия форм фосфора в процессе биологической очистки с анаэробной обработкой рециркулирующего ила были подтверждены исследованиями на опытно-промышленной установке производительностью 2000 м³/сут. Опытная установка работала по схеме, приведённой на рис. 1, в течение более трёх лет. На рис. 3 приведены результаты анализов фосфатов и общего фосфора в образцах проб, отобранных в течение трёх лет работы опытно-промышленной установки.

Результаты работы опытно-промышленных сооружений подтвердили выводы, полученные на опытно-технологической установке. В очищенной воде практически весь общий фосфор представлен фосфатами, то есть практически все сложные и органические формы фосфора полностью гидролизуются. В ходе трёхлетнего наблюдения работы экспериментального объекта концентрация фосфатов (кривая 4) и общего фосфора (кривая 3) в основном не превышала 0,2–0,5 мг/л, то есть был достигнут стабильный результат глубокой очистки от фосфора.

В один из периодов эксплуатации опытно-промышленных сооружений произошло резкое значительное снижение поступления сточных вод на сооружения. Соответственно, время обработки сточных вод в аэротенке возросло, а нагрузка органических веществ на активный ил снизилась. Аэротенк начал работать с более глубоким окислением соединений азота и образованием повышенных концентраций нитратов до более 7 мг/л.

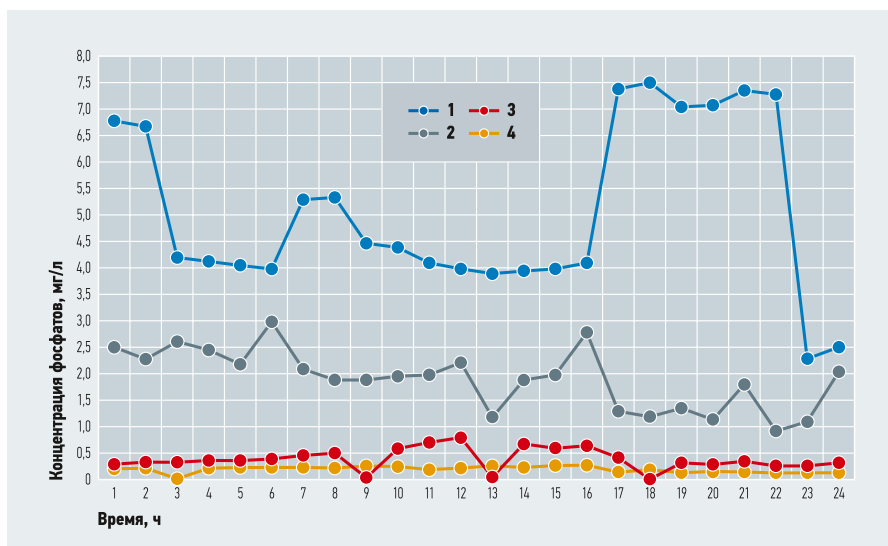


Рис. 2. Суточный анализ содержания соединений фосфора в сточных водах опытно-промышленной установки (1 — общий фосфор исходной сточной воды; 2 — фосфаты исходной сточной воды; 3 — общий фосфор очищенной сточной воды; 4 — фосфаты очищенной сточной воды)

На станции началась неконтролируемая денитрификация, сопровождавшаяся бурным выносом активного ила из вторичных отстойников. Удаление фосфатов было нарушено. Восстановление установленного режима биологической очистки возвратило первоначальное глубокое удаление фосфора. Особенностью реализации изученной технологии является возможность получать фосфорсодержащий осадок, аналогичный органическому удобрению, обогащённому суперфосфатом.

Таким образом, можно предположить, что технология биологической очистки с глубоким удалением фосфора на завершающем этапе биологической очистки может быть применена в схемах с повышенным удалением нитратов (ниже установленной ПДК по нитратам).

Другим вариантом глубокого удаления фосфора биологическим методом является включение в технологическую схему очистки сточных вод фермента-

ции (ацидофикации), то есть подготовки осветлённой воды путём обработки сырого осадка в анаэробных условиях. Анализ литературных источников показывает, что проведение ферментации позволяет увеличить эффективность изъятия фосфатов в технологической схеме биологической очистки по сравнению с биологическим процессом [6–8].

Известен ряд схем подготовки субстрата, то есть ферментации, для повышения эффективности изъятия фосфора в аэротенках. Это и рециркуляция сырого осадка первичного отстойника, и анаэробное сбраживание сырого осадка в специальных ёмкостях или дополнительное отстаивание (уплотнение) сырого осадка в отдельных ёмкостях [9,10] и др. В данном случае технологическую схему традиционной биологической очистки, как и выше рассмотренной технологии биологического удаления фосфора, также необходимо дополнить ёмкостными соору-

жениями. Распространённое в настоящее время включение в технологическую схему механической очистки решёток с тонкими прозорами — в дополнение к решёткам с прозорами 12 мм (требование СНиП 2.04.03–85, ныне распространённое на действующих сооружениях), скорее всего, позволит вывести из эксплуатации часть первичных отстойников. Исключённые из технологической схемы отстойники могут быть использованы для выполнения новых технологических задач.

Однако, несмотря на ожидаемые положительные результаты работ технологических схем удаления фосфора, в технологиях с ферментацией остаётся целый ряд неисследованных моментов, которые могут оказать влияние на результаты очистки в производственных условиях. Поэтому работы продолжаются в направлении выбора наиболее эффективной технологической схемы ферментации и определения благоприятных технологических параметров процесса глубокого удаления фосфора.

1. Перечень рыбохозяйственных нормативов; предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. — М.: Изд-во ВНИРО, 1999. 304 с.
2. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 №552.
3. Об утверждении технологических показателей наилучших доступных показателей в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов: Постановление Правительства РФ от 15.09.2020 №1430.
4. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов: Информ.-технич. справ. по НДТ. — М.: Бюро НДТ, 2019.
5. Залётова Н.А. Очистка городских сточных вод от биогенных веществ (соединений азота и фосфора). Дисс. доктора техн. наук по спец. 05.23.04. — М.: НИИ КВОВ, 1999. 399 с.
6. Lötter L.H., Pitman A.R. Improved biological phosphorus removal resulting from the enrichment of reactor feed with fermentation products. Water Science Technology. 1992. Vol. 26. No. 5–6. Pp. 943–953.
7. Mamais D., Jenkins D. The effects of MCRT and temperature on enhanced biological phosphorus removal. Water Science Technology. 1992. Vol. 26. No. 5–6. Pp. 955–965.
8. Жмур Н.С. Ферментация как метод улучшения свойств активного ила и интенсификации процесса глубокого извлечения соединений азота и фосфора // Водоснабжение и канализация, 2012. №1–2. С. 18–31.
9. Козлов М.Н., Харьковина О.В., Пахомов А.Н., Стрельцов С.А., Хамидов М.Г., Ершов Б.А., Белов Н.А. Опыт эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора // Водоснабжение и санитарная техника, 2010. №10. С. 35–41.
10. Миргородский В.Л., Миллер Ю.Е., Кныш А.И. Применение ферментированного осадка для очистки сточных вод от биогенных элементов / Современные технологии рационального природопользования и защита окружающей среды. Экология особо охраняемых территорий / Экологические проблемы региона и пути их разрешения: Межд. науч.-практ. конф. (15–16.05.2018). — Омск: ОмГАУ, 2018. С. 238–242.

References — see page 78.

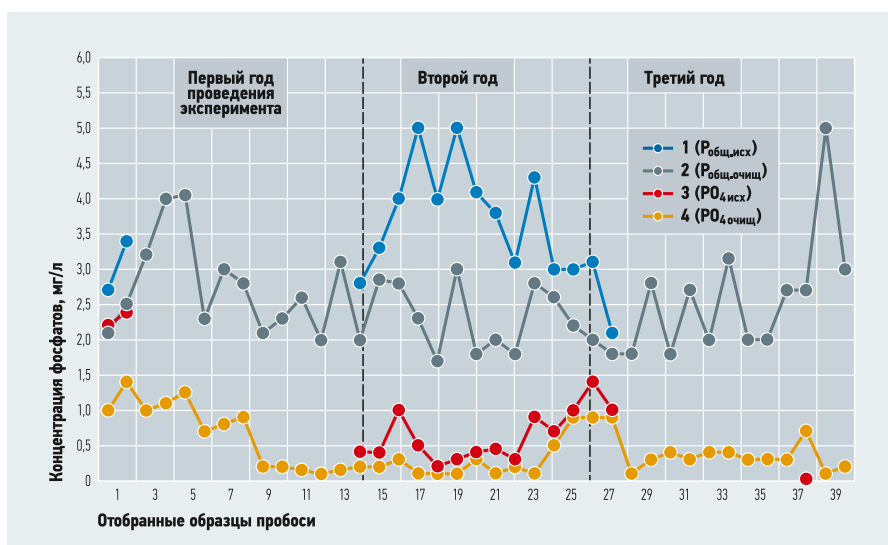


Рис. 3. Результаты трёхлетнего испытания технологии биологического удаления фосфора на опытно-промышленных сооружениях (концентрация соединений фосфора: 1 и 3 — общий фосфор исходной и очищенной воды; 2 и 4 — фосфаты исходной и очищенной воды)

Deep phosphorus removal in wastewater treatment technologies. Pp. 36–39.

Nina A. Zaletova, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Sergey V. Zaletov**, PhD, Associate Professor; **Andrey Ju. Vinogradov**, postgraduate student, the Department of Water Supply and Sanitation, [National Research Moscow State University of Civil Engineering \(NRU MGSU\)](#)

1. *Perechen' rybkhozhajstvennykh normativov; predel'no dopustimyykh kontsentratsij (PDK) i orientirovochno bezopasnykh urovnej vozdeystviya (OBUV) vrednykh veshhestv dlja vody vodnykh ob#ektov, imejushchikh rybkhozhajstvennoe znachenie* [List of fishery standards; maximum allowable concentrations (MAC) and tentatively safe exposure levels (SLI) of harmful substances for the water of water bodies of fishery importance]. Moscow. *Izd-vo VNIRO* [Publishing House of the All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography]. 1999. 304 p. [In Russian]
2. *Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob#ektov, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsij vrednykh veshhestv v vodakh vodnykh ob#ektov rybkhozhajstvennogo znachenija* [On the approval of water quality standards for water bodies, including the standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance]. *Prikaz Ministerstva sel'skogo khozjajstva RF ot 13.12.2016 №552* [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 of December 13, 2016]. [In Russian]
3. *Ob utverzhdenii tekhnologicheskikh pokazatelej nailuchshikh dostupnykh pokazatelej v sfere ochistki stochnykh vod s ispol'zovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poselenij ili gorodskikh okrugov* [On the approval of technological indicators of the best available indicators in the field of wastewater treatment using centralized wastewater systems in settlements or urban districts]. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 15.09.2020 №1430* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 1430 of September 15, 2020]. [In Russian]
4. *Ochistka stochnykh vod s ispol'zovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poselenij, gorodskikh okrugov* [Wastewater treatment using centralized wastewater disposal systems in settlements, urban districts]. *Informats.-tekhnich. sprav. po NDT* [Information and technical guide to the best available technologies]. Moscow. *Bjuro NDT* [Bureau of the Best Available Technologies]. 2019. [In Russian]
5. N.A. Zaletova. *Ochistka gorodskikh stochnykh vod ot biogennykh veshhestv (soedinenij azota i fosfora)* [Purification of urban wastewater from biogenic substances (compounds of nitrogen and phosphorus)]. *Thesis of Doctor of Technical Sciences in specialty No. 05.23.04*. Moscow. *NII KVOV* [Research Institute of Communal Water Supply and Water Purification]. 1999. 399 p. [In Russian]
6. L.H. Lötter, A.R. Pitman. Improved biological phosphorus removal resulting from the enrichment of reactor feed with fermentation products. *Water Science Technology*. 1992. Vol. 26. No. 5–6. Pp. 943–953.
7. D. Mamais, D. Jenkins. The effects of MCRT and temperature on enhanced biological phosphorus removal. *Water Science Technology*. 1992. Vol. 26. No. 5–6. Pp. 955–965.
8. N.S. Zhmur. *Prefermentatsiya kak metod uluchsheniya svojstv aktivnogo ila i intensivifikatsii protsessa glubokogo izvlechenija soedinenij azota i fosfora* [Prefermentation as a method for improving the properties of activated sludge and intensifying the process of deep extraction of nitrogen and phosphorus compounds]. *Vodosnabzhenie i kanalizatsiya* ["Water supply and sewerage" Magazine]. 2012. No. 1–2. Pp. 18–31. [In Russian]
9. M.N. Kozlov, O.V. Khar'kina, A.N. Pakhomov, S.A. Strel'tsov, M.G. Khamidov, B.A. Yershov, N.A. Belov. *Opyt jekspluatatsii sooruzhenij biologicheskoy ochistki stochnykh vod ot soedinenij azota i fosfora* [Experience in the operation of facilities for biological wastewater treatment from nitrogen and phosphorus compounds]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tekhnika* ["Water Supply and Sanitary Engineering" Magazine]. 2010. No. 10. Pp. 35–41. [In Russian]
10. V.L. Mirgorodskij, Ju.E. Miller, A.I. Knysh. *Primenenie fermentirovannogo osadka dlja ochistki stochnykh vod ot biogennykh jelementov* [The use of fermented sludge for wastewater treatment from biogenic elements]. *Sovremennye tekhnologii ratsional'nogo prirodopol'zovaniya i zashhita okruzhajushhej sredy. Jekologija osobo okhranjaemykh territorij* [Modern technologies for environmental management and environmental protection. Ecology of specially protected territories]. *Jekologicheskie problemy regiona i puti ikh razresheniya: Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Environmental problems of the region and ways to solve them: International scientific and practical conference]. May 15–16, 2018. Omsk: *OmGAU* [Stolypin Omsk State Agrarian University]. 2018. Pp. 238–242. [In Russian]