

УДК 628.355

О. С. Дубовик, Р. М. Маркевич

Белорусский государственный технологический университет

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ BIOTEХНОЛОГИЙ УДАЛЕНИЯ
АЗОТА И ФОСФОРА ИЗ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД**

Изложены теоретические основы удаления из сточных вод соединений азота, основанные на процессах аммонификации, нитрификации и денитрификации, а также более современное направление – ANAMMOX-технология, отмечены условия, благоприятствующие каждому процессу. Указана необходимость чередования анаэробноаэробного и аэробноанаэробного и другие условия, необходимые для удовлетворительного протекания биологической дефосфотации. Проведен обзор современных направлений совершенствования биотехнологий очистки городских сточных вод от соединений азота и фосфора.

Одним из направлений повышения эффективности биологической дефосфотации считается увеличение содержания летучих жирных кислот. Это обеспечивается предварительной ацидофикацией сырого осадка либо размещением загрузки в анаэробной и аноксидной зонах.

Важным фактором повышения степени очистки сточных вод с одновременным снижением энергетических затрат является предварительный контакт исходных сточных вод с циркуляционным активным илом в условиях аэрации.

С целью снижения энергетических затрат на очистку сточных вод предложены ступенчатая денитрификация и технология с карусельной зоной. Реализация в одном объеме нитрификации и денитрификации упрощает инженерное оформление, гибкая адаптивная система расположения блоков позволяет получить лучшие результаты очистки.

Использование повышенных доз активного ила и прикрепленных микроорганизмов, применение мембранных методов позволяет существенно увеличить производительность сооружений при уменьшении их объема.

Ключевые слова: аммонификация, нитрификация, денитрификация, биологическая дефосфотация, ацидофикация, энергосбережение, иммобилизация, мембрана.

O. S. Dubovik, R. M. Markevich

Belarusian State Technological University

**BIOTECHNOLOGICAL ADVANCEMENT OF NITROGEN
AND PHOSPHORUS REMOVAL FROM CITY SEWAGE**

The present report discusses the theoretical basis of nitrogen removal from wastewater, based on the processes of ammonification, nitrification, denitrification, and on a more recent direction called ANAMMOX-technology. The necessary conditions for this processes are considered. Biological phosphorus removal from wastewater through the proper use of microorganisms under different environmental conditions is noted. In this paper the recent advances of process design and operational optimization for nutrients removal are reviewed.

Increasing volatile fatty acids is the main direction for higher efficiency of biological removal phosphorus. Products fermentation of primary sludge or feeding in anaerobic and anoxic zones is used for increase of volatile fatty acids.

An important factor in increasing the degree of wastewater treatment with simultaneous lowering of energy costs is preliminary contact of initial sewage to circulating active silt in the conditions of aeration. It has been suggested to use a step feed denitrification and technology with cycling zones for lowering the energy consumption.

Anaerobic, anoxic and oxic zones were designed and constructed in a single reactor. Although the volume of the reactor was limited and the capability of the process in this reactor was reliable, it has a very good efficiency for removing phosphorus from raw wastewater.

The high MLSS of activated sludge, fixed microorganisms and application membrane technology are used for significantly increase of the capacity of plants while reducing their volume.

Key words: ammonification, nitrification, denitrification, biological phosphorus removal, acidification, lower energy consumption, immobilization, membrane.

Введение. Эвтрофикация природных водоемов признана одной из наиболее серьезных проблем для здоровья животных и человека:

токсины, выделяемые цианобактериями при цветении водоемов, являются опасными ядами, поражающими иммунную систему. Основной

причиной загрязнения водоемов азотом и фосфором является сброс муниципальных (городских) и промышленных сточных вод, кроме того, источником этих элементов является сельское хозяйство (удобрения, отходы животноводства) [1–4].

В Беларуси ежегодно со сточными водами в реки сбрасывается 5390 т азота аммонийного, 200 т азота нитритного и 1120 т фосфора фосфатного. В результате в большинстве рек на территории республики среднегодовые концентрации азота аммонийного и фосфора фосфатного превышают ПДК [5].

С середины 80-х годов прошлого столетия в США, ЕС, Японии, Канаде и других развитых странах началось проведение мероприятий по предотвращению эвтрофикации водоемов. С одной стороны, осуществлялся переход на использование альтернативных, не содержащих фосфатов, моющих средств, что позволяет снизить содержание общего фосфора в сточных водах городских очистных сооружений на 30–40%. С другой стороны, внедрялись технологии глубокого удаления соединений азота и фосфора из сточных вод [1, 6].

Очистные сооружения канализации в Беларуси преимущественно построены в 70–80-е годы прошлого столетия, в основном они проектировались на полное окисление органических загрязняющих веществ с последующей нитрификацией. Глубокое удаление соединений азота и фосфора на таких сооружениях не может быть достигнуто [2]. В последнее время на очистных сооружениях республики все большее распространение находят технологические схемы, основанные на чередовании зон, предназначенных для одновременного протекания процессов нитри-денитрификации и биологической дефосфотации.

Основная часть. Биологическая очистка сточных вод от азота и фосфора, основанная на процессах аммонификации, нитри-денитрификации (деаммонификации) и дефосфотации, признана в настоящее время наиболее экономичной и экологичной.

Биологическое удаление из сточных вод азота заключается в протекании процессов аммонификации (разложении органических азотсодержащих соединений до неорганических аммонийных), нитрификации (двухстадийном окислении аммонийных соединений азота сначала до нитритов, затем до нитратов) и денитрификации (бактериальном восстановлении нитратного азота до молекулярного, сопровождающемся окислением органических веществ). При этом экономится кислород, поскольку часть органических веществ окисляется не растворенным кислородом, а кислородом нитратов.

Биологическая очистка сточных вод от соединений фосфора происходит благодаря его удалению с биомассой избыточного активного ила, в составе которого присутствуют бактерии, способные накапливать фосфор в виде полифосфатов в гранулах волютина, причем количество аккумулированного фосфора значительно превышает потребности самих бактерий.

Процессы нитрификации, денитрификации и биологической дефосфотации в той или иной степени имеют место на традиционных сооружениях биологической очистки (в аэротенках), однако в таких сооружениях для них требуются разные условия, порой противоречивые.

Для обеспечения интенсивного протекания процессов нитри-денитрификации и биологической дефосфотации сооружение для биологической очистки разделяют на зоны с различным уровнем аэрации (анаэробная, аноксидная, аэробная). В указанных зонах должны быть созданы условия, благоприятствующие соответствующему процессу.

На интенсивность протекания нитрификации оказывают влияние температура, концентрация аммонийного азота и кислорода, значение pH, наличие ингибиторов. Денитрификация зависит от концентрации нитратного азота, субстрата, который является источником энергии, концентрации кислорода, значения pH, температуры. Субстрат должен быть легкоокисляемым, он может быть внутренним (сами сточные воды, фугат от обезвоживания избыточного ила, надильная жидкость от илоуплотнителей) или внешним (наиболее распространены метанол и уксусная кислота). Необходимыми условиями биологической дефосфотации являются чередование анаэробных и аэробных условий, наличие легкодоступного субстрата [7].

Ввиду многовариантности состава сточных вод, условий очистки и требуемых результатов разработано большое количество технологических схем, их модификаций, моделей, описывающих протекающие процессы [8–11].

Автотрофный процесс Анаммокс. В мировой практике все большее распространение находят технологии, основанные на способности автотрофных бактерий окислять аммонийный азот, используя нитриты в качестве акцептора электронов, – так называемый Анаммокс-процесс (Anammox – Anaerobic ammonium oxidation). Данный процесс осуществляют специфические бактерии, которые относятся к филогенетической группе эубактерий Planctomycetes.

В результате этого процесса образуется молекулярный азот, а существенным отличием является отсутствие потребности в каком-либо органическом субстрате, что чрезвычайно важно для очистки от азота сточных вод, обеднен-

ных органическими загрязнениями. Для реализации Анаммокс-процесса с целью удаления аммонийного азота необходимо часть его окислить до нитритов [12, 13]. Такие технологии эффективны для очистки сточных вод с высокими концентрациями аммония, в том числе для очистки возвратных потоков сточных вод после обезвоживания сброженного осадка. В настоящее время в Европе и США функционирует (либо строится) около 40 очистных сооружений, использующих технологию автотрофного окисления аммония [14–16].

Особенностью процесса Анаммокс является очень низкая скорость роста бактерий и обусловленная этим необходимость удержания их в биореакторе. Для достижения этой цели используют различные приемы: закрепление бактерий на загрузке [17]; гравитационное или центробежное осаждение ила; подача в биореактор сточных вод, не содержащих органических веществ, с целью предотвращения развития гетеротрофных микроорганизмов; удержание бактерий, осуществляющих Анаммокс-процесс, за счет адгезии на внутренней поверхности реактора и образования флотационной пены [18].

Ацидификация сырого осадка и сточных вод с целью увеличения содержания летучих жирных кислот. В качестве основной причины нестабильности процесса биологического удаления фосфора отмечается низкое содержание и существенное колебание концентрации легкоокисляемых органических соединений в поступающих сточных водах. Низкое соотношение концентраций органических веществ и аммонийного азота, а также фосфора фосфатного затрудняет использование при очистке сточных вод в России и Беларуси технологических решений, принятых в Западной Европе и США.

Увеличить содержание легкоокисляемых органических веществ в поступающих на биологическую очистку сточных водах можно путем подачи их в аэротенк без предварительного отстаивания либо подачей в анаэробную зону химических соединений (метанола, уксусной кислоты). Такие мероприятия приводят к росту энергетических или эксплуатационных затрат.

Использование ацидификации (преферментации) сырого осадка позволяет увеличить содержание летучих жирных кислот в поступающих на биологическую очистку сточных водах, после чего сточные воды, обогащенные летучими жирными кислотами, подаются в анаэробную зону. Такая технология внедрена на Люберецких очистных сооружениях Москвы в 2009 г. Для реализации данной технологии изменены эксплуатационные режимы первичных отстойников: часть отстойников выполняет

функцию осветления сточной воды, другая часть переведена в режим уплотнения сырого осадка. Сливная вода с отстойников-уплотнителей, содержащая продукты ацидификации, совместно с осветленной водой направляется в аэротенк, при этом содержание летучих жирных кислот в воде увеличивается с 17–22 до 25–30 мг/дм³. Внедрение ацидификации сырого осадка позволило повысить стабильность работы аэротенков и обеспечить следующие показатели качества очищенных сточных вод [19].

Новым способом является организация процесса ацидификации в первой анаэробной зоне аэротенка. Там при отсутствии перемешивания иловой смеси формируется уплотненный слой активного ила, что сопровождается преферментацией сорбированного на иле органического вещества. При этом анаэробная зона продолжает выполнять свою основную функцию, связанную с высвобождением фосфатов за счет потребления летучих жирных кислот фосфораккумулирующими бактериями. Увеличение содержания летучих жирных кислот в иловой смеси в анаэробной зоне способствует более стабильному удалению фосфатов из очищаемых сточных вод. По сравнению с проведением ацидификации в отстойниках такая организация процесса более экономична, поскольку нет необходимости строительства или реконструкции дополнительных емкостей (отстойников, преферментаторов) и экономятся затраты на перемешивание [20].

С целью интенсификации процесса ацидификации в анаэробной и аноксидной зонах размещается плоскостная загрузка. При размещении загрузки в анаэробной зоне на ней вырастает биопленка специфического микробного ценоза, которая содержит преимущественно анаэробные гетеротрофные бактерии, адаптированные к поступающим в зону органическим веществам и обеспечивающие их быструю деструкцию. Высокая устойчивость прикрепленных микроорганизмов к неблагоприятным воздействиям, связанным с изменениями характеристик поступающих стоков, увеличивает стабильность процесса ацидификации и уменьшает риск срыва процесса биологической дефосфотации.

Предложена методика определения ацидификационного потенциала сточных вод и сырого осадка [21].

Технологическая схема с биокоагулятором. В соответствии с данной технологией первым сооружением в схеме является биокоагулятор, где исходные сточные воды контактируют с циркулирующим активным илом в условиях аэрации, после чего иловая смесь поступает в первичный отстойник. Осветленные воды из

первичного отстойника направляются в денитрификатор, а поток активного ила сначала проходит обработку в анаэробном биореакторе, затем также подается в денитрификатор. Таким образом, в данной схеме анаэробные условия, необходимые для биологического удаления фосфора, создаются не в иловой смеси, а в потоке активного ила [22].

Значительный выигрыш в энергии получается, если основная масса органических загрязнений, выделенная из сточных вод до аэробной очистки, направляется в метантенк и используется для производства биогаза [14].

Варианты реализации нитрификации и денитрификации. Одним из направлений совершенствования технологических схем для удаления азота и фосфора является система ступенчатой подачи сточных вод для денитрификации, не требующая рециркуляции, а значит, установки дополнительных насосов или мешалок. Согласно этой системе, сточные воды подаются в два или более реакторов, имеющих зону перемешивания и зону аэрации. Возвратный ил и часть сточных вод поступают в зону перемешивания, а затем в зону аэрации первого реактора. В зону перемешивания второго реактора подаются иловая смесь из зоны аэрации первого реактора и вторая часть сточных вод. Из этой зоны иловая смесь направляется в зону аэрации второго реактора. В зависимости от установившегося режима зоны перемешивания могут быть аноксидными или анаэробными. Эффективность удаления азота и фосфора зависит от стабильности режима перемешивания.

Кроме обеспечения эффективного удаления азота и фосфора уделяется внимание минимизации энергетических затрат при внедрении новых технологий. Из двух коридоров аэротенка устраивают карусельную зону, предназначенную для протекания процессов нитри- и денитрификации. Применение карусели позволяет уменьшить количество мешалок, необходимых для поддержания активного ила во взвешенном состоянии, и снизить энергетические затраты.

Процессы нитрификации и денитрификации могут быть реализованы в одном и том же объеме свободноплавающим илом. Это упрощает инженерное оформление, но связано с уменьшением существующих мощностей на 25–30%. Кроме того, для реализации процессов нитриденитрификации в одном объеме биореактора требуется строгое регулирование концентрации растворенного кислорода, т. е. необходима специальная контрольно-измерительная аппаратура и автоматизация управления [23].

Концентрирование биомассы активного ила, применение иммобилизации. При реализа-

ции процессов совместного биологического удаления азота и фосфора требуется большее время пребывания сточных вод в сооружениях биологической очистки, что ведет к необходимости увеличения их объема на 20–30%. Кроме того, вследствие возрастания илового индекса должно быть увеличено количество вторичных отстойников. Это вызывает необходимость разработки технологий, обеспечивающих эффективность очистки сточных вод от биогенных элементов без увеличения объемов сооружений, в частности за счет увеличения дозы активного ила.

Путем селекции достигнута доза ила 6,5–7,0 мг/дм³ и значение илового индекса 80–90 см³/г, хлопья ила имели компактную форму, нитчатые бактерии практически отсутствовали. В лабораторных и промышленных испытаниях показана высокая эффективность удаления азота аммонийного и фосфора фосфатного при использовании повышенных доз активного ила [24].

Приемлемым является метод концентрирования биомассы путем комбинации в реакторах биологической очистки взвешенных и прикрепленных на инертных носителях форм микроорганизмов. Вследствие значительного повышения концентрации и возраста активной биомассы в очистной системе, а также создания различных кислородных условий в толще прикрепленной биологической пленки технология с иммобилизацией микробного биоценоза обеспечивает: высокую окислительную мощность сооружений очистки и значительное сокращение их объема и ресурсозатрат; возможность эффективного протекания в одном объеме как процессов биодеструкции органических загрязняющих веществ, так и процессов нитри-денитрификации и биологического удаления соединений фосфора; повышение надежности и стабильности работы биосистемы и минимизацию явлений вспухания активного ила [25–27].

В качестве способа обогащения активного ила нитрифицирующими бактериями предложено использование реактора-биоаугментатора. При непродолжительной аэрации смеси возвратного активного ила и сливной воды илоуплотнителей сброженного осадка наращивается биомасса бактерий-нитрификаторов [28].

Мембранные методы. При строительстве новых и реконструкции уже существующих очистных сооружений предлагается ряд принципиально новых решений, самым технически доступным из которых на сегодняшний день является мембранный биореактор (МБР). Использование МБР позволяет повысить эффективность и надежность функциониро-

вания очистных сооружений, увеличить их производительность, сократить занимаемые площади, снизить объем избыточного активного ила.

Основным отличием мембранного биореактора от систем традиционной биологической очистки в аэротенках является наличие мембранного модуля, который предназначен для разделения иловой смеси и представляет собой альтернативу широко применяемому методу

осаждения активного ила во вторичных отстойниках [29].

Заключение. Проведен аналитический обзор современных способов совершенствования биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора. Основные направления совершенствования – снижение энергетических затрат, уменьшение объема сооружений при обеспечении высокой эффективности удаления соединений азота и фосфора.

Литература

1. Жмур Н. С. Практика глубокого удаления соединений азота и фосфора в процессе биологической очистки сточных вод в странах Европейского союза и в России (по материалам отчета Европейской комиссии и результатам обследования очистных сооружений) // Водоснабжение и канализация. 2010. № 5–6. С. 31–41.
2. Gerardi M. H. Wastewater microbiology: nitrification/denitrification in the activated sludge process. New York: John Wiley and Sons, 2002. P. 5–6.
3. Quevauviller P., Thomas O., van der Beken A. Wastewater Quality Monitoring and Treatment. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. 8 p.
4. Pankratz T. M. Environmental engineering dictionary and directory. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001. 100 p.
5. Состояние окружающей среды Республики Беларусь: нац. доклад / М-во природ. ресур. и окружающей среды Республики Беларусь, Ин-т природопользования НАН Беларуси. Минск, 2010. URL: http://www.minpriroda.gov.by/uploads/files/000597_79443_part_0.pdf. (дата обращения: 09.02.2016).
6. Water and wastewater treatment technology. Molecular technology, nutrient removal, sludge reduction and environmental health / T. Matsuo [et al.]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science B. V., 2001. 139 p.
7. Worakatas R. Effects of high temperature and low carbon feed on biological phosphorus removal. M. Sc. thesis (environmental technology). Mahidol university, Thailand, 2008. 103 p.
8. Соловьева Е. А. Совершенствование технологии удаления азота и фосфора в комплексе по очистке сточных вод и обработке осадка: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.04. Санкт-Петербург, 2009. С. 38.
9. Public works technical bulletin. Biological nutrient removal: [site] Washington. URL: https://www.wbdg.org/ccb/ARMYCOE/PWTB/pwtb_420_49_39.pdf (дата обращения 19.02.2016).
10. Neymann Y. A theory of the lifecycle of bacteria // Nature and Science. 2010. No. 8 (9). P. 121–131.
11. Внедрение модернизированных технологий удаления биогенных элементов на очистных сооружениях г. Москвы / С. А. Стрельцов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 10. С. 34–42.
12. Mixed sulfur-iron particles packed reactor for simultaneous advanced removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent / S. Wang [et al.] // Environ. Sci. Pollut. Res. 2015. No. 22 (1). P. 415–424.
13. Ganigué P. R. Partial nitritation of landfill leachate in a SBR prior to an anammox reactor: operation and modeling. PhD thesis. Universitat de Girona, Catalonia. 2009. P. 143.
14. Ванюшина А. Я., Ветт Б., Хелл М. Лучшие примеры эксплуатации очистных сооружений: г. Штрасс (Австрия) // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2014. № 1. С. 36–47.
15. Syntrophy of aerobic and anaerobic ammonia oxidizers / B. Wett [et al.] // Water Science & Technology. 2010. No. 61 (8). P. 1915–1922.
16. Wett B. Development and implementation of a robust deammonification process // Water Science & Technology. 2007. № 56 (7). P. 81–88.
17. Биотехнология очистки сточных вод с иммобилизацией активного ила и удалением азота / М. Г. Зубов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 8. С. 72–75.
18. Однореакторная технология удаления азота из сточных вод / М. Н. Козлов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 5. С. 53–59.
19. Опыт эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора / А. Н. Пахомов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 10, ч. 1. С. 35–41.
20. Келль Л. С. Внедрение технологии биологической дефосфотации УСТК // Экология производства. 2011. № 5. С. 75–77.

21. Ацидификационный потенциал поступающей сточной воды и сырого осадка московских очистных сооружений / М. В. Кевбрина [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 10. С. 68–70.
22. Степанов А. С. Удаление биогенных элементов из городских сточных вод // Водоочистка. 2010. № 8. С. 46–56.
23. Очистка сточных вод: пер. с нем. / под ред. Ф. В. Кармазинова. СПб.: Новый журнал, 2013. 496 с.
24. Харькина О. В., Шотина К. В. Исследование работы аэротенков нитри-денитрификации с повышенными дозами активного ила // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 10, ч. 1. С. 42–47.
25. Determination of design criteria of an h-ifas reactor in comparison with an extended aeration activated sludge process / N. Mehrdadi [et al.] // Environ. Health. Sci. Eng. 2006. Vol. 3, No. 1. P. 61–62.
26. Wastewater treatment using a modified A2O process based on fiber polypropylene media / M. L. Tien [et al.] // Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2011. Vol. 46, No. 10. P. 1068.
27. Использование блоков биологической загрузки на сооружениях очистки сточных вод / В. Н. Швецов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 10, ч. 2. С. 25–31.
28. Повышение эффективности очистки сточных вод методом обогащения активного ила нитрифицирующими бактериями / С. А. Стрельцов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 12. С. 56–61.
29. D21 – Nutrient elimination trials. URL: <https://www.hitpages.com/doc/4699062280388608/2#pageTop/> (дата обращения 19.02.2016).

References

1. Zhmur N. S. Practice of higher removal of nitrogen and phosphorus compounds in the process of biological wastewater treatment in the European Union and in Russia (based on the report of the European Commission and a survey of treatment facilities). *Vodosnabzhenie i kanalizatsiya* [Water supply and sewerage], 2010, no. 5–6, pp. 31–41 (In Russian).
2. Gerardi M. H. Wastewater microbiology: nitrification/denitrification in the activated sludge process. New York, John Wiley & Sons Publ., 2002, pp. 5–6.
3. Quevauviller P., Thomas O. and van der Beken A. Wastewater Quality Monitoring and Treatment. Chichester, John Wiley & Sons Publ., 2006, 8 p.
4. Pankratz T. M. Environmental engineering dictionary and directory. Boca Raton, CRC Press LLC, Publ., 2001. 100 p.
5. *Sostoyaniye okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus'* [State of the Environment of the Republic of Belarus], 2010 (In Russian). Available at: http://www.minpriroda.gov.by/uploads/files/000597_79443_part_0.pdf (accessed 09.02.2016).
6. Matsuo T., Hanaki K., Takizawa S., Saton H. water and wastewater treatment technology. Molecular technology, nutrient removal, sludge reduction and environmental health. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Science B.V, Publ., 2001, 139 p.
7. Worakatas R. Effects of high temperature and low carbon feed on biological phosphorus removal. M. Sc. thesis (environmental technology). Mahidol university, Thailand, 2008. 103 p.
8. Solov'eva E. A. *Sovershenstvovanie tekhnologii udaleniya azota i fosfora v komplekse po ochistke stochnykh vod i obrabotke osadka; avtoref. dis. dok. tekhn. nauk* [Improving the technology of removal nitrogen and phosphorus in the complex wastewater treatment and sludge treatment. Abstract of thesis Doct. Dis.]. St. Petersburg, 2009, p. 38 (In Russian).
9. Public works technical bulletin. Biological nutrient removal. Washington. Available at: https://www.wbdg.org/ccb/ARMYCOE/PWTB/pwtb_420_49_39.pdf/ (accessed 19.02. 2016).
10. Heymann Y. A theory of the lifecycle of bacteria. *Nature and Science*, 2010, no. 8 (9), pp. 121–131.
11. Strel'tsov S. A., Kazakova E. A., Kevbrina M. V., Kozlov I. M., Moyzhes S. I. The introduction of the modernized technology nutrient removal in wastewater treatment plants in Moscow. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sewerage], 2012, no.10, pp. 34–42 (In Russian).
12. Wang S., Liang P., Wu Z., Su F., Yuan L., Sun Y., Wu Q., Huang X. Mixed sulfur-iron particles packed reactor for simultaneous advanced removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2015, no. 22 (1), pp. 415–424. DOI 10.1007/s11356-014-3370-1.
13. Ganigué P. R. Partial nitritation of landfill leachate in a SBR prior to an anammox reactor: operation and modeling. PhD thesis. Universitat de Girona, Catalonia, 2009. 143 p.
14. Vanyushina A. Ya., Vett B., Khell M. The best examples of operation of wastewater treatment facilities: city Strass (Austria). *Nailuchshie dostupnyye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [The best technologies is available for water supply and sewerage], 2014, no. 1, pp. 36–47 (In Russian).

15. Wett B., Hell M., Nyhuis G., Puempel T., Takacs I., Murthy S. Syntrophy of aerobic and anaerobic ammonia oxidizers. *Water Science & Technology*, 2010, no. 61 (8), pp. 1915–1922.
16. Wett B. Development and implementation of a robust deammonification process. *Water Science & Technology*, 2007, no. 56 (7), pp. 81–88.
17. Zubov G. M., Boyarenev S. F., Zavarzin G. A., Zubov M. G., Kulikov N. I., Litti Y. V., Nekrasova V. K., Nozhevnikova A. N., Shramov Y. M. Biotechnology of wastewater treatment with activated sludge immobilization and removal of nitrogen. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2013, no. 8, pp. 72–75 (In Russian).
18. Kozlov M. N., Kevbrina M. V., Nikolaev Yu. A., Dorofeev A. G., Grachev V. A., Kazakova E. A., Aseeva V. G., Zharkov A. V. One-step nitrogen removal technology from waste water. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2014, no. 5, pp. 53–59 (In Russian).
19. Pakhomov A. N., Belov N. A., Ershov B. A., Kozlov M. N., Strel'tsov S. A., Khamidov M. G., Khar'kina O. V. Experience in operating facilities of biological wastewater treatment from nitrogen and phosphorus compounds. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2010, no. 10, part 1, pp. 35–41 (In Russian).
20. Kell' L. S. The introduction of biological phosphorus removal in UCTK. *Ekologiya proizvodstva* [Technology of ecology], 2011, no. 5, pp. 75–77 (in Russian).
21. Kevbrina M. V., Kazakova E. A., Kozlov I. M., Moyzhes S. I., Strel'tsov S. A. Potential acidification for influent wastewater and primary sludge in wastewater treatment facilities in Moscow. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2012, no. 10, pp. 68–70 (In Russian).
22. Stepanov A. S. Nutrient removal from domestic wastewater treatment. *Vodoochistka* [Water treatment], 2010, no. 8, pp. 46–56 (In Russian).
23. Wastewater treatment: translated from German, ed. by Karmazina F. V. *Novyy zhurnal* [New magazin], 2013, 496 p. (In Russian).
24. Har'kina O. V., Shotina K. V. Research work of aeration tank with nitrification-denitrification with higher concentration of activated sludge. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2010, no. 10, part 1, pp. 42–47 (In Russian).
25. Mehrdadi N., Azimi A. A., Nabi Bidhendi G. R., Hooshyari B. Determination of design criteria of an h-ifas reactor in comparison with an extended aeration activated sludge process. *Environ. Health. Sci. Eng.*, 2006, vol. 3, no. 1, pp. 61–62.
26. Tien M. L., Hung V. D., Nguyen D. D., Soobin Y., Hur J. Wastewater treatment using a modified A2O process based on fiber polypropylene media. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2011, vol. 46, no. 10, p. 1068. DOI: 10.1080/10934529.2011.590382.
27. Shvetsov V. N., Morozova K. M., Smirnova I. I., Semenov M. Yu. Using blocks of biological loading on the wastewater treatment plants. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sewerage], 2010, no. 10, part 2, pp. 25–31 (In Russian).
28. Strel'tsov S. A., Nikolaev Yu. A., Grachev V. A., Aseeva V. G., Mikhaylova Yu. V. Improving the efficiency of wastewater treatment by activated sludge with enrichment nitrifying bacteria. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2014, no. 12, pp. 56–61 (In Russian).
29. D21 – Nutrient elimination trials. Available at: <https://www.hitpages.com/doc/4699062280388608/2#pageTop/> (accessed 19.02.2016).

Информация об авторах

Дубовик Ольга Сергеевна – ведущий инженер-технолог Минских очистных сооружений. УП «Минскводоканал» (220088, г. Минск, ул. Пулихова, 15, Республика Беларусь). E-mail: dubovik.volha@gmail.com

Маркевич Раиса Михайловна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии и биоэкологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Markevich@belstu.by

Information about the authors

Dubovik Olga Sergeevna – leading engineer technologist, Minsk Wastewater Treatment Plant. UE “Minskvodokanal” (15, Pulihova str., 220088, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dubovik.volha@gmail.com

Markevich Raisa Mikhaylovna – PhD (Chemistry), Assistant Professor, Assistant Professor, Department of Biotechnology and Bioecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Markevich@belstu.by

Поступила 23.02.2016