

*Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 6 (146). С. 159-173. ISSN 1998-8443 (print)*

*Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2023. Issue 6 (146). P. 159-173. ISSN 1998-8443 (print)*

Научная статья

УДК 628.543

doi: 10.17122/ntj-oil-2023-6-159-173

EDN: UETTVC

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БИОГАЗОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «BIOGAS NORD» ПУТЁМ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ СХЕМЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЖИВОТНОВОДЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Евгений Аронович Урецкий<sup>1</sup>, Илья Викторович Николенко<sup>2</sup>,  
Владимир Валентинович Мороз<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный проектный институт, Витебск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Республика Крым, Россия

<sup>3</sup>Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь

<sup>1</sup>euretsky@yandex.by

<sup>2</sup>nikoshi@mail.ru

<sup>3</sup>vovavall@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: **Илья Викторович Николенко**, nikoshi@mail.ru

**Аннотация.** На животноводческих, свиноводческих и птицеводческих фермах образуется большое количество органических отходов, которые представляют серьёзную экологическую опасность для окружающей природной среды. Радикальный вариант решения данной проблемы - использование для переработки органических отходов на животноводческих фермах нетрадиционных технологий, суть которых заключается в превращении этих отходов в тепловую или электрическую энергию. Одна из известных и широко применяемых за рубежом нетрадиционных технологий - это ис-

пользование первичных или вторичных отходов животноводческих комплексов в качестве источников возобновляемой энергии. В Республике Беларусь построено и эксплуатируется большое количество животноводческих комплексов, основанных на применении прогрессивных поточных технологий производства мяса. Применяемое при этом гидросмывное удаление навоза из животноводческих помещений привело к образованию значительных объемов высококонцентрированных сточных вод, а также жидкого навоза, твердого навоза и навозной жижи. Эти отходы представляют серьёзную

экологическую опасность для окружающей природной среды. Основной формой их утилизации является полив, причём без всякой предварительной очистки и дезинфекции. Анализ действующих в Республике Беларусь очистных сооружений животноводческих комплексов показал, что в республике практически отсутствуют не только эффективные очистные сооружения сточных вод подобных комплексов, но и технологии переработки осадков. Биогазовые технологии являются одними из основных современных способов утилизации органических отходов животного происхождения за счет получения биогаза (газообразного топлива) и экологически чистых органических удобрений. Такие технологии позволяют комплексно решать проблему энергетики, агрохимии и экологии.

В статье рассмотрена радикальная реконструкция проектных отстойников, которая повысила производительность существующей биогазовой установки с 200 до 1000 кВт, а дополнение технологической схемы блоком связывания ингибитора биологических процессов избыточного аммония в  $MgNH_3PO_4 \cdot 6H_2O$  (магнийамонийортофосфат-струвит) позволило не только значительно улучшить процесс биологической очистки сточных вод, а также получить комплексное удобрение, пригодное под все сельскохозяйственные культуры. Радикальная реконструкция технологической схемы повысила эффективность очистки сточных вод до предельно-допустимой концентрации (ПДК), позволяющей их сброс в водные объекты.

---

---

**Ключевые слова:** биогаз, ферментёр, дображиватель, струвит, отстойники, ПДК, pH

---

---

**Для цитирования:** Урецкий Е. А., Николенко И. В., Мороз В. В. Совершенствование биогазового энергетического комплекса «BIOGAS NORD» путём рационализации схемы очистки сточных вод животноводческого комплекса // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 6 (146). С. 159-173. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-6-159-173>.

Original article

## BIOGAS ENERGY COMPLEX «BIOGAS NORD» IMPROVEMENT BY RATIONALIZING THE WASTEWATER TREATMENT SCHEME OF THE LIVESTOCK COMPLEX

Evgeny A. Uretsky<sup>1</sup>, Ilya V. Nikolenko<sup>2</sup>, Vladimir V. Moroz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State Design Institute, Vitebsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea Republic, Russia

<sup>3</sup>Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

<sup>1</sup>euretsky@yandex.by

<sup>2</sup>nikoshi@mail.ru

<sup>3</sup>vovavall@mail.ru

Corresponding author: Ilya V. Nikolenko, nikoshi@mail.ru

**Abstract.** Livestock, pig and poultry farms generate large amounts of organic waste, which pose a serious hazard to the environment. A radical solution to this problem is the use of non-traditional technologies for treating organic waste on livestock farms, aimed at converting this waste into thermal or electrical energy. One of the well-known and widely used non-traditional technologies abroad is the use of primary or secondary waste from livestock farms as sources of renewable energy. In the Republic of Belarus, a large number of livestock breeding complexes have been built and operated, based on the use of progressive flow technologies for meat production. The hydroflush removal of manure from livestock buildings used in this case led to the formation of significant volumes of highly concentrated wastewater, as well as liquid manure, solid manure and slurry. These wastes pose a serious hazard to the natural environment. The main form of their disposal is watering, without any preliminary treating and disinfection. An analysis of the treatment facilities of livestock complexes operating in the Republic of Belarus showed that in the republic there are practically

no not only effective wastewater treatment facilities for such complexes, but also technologies for sludge processing. Biogas technologies are one of the main modern methods of recycling organic waste of animal origin using the production of biogas (gaseous fuel) and environmentally friendly organic fertilizers. Such technologies make it possible to comprehensively solve the problem of energy, agrochemistry and ecology.

The article discusses the radical reconstruction of the design settling tanks, which increased the productivity of the existing biogas plant from 200 to 1000 kW, and the addition of the technological scheme with a block for binding an inhibitor of biological processes of excess ammonium in  $MgNH_3PO_4 \cdot 6H_2O$  (magnesium ammonium orthophosphate - struvite) not only made it possible to significantly improve the process of biological wastewater treatment, and also obtain a complex fertilizer suitable for all crops. A radical reconstruction of the technological scheme increased the efficiency of wastewater treatment to the maximum permissible concentration, allowing its discharge into water bodies.

---

---

**Keywords:** biogas, fermenter, fermentation, struvite, settling tanks, maximum permissible concentration, pH

---

---

**For citation:** Uretski Ya. A., Nikolenko I. V., Moroz V. V. Sovershenstvovanie biogazooego energeticheskogo kompleksa «BIOGAS NORD» putem ratsionalizatsii skhemy ochistki stochnykh vod zhivotnovodcheskogo kompleksa [Biogas Energy Complex «BIOGAS NORD» Improvement by Rationalizing the Wastewater Treatment Scheme of the Livestock Complex]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2023, Issue 6 (146), pp. 159-173. [in Russian]. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-6-159-173>.

#### *Введение*

На животноводческих, свиноводческих и птицеводческих фермах образуется боль-

шое количество органических отходов, которые представляют серьёзную экологическую опасность для окружающей природной среды. Радикальный вариант решения данной

проблемы - использование для переработки органических отходов на животноводческих фермах нетрадиционных технологий, суть которых заключается в превращении этих отходов в тепловую или электрическую энергию. Одна из известных и широко применяемых за рубежом нетрадиционных технологий - это использование первичных или вторичных отходов животноводческих комплексов в качестве источников возобновляемой энергии [1-3].

В Республике Беларусь (РБ) построено и эксплуатируется большое количество животноводческих комплексов, основанных на применении прогрессивных поточных технологий производства мяса. Применяемое при этом гидросмывное удаление навоза из животноводческих помещений привело к образованию значительных объемов высококонцентрированных сточных вод, а также жидкого навоза, твердого навоза и навозной жижи. Эти отходы представляют серьезную экологическую опасность для окружающей природной среды. Ежегодно животноводческие комплексы РБ вносят в окружающую среду 40-45 млн м<sup>3</sup> сточных вод [4]. Основной формой их утилизации является полив, причём безо всякой предварительной очистки и дезинфекции. Анализ действующих в РБ очистных сооружений животноводческих комплексов показал, что в республике практически отсутствуют не только эффективные очистные сооружения сточных вод подобных комплексов, но и технологии переработки осадков. Биогазовые технологии являются одними из основных современных способов утилизации органических отходов животного происхождения за счет получения биогаза (газообразного топлива) и экологически чистых органических удобрений. Такие технологии позволяют комплексно решать проблему энергетики, агрохимии и экологии.

#### *Материалы, методы исследования*

Современные способы утилизации отходов животного происхождения основаны на том, что в результате процесса их сбражива-

ния распаду подвергаются органические вещества, содержащиеся в навозе, с образованием газообразных продуктов в виде смеси 50-70 % метана и 30-50 % углекислого газа (биогаза) с теплотворной способностью 21-25 МДж/м<sup>3</sup>. Метановое сбраживание минерализует биогенные вещества (азот, фосфор, калий), практически без сброса их в окружающую среду. Биометаногенез позволяет перерабатывать органические вещества с более высокими нормами нагрузки, чем при аэробной их обработке, не требует применения химических реагентов для разложения органического вещества.

Анаэробная переработка позволяет не только покрывать затраты энергии на ведение процесса, но и получать ее избыточное количество. Получаемая энергия в виде биогаза удобна для пользователя, так как ее можно преобразовать в тепловую, электрическую и механическую энергию. Сброженный осадок, полученный в процессе переработки, лишен неприятного запаха и готов к непосредственному внесению в почву.

*Сырье для биогаза.* Чтобы получить сырье для биогаза можно использовать не только навоз животноводческих комплексов, но и пополнять его другими органическими отходами. Такими отходами могут быть: навоз других животных (коровий, овечий) и птичий помет; отходы овощных культур; некондиционный зерновой и овощной урожай; зерновая барда; отходы мясного и рыбного хозяйства; свекольный жом; отходы пиво- и молокозаводов; бытовые органические отходы; остатки от производства из рапса.

*Преимущества биогаза* Производство биогаза и его использование имеет множество обоснованных преимуществ, которые подтверждены мировой практикой. Наиболее весомые приоритеты: возобновляемая биомасса для производства электроэнергии и тепла, широкий ассортимент используемого сырья, универсальный способ энергетического применения, стабильное производство в течение года, снижение негативных факторов на окружающую среду, сокращение выброса в окружающую среду парниковых газов.

*Недостатки промышленного производства.* По отношению к традиционным способам получения электрической и тепловой энергии производство биогаза имеет недостатки: относительно низкая скорость переработки биомассы; при сгорании биогаза выделяется на 30 % меньше теплоты, по сравнению с топливом из нефти; процесс производства нуждается в сырье определенного качества; требуется наличие большого количества ферментов; при повышенном засеве сырья для биомассы нарушается экологическое равновесие территории.

Компания «Biogas Nord AG» (Германия) является всемирно известным лидером в сфере разработки биогазовых установок нового поколения мощностью от 500 кВт и выше. Сырьем для производства биогаза являются отходы пищевых производств, животноводческих хозяйств и т.п. Внедрение биогазовых установок позволяет не только значительно сократить расходы на энергию и повысить эффективность предприятия. Компанией введено в эксплуатацию около 200 промышленных биогазовых установок совокупной мощностью более 80 МВт в Германии, США, Великобритании, Италии, Франции, Испании, Нидерландах и других странах. При их внедрении используется принцип модульности, позволяющий легко наращивать их производительность.

*Анализ работы энергетического комплекса «BIOGAS NORD.* Упрощённая схема обработки сточных вод животноводческого комплекса СГЦ РУСП «Западный» показана на рисунке 1. При этом два отстойника  $V = 118 \text{ м}^3$  не функционировали, так как в них отсутствовали вертикальные трубы и отражательные щиты. По причине этого «Росы», пруды-усреднители и биологические пруды были заилены. Поэтому на предприятии впервые в РБ был внедрен биогазовый энергетический комплекс «BIOGAS NORD» (Германия) по переработке жидкого, твердого навоза на биогазовой установке [5]. Эксплуатация этого энергетического комплекса позволила накопить определённый опыт, а также установить его существенный недос-

таток в отсутствии качественного технологического процесса обезвреживания сточных вод, так как из-за его сложности производитель оборудования от него отказался. Однако в процессе нейтрализации этих сточных вод образуется большой объём осадка, использование которого в качестве дополнительного сырья для получения биогаза может потенциально увеличить его производительность с 200 до 1000 кВт/ч.

Технология получения биогаза в энергетическом комплексе «BIOGAS NORD» основана на принципе ферментации, который обеспечивается при совместной анаэробной обработке возобновляемых сырьевых ресурсов из органической субстанции отходов сельскохозяйственного производства в качестве основного субстрата для получения биогаза в качестве энергоносителя.

Биогаз обмена веществ метановых бактерий при разложении органической массы получается в определённых условиях в четырёх фазах. В первой фазе различные высокомолекулярные органические субстанции (белки, углеводы, жиры, целлюлоза) с помощью ферментов превращаются в низкомолекулярные соединения, такие как моносахарид, аминокислоты, жирные кислоты и воду. После этого кислотообразующие бактерии осуществляют дальнейшее разложение на органические кислоты, двуокись углерода, сероводород и аммиак. Затем уксуснокислые бактерии производят из них ацетаты, двуокись углерода и водород. И только на четвертой фазе происходит образование метана, двуокиси углерода и воды в щелочном диапазоне в результате действия метановых бактерий.

При постоянной подаче органической массы эти процессы осуществляются параллельно друг другу и не разделяются ни по пространству, ни по времени. Только при запуске биогазовой установки происходит отдельное разложение. Поэтому при запуске установки может пройти несколько недель, прежде чем будет достигнута четвертая фаза с образованием метана и загорится возникающий газ.

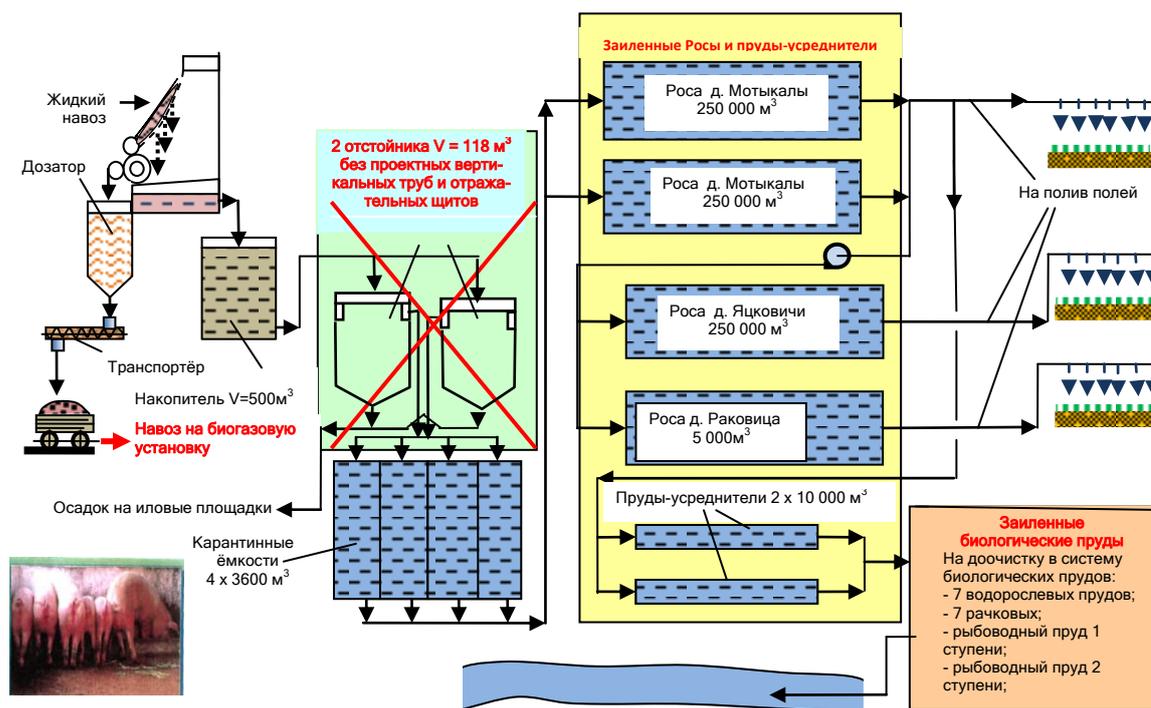


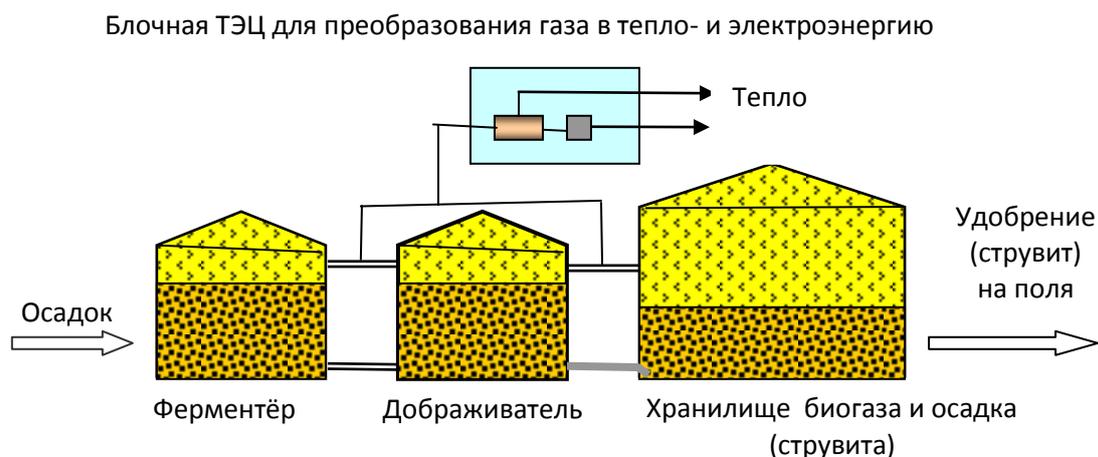
Рисунок 1. Существующая упрощённая схема обработки сточных вод животноводческого комплекса СГЦ РУСР «Западный»

Figure 1. The existing simplified scheme for treating wastewater from the livestock complex of the SHC RUUE «Zapadny»

Метановые бактерии в установке достаточно суспендированы, поэтому работают и размножаются только в воде. В отличие от аэробных бактерий, дрожжей и грибов, они не могут существовать в твердой фазе. Эти микроорганизмы строго анаэробны. Если в субстрате еще есть кислород, например в свежем жидком навозе, то сначала его расходуют аэробные бактерии. Это происходит на первой фазе биогazового процесса. Небольшое количество кислорода, образующегося также в результате целенаправленного нагнетания воздуха с целью десульфурации, тоже не повредит.

Метановые бактерии не могут разлагать жиры, белки, углеводы (крахмал, сахар) и целлюлозу в чистом виде. Более того, им для создания своей клеточной субстанции нужны растворимые азотные соединения,

минеральные вещества и микроэлементы. В жидком и твердом навозе эти вещества содержатся в достаточном количестве: трава, жмых, барда и сыворотка, содержат достаточно общих питательных веществ, и в принципе могут сами разлагаться. Но на практике рекомендуется использовать жидкий и твердый навоз в качестве стабильного основного субстрата и добавлять другие из названных веществ, чтобы предотвратить расслоение и обеспечить хорошее накопление кислот и оснований. Рабочий температурный диапазон метановых бактерий составляет от 0 °C до 70 °C, а при более высоких температурах они погибают за исключением некоторых штаммов, которые могут жить даже при температуре до 90 °C. Упрощённая блок-схема биогazового энергетического комплекса показана на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Упрощённая блок-схема биогазового энергетического комплекса «BIOGAS NORD»

**Figure 2.** Simplified block diagram of a biogas energy complex «BIOGAS NORD»

*Рабочий узел 1: Приемка, промежуточное хранение и загрузка сырья.* Узел предназначен для промежуточного хранения субстратов с момента их образования в результате внутрипроизводственной деятельности и догрузки в ферментационную установку. Он состоит из первичного резервуара объемом 200 м<sup>3</sup> для промежуточного хранения жидких органических удобрений и силосного инфильтрата. Оттуда жидкие субстраты направляются через насос и дозатор в ферментационную установку, которая состоит из 2-х круглых закрытых железобетонных резервуаров с сопровождающим обогревом, через которые субстрат проходит по так называемому принципу «накопление-расход», и в которых органические субстраты ферментируются без доступа воздуха при температуре 38-40 °С с образованием биогаза. Основное брожение происходит в ферментёре. Дображиватель предназначен, в первую очередь, для дображивания и хранения биогаза. Ферментёр имеет теплоизоляцию по всему периметру, облицован трапециевидными сталь-

ными пластинами для защиты от непогоды, а также оснащен крышей газохранилища и соединен через трубный сифон с дображивателем/хранилищем в качестве свободного перелива. Как только в ферментёр поступает свежий субстрат, то же количество субстрата само переходит в дображиватель/хранилище. Образование слоев нижних и взвешенных слоев предотвращается мешалками с погружными двигателями. Визуальный контроль содержания резервуара осуществляется с помощью 2-х проемов в стене на верхнем крае ферментера, к которым можно подойти по стационарной рабочей площадке. Между ферментером и дображивателем сооружается рабочая площадка. Для обнаружения течи ферментер окружен кольцевым дренажем с контрольным колодцем.

*Рабочий узел 2: Хранилище биогаза.* Для промежуточного хранения биогаза на ферментере и дображивателе сооружается по газохранилищу, каждое из которых состоит из пленки ПВХ. Полиэтиленовая пленка,

поддерживаемая биогазом, может свободно двигаться между наружной пленкой и опорной сеткой. При диаметре резервуара 2 x 18 м (ферментер) в каждом резервуаре может храниться примерно 405 м<sup>3</sup> биогаза. В сумме на промежуточном хранении находится 810 м<sup>3</sup>. Газохранилища соединены между собой, так что биогаз может равномерно распределяться в газохранилищах. Газопровод устанавливается от резервуаров к контейнеру блочной ТЭЦ. При прохождении неочищенный газ за счет охлаждения конденсируется на газовом участке и за счет этого осушается. Конденсат собирается в сборном колодце и далее возвращается в ферментер в качестве технологической воды. Кроме того, неочищенный газ направляется через газовый фильтр на отделение частиц пыли и грязи. Количество газа измеряется с помощью объёмного газомера. Прежде чем газ попадет в двигатели внутреннего сгорания, он проходит через защиту от обратного удара пламени, два релейных запорных клапана и дроссельную заслонку, регулирующую в зависимости от производительности.

*Рабочий узел 3. Установка использования биогаза.* Биогаз за счет объединения выработки тепловой и электрической энергий в блочной ТЭЦ преобразуется в электрическую и тепловую энергию. Сооружаются и эксплуатируются два агрегата блочной ТЭЦ в виде газового двигателя внутреннего сгорания с электрической мощностью генераторов

180 кВт или 340 кВт. Они устанавливаются в контейнерах. Отдача мощности блочной ТЭЦ регулируется плавно от 50 % до 100 %. Все функции контроля и управления выполняются централизованно гибко программируемой АСУ. Постоянно контролируются: частота, асимметрия, выпадение фазы, напряжение, число оборотов выше и ниже номинального, контроль обратной мощности, температура охлаждающей воды, генератора, также двигателя с автоматическим подключением аварийного охладителя, а также давление масла и уровень масла. Отвод избыточного газа осуществляется через стену контейнера блочной ТЭЦ по газоотводящей трубе вертикально наружу. Передача тока осуществляется в сеть местного энергоснабжающего предприятия. Полученное тепло в настоящее время используется для подогрева субстрата, а оставшаяся часть направляется на существующее производство для технологических целей (хозбытовые нужды, убойный и колбасные цеха и т.д.).

*Рабочий узел 4. Установка использования газа.* В нормальном режиме эксплуатации установка для энергетического использования потребляет до 5712 м<sup>3</sup>/сут биогаза. Из ферментации собственных органических удобрений и энергетических растений биогаза ожидается 4700 м<sup>3</sup>/сут. Через установку использования газа могут проходить следующие количества биогаза для их энергетического использования (таблица 1).

**Таблица 1.** Объем расхода газа блочной ТЭЦ

**Table 1.** Volume of gas consumption of block heat and power plant

Установка использования газа	Подведённая мощность [кВт]	Элект./тепл. мощность [кВт]	Расход биогаза блочной ТЭЦ (биогаз с долей CH <sub>4</sub> 60 %)	
			[Нм <sup>3</sup> /ч]	[Нм <sup>3</sup> /день]
Блочная ТЭЦ, 180 Вт	486	180/219	81	1,944
Блочная ТЭЦ, 340 кВт	944	340/430	157	3,768

Постановка задач исследований

Разработка рациональной технологии очистки сточных вод животноводческого комплекса основана на анализе технологической схемы существующих очистных сооружений биологической очистки сточных вод животноводческого комплекса ОАО «СГЦ Западный» на 100 тыс. голов.

Упрощённая схема рациональной обработки сточных вод с добавлением блока, содержащего высокие концентрации аммиака, приведена на рисунке 3.

Сточные воды объёмом 1200 м<sup>3</sup>/сут, образующиеся согласно проекту после гидро-

смывного удаления навоза из животноводческих помещений, направлялись на дуговое сито. На этом сооружении навоз отделялся от жидкой фазы. Затем навоз дозатором навоза сбрасывался на транспортёр, откуда должен был направляться на иловые площадки. В последнее время навоз отвозится на биогазовую установку, а жидкая фаза сбрасывается в накопитель V = 1000 м<sup>3</sup>. Из накопителя сточных вод, часть из них в случае заражения токсичными инфекциями, согласно проекту, направлялась в четыре карантинные ёмкости 4 x 3600 м<sup>3</sup>, а в отсутствие их заражения - на два вертикальных отстойника V = 118 м<sup>3</sup> каждый.

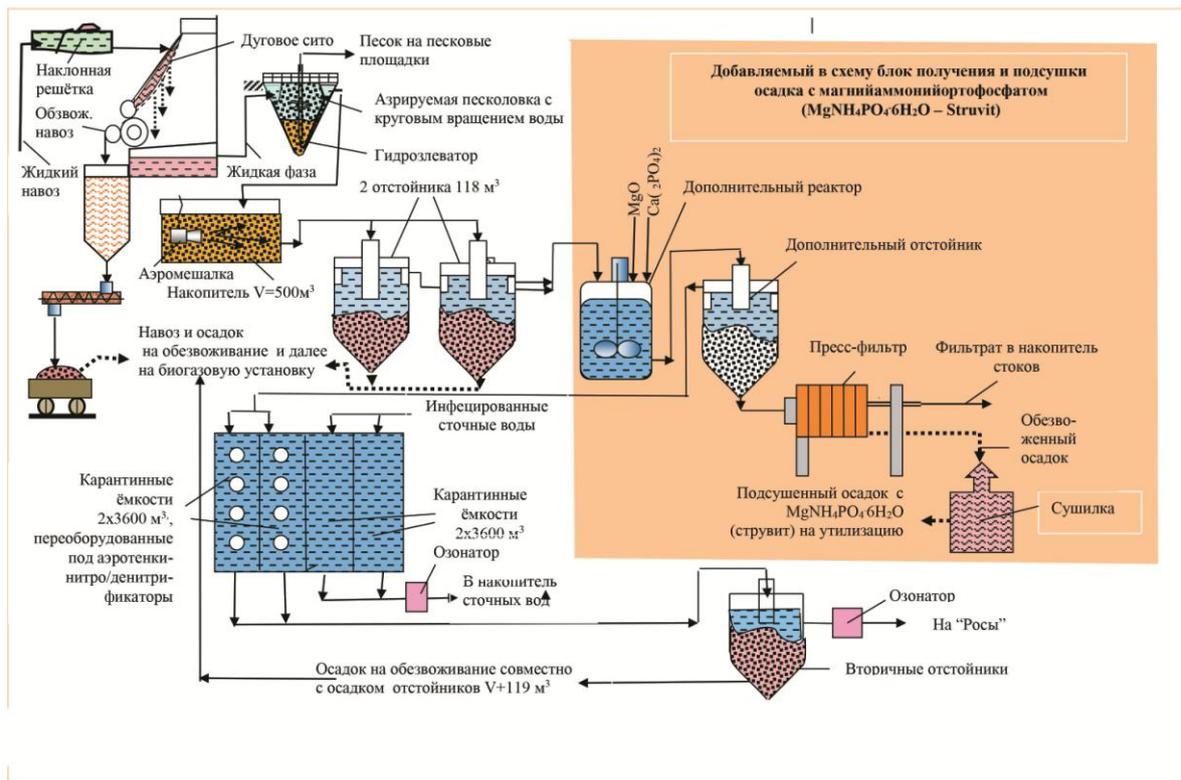


Рисунок 3. Упрощённая схема рациональной обработки сточных вод с добавлением блока, содержащего высокие концентрации аммиака

Figure 3. Simplified scheme for rational wastewater treatment with the addition of a block containing high concentrations of ammonia

Затем осветлённая вода из накопителя очищенных сточных вод сбрасывалась на «Росы» (3 накопителя объемами 250 000 м<sup>3</sup>, а одна объемом 5 000 м<sup>3</sup>). Часть воды из «Рос» шла на полив сельскохозяйственных угодий, а остальная часть в два пруда-усреднителя объемами 10 000 м<sup>3</sup> каждый. Из прудов-усреднителей вода направлялась на доочистку в систему биологических прудов: 7 водорослевых прудов, 7 рачковых, рыбоводный пруд 1 ступени, рыбоводный пруд 2 ступени, озеро технической воды.

Для очистки сточных вод необходимо была реконструкция существующей схемы, от которой из-за сложности в решении этого вопроса разработчик энергетического комплекса «BIOGAS NORD» отказался. В результате вертикальные отстойники находились в нерабочем состоянии и не функционировали (рисунок 1). По причине этого сборники очищенных сточных вод «Рос» и биологические пруды забиты осадком, и сточная вода практически без очистки сбрасывалась в реку Сорока. И это при том, что суммарное количество сбрасываемых загрязнений эквивалентно загрязнению сточных вод 2-х городов, по численности равным городу Брест.

*Результаты исследований. Реконструкция существующей технологической схемы*

На основе технологического анализа разработок корпораций Hoffland Environmental, Inc. и AETE International, Inc. (США) авторами предложена упрощённая схема рациональной обработки сточных вод [6, 7]. Компания AETE International, Inc. имеет многолетний опыт научных исследований, разработки технологий и производства оборудования для очистки сточных вод и обработки осадков, а компания Hoffland Environmental Inc. разрабатывает и производит качественное оборудование для очистки сточных вод, в том числе для утилизации отходов животноводства. Технологии и оборудование этих компаний находят в различных странах широкое применение в системах очистки сточных вод сельскохозяйственного

производства, химической, текстильной, пищевой, медицинской, нефтегазовой других отраслей промышленности.

Для радикальной реконструкции технологической схемы очистки сточных вод энергетического комплекса предложена упрощённая схема рациональной обработки сточных вод с добавлением блока, содержащего высокие концентрации аммиака, которая показана на рисунке 3 [6, 7]. Для улучшения работы технологической схемы в целом она дополнена наклонной решёткой для задержания крупных минеральных и органических загрязнений, а также аэрируемой песколловкой. Накопитель V = 500 м<sup>3</sup> оборудован аэромешалкой, которая обеспечивает не только высокоэффективную подачу воздуха, но и обеспечивает режим нитри/денитрификации.

Авторами была обоснована радикальная реконструкция вертикальных отстойников (рисунок 4) путём добавления в вертикальную трубу камеры хлопьеобразования и полочных вставок [8]. Встроенная камера хлопьеобразования совместно с полочными вставками позволила добиться эффекта осветления сточных вод не ниже 90 %, по сравнению с проектным, до 60 %, а полученный осадок после обезвоживания на пресс-фильтрах направить на биогазовую установку, повысив её производительность по биогазу в несколько раз. В процессе реконструкции схемы, две из четырех карантинных ёмкостей V = 3600 м<sup>3</sup> предлагалось переоборудовать в аэротенки (рисунок 5) за счёт дополнения их высокопроизводительными по кислороду шестью поплавковыми аэраторами мощностью 7,45 кВт каждый. Это позволило помимо основных функций аэротенков перевести их в режим нитри/денитрификации со временем пребывания стоков 7 сут. Инфицированные сточные воды и биологически очищенные проходят обеззараживание на озонаторных установках и затем сбрасываются в накопитель сточных вод (рисунок 3).

Одним из важнейших элементов предложенной схемы очистки сточных вод стал разработанный на основании ранее проведённых исследований [8, 9] блок связывания

избыточного аммония с помощью имеющихся на предприятии доломитовой муки и двойного суперфосфата в  $MgNH_3PO_4 \cdot 6H_2O$  (магний-аммонийортофосфат - струвит), являющийся не только ценным комплексным удобрением, но и более чем на порядок позволивший снизить концентрацию ингибитора биологических и биогазовых процессов, а также реагентом для раскисления кислых почв, широко распространённых в Беларуси (рисунок 3) [10-13].

Для исследования были взяты сточные воды свиного комплекса ОАО «ГЦ Западный» в Брестской области.

На рисунке 6 приведена зависимость эффективности удаления аммонийного азота от доли внесённого суперфосфата. Проведенные исследования подтвердили возможность эффективного удаления аммонийного азота (до 95 %) с помощью предварительной реагентной очистки.

Блок состоит из реактора, в котором аммиак с помощью доломитовой муки и двойного суперфосфата связывается в струвит, дополнительного отстойника для освет-

ления сточной воды, пресс-фильтра для обезвоживания осадка и оборудования для сушки осадка. Добавление этого блока снижает практически на порядок концентрацию ингибирующего биологические процессы аммиака и значительно повышает эффективность работы аэротенка нитро/денитрификатора.

Для реализации поставленной задачи авторами был использован реагентный метод удаления аммонийного азота. При этом исследования проводились на сточных водах свиноводческого комплекса ОАО «ГЦ Западный». Как известно, сточные воды животноводческих комплексов наиболее опасны в экологическом отношении.

Извлечение струвита в технологических схемах очистки сточных вод животноводческих комплексов является важным аспектом, так как процесс позволяет повысить эффективность очистки, а также получить комплексное удобрение с содержанием азота и фосфора [14].

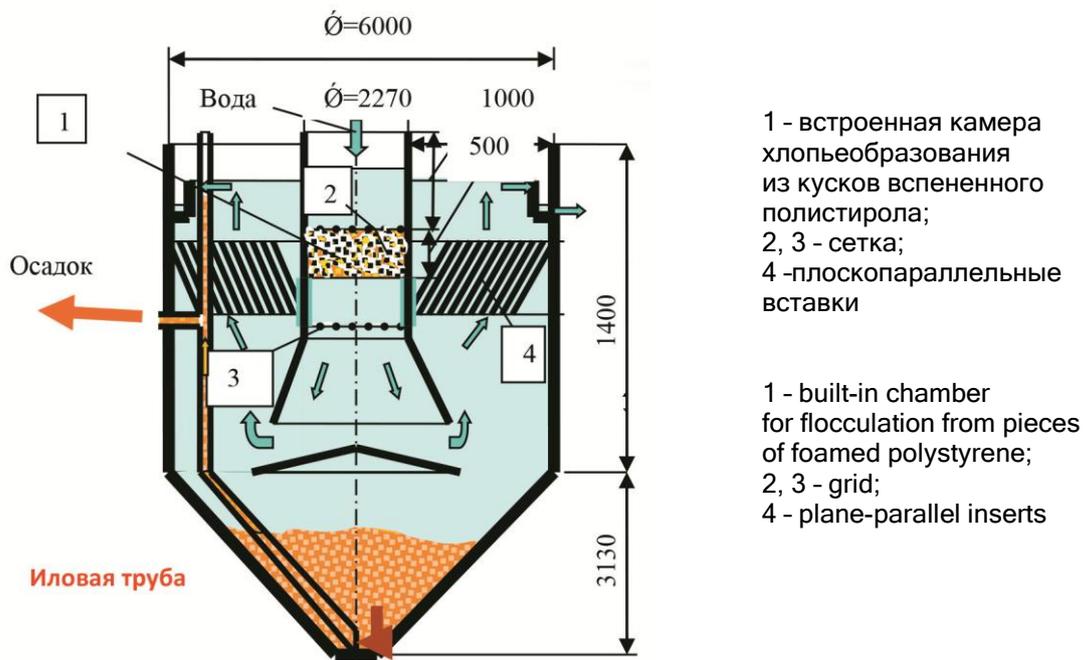


Рисунок 4. Реконструкция отстойника

Figure 4. Reconstruction of the existing settling

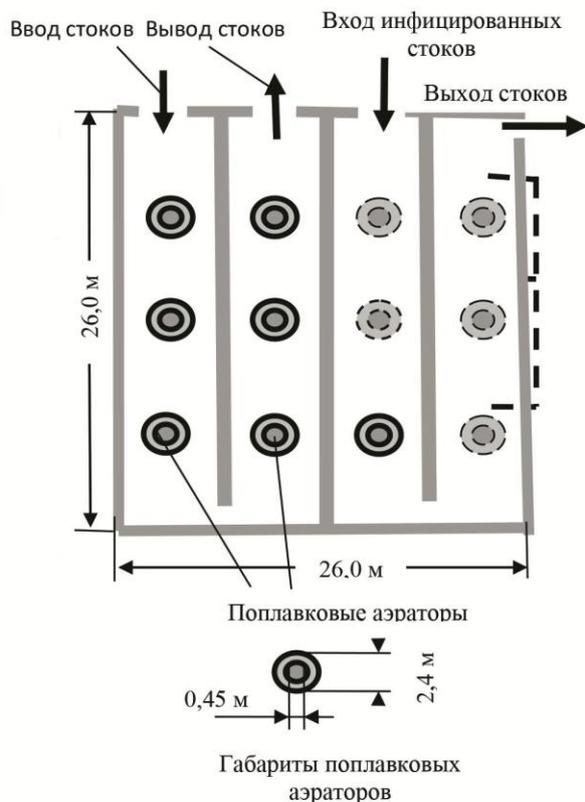
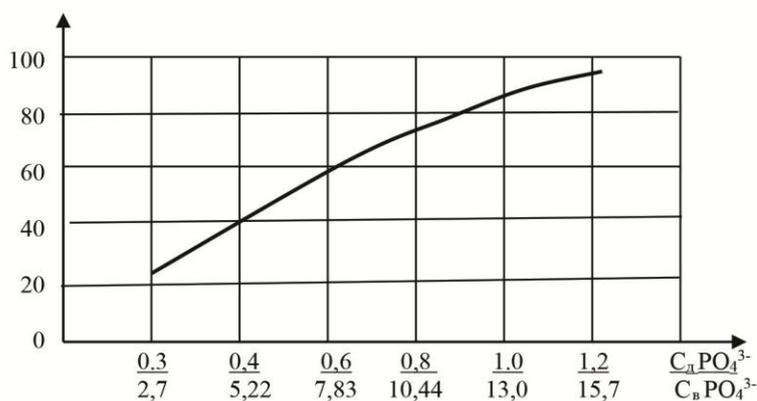


Рисунок 5. План аэрационных бассейнов с поплавковыми аэраторами

Figure 5. Layout of aeration basins with float aerators

Эффективность удаления аммонийного азота  $\text{NH}_4^+$ , %



$C_d \text{PO}_4^{3-}$  - доля  $\text{PO}_4^{3-}$  от стехиометрической;  
 $C_b \text{PO}_4^{3-}$  - доля  $\text{PO}_4^{3-}$  - отношение весовой части продукта к 1 весовой части  $\text{NH}_4^+$

$C_d \text{PO}_4^{3-}$  - fraction of  $\text{PO}_4^{3-}$  from stoichiometric;  
 $C_b \text{PO}_4^{3-}$  - share  $\text{PO}_4^{3-}$  - ratio of the weight part of the product to 1 weight part of  $\text{NH}_4^+$

Рисунок 6. Зависимость удаления аммонийного азота от доли введённого двойного суперфосфата

Figure 6. Dependence of ammonium nitrogen removal on the proportion of introduced double superphosphate

Удаление фосфора из сточных вод посредством получения струвита является более экологичным и экономически эффективным, по сравнению с классической коагуляцией. Получение струвита является новым направлением в очистке сточных вод животноводческих комплексов, так как способствует повышению эффективности процесса очистки и снижению воздействия на окружающую среду.

### Выводы

1. Восстановление и радикальная реконструкция проектных отстойников позволили повысить производительность существующей биогазовой установки с 200 до 1000 кВт.

2. Значительно улучшена работа схемы в целом за счёт переоборудования в аэротенки двух из четырех карантинных ёмкостей  $V = 3600 \text{ м}^3$  путём дополнения их высокопроизводительными установками подачи воздуха

(поплавковыми аэраторами), а также вторичными отстойниками, осадок из которых совместно с осадком первичных отстойников был направлен на биогазовую установку.

3. Радикально улучшен процесс очистки сточных вод и получения биогаза дополнением технологической схемы блоком связывания ингибитора этих процессов избыточного аммония в  $\text{MgNH}_3\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (магнийамонийортофосфат - струвит), что позволило получить не только комплексное удобрение, пригодное для всех сельскохозяйственных культур, но и предотвращать вывод из землепользования почв в результате их закисления.

4. Восстановлена работоспособность заилённых «Рос», прудов-усреднителей, биологических прудов, что позволило довести эффективность очистки сточных вод свинокомплекса до предельно-допустимых концентраций ПДК, позволяющих их сброс в реку Сорока.

### Список источников

1. Фасхутдинов В.З., Фасхутдинов Т.В. Метановое сбраживание вторичного сырья в сельскохозяйственном производстве. Уфа: Изд-во БГАУ, 2007. 138 с.

2. Маринин В.Д. Проблема использования биоэнергетических установок для очистки животноводческих стоков: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1992. 330 с.

3. Амбросова Г.Т., Функ А.А., Ксенофонтова О.В. Рентабельное и экологически чистое фермерское хозяйство // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 10 (658). С. 65-70. EDN: RZRFHX.

4. Челноков А.А., Ющенко Л.Ф., Фридлянд М.Е. Состояние природной среды Беларуси и пути её улучшения (справочное пособие). Минск: Минский экологический совет, 2000. 52 с.

5. Официальный сайт Zorg Biogas. URL: <https://zorg-biogas.com/ru> (дата обращения: 05.10.2023).

6. Официальный сайт Hoffland Environmental Inc. URL: <http://www.hoffland.net/> (дата обращения: 05.10.2023).

7. Официальный сайт AETE International, Inc. URL: <https://www.aete.eu/> (дата обращения: 05.10.2023).

8. Урецкий Е.А., Гогина Е.С., Мороз В.В. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения.

### References

1. Faskhutdinov V.Z., Faskhutdinov T.V. *Metanovoe sbrazhivanie vtorichnogo syr'ya v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve* [Methane Digestion of Secondary Raw Materials in Agricultural Production]. Ufa, BGAU Publ., 2007. 138 p. [in Russian].

2. Marinin V.D. *Problema ispol'zovaniya bioenergeticheskikh ustanovok dlya ochistki zhivotnovodcheskikh stokov: dis. d-ra tekhn. nauk* [The Problem of Using Bioenergy Plants for the Treatment of Livestock Wastewater: Doct. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, 1992. 330 p. [in Russian].

3. Ambrosova G.T., Funk A.A., Ksenofontova O.V. *Rentabel'noe i ekologicheskochistoe fermerskoe khozyaistvo* [Profitable and Eco-Friendly Farming]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo - News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2013, No. 10 (658), pp. 65-70. EDN: RZRFHX. [in Russian].

4. Chelnokov A.A., Yushchenko L.F., Fridlyand M.E. *Sostoyanie prirodnoi sredy Belarusi i puti ee uluchsheniya (spravochnoe posobie)* [State of the Natural Environment of Belarus and Ways to Improve it (Reference Book)]. Minsk, Minskii ekologicheskii sovet Publ., 2000. 52 p. [in Russian].

5. Official Website of Zorg Biogas. Available at: <https://zorg-biogas.com/ru> (accessed 05.10.2023). [in Russian].

6. Official Website of Hoffland Environmental Ins. Available at: <http://www.hoffland.net/> (accessed

М.: Изд-во АСВ, 2022. 624 с.

9. Gell K., De Ruijter F.J. Safety and Effectiveness of Struvite from Black Water and Urine as a Phosphorus Fertilizer // *Journal of Agricultural Science*. 2011. Vol. 3 (3). P. 67-80. DOI: 10.5539/jas.v3n3p67.

10. Урецкий Е.А. К вопросу очистки сточных вод животноводческого комплекса // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2006. № 2. С. 73-75.

11. Кочетков В.Н. Фосфорсодержащие удобрения. М.: Химия, 1982. 400 с.

12. Петербургский А.В. Система применения удобрений. М.: Колос, 1984. 272 с.

13. Павлюченко М.М., Терентьев В.М., Продан Е.А. Полифосфаты и минеральное питание растений. Минск: Наука и техника, 1978. 231 с.

14. Ружицкая О.А., Липатов В.С., Жолобова А.В. Анализ физико-химических методов удаления фосфора из сточных вод с целью получения струвита // Системные технологии. 2023. № 2 (47). С. 84-92. DOI: 10.55287/22275398\_2023\_2\_84. EDN: HYFWEF.

05.10.2023).

7. Official Website of AETE International, Inc. Available at: <https://www.aete.eu/> (accessed 05.10.2023).

8. Uretskii E.A., Gogina E.S., Moroz V.V. *Optimizatsiya sushchestvuyushchikh i razrabotka novykh resursosberegayushchikh tekhnologii v vodnom khozyaistve predpriyatii priboro- i mashinostroeniya* [Optimization of Existing and Development of New Resource-Saving Technologies in Water Management of Instrument and Mechanical Engineering Enterprises]. Moscow, ASV Publ., 2022. 624 p. [in Russian].

9. Gell K., De Ruijter F.J. Safety and Effectiveness of Struvite from Black Water and Urine as a Phosphorus Fertilizer. *Journal of Agricultural Science*, 2011, Vol. 3 (3), pp. 67-80. DOI: 10.5539/jas.v3n3p67.

10. Uretskii E.A. K voprosu oчитки stochnykh vod zhivotnovodcheskogo kompleksa [On the Issue of Wastewater Treatment from the Livestock Complex]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vodokhozyaistvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya - Bulletin of the Brest State Technical University. Water Management Construction, Thermal Power Engineering and Geoecology*, 2006, No. 2, pp. 73-75. [in Russian].

11. Kochetkov V.N. *Fosforsoderzhashchie udobreniya* [Phosphorus-Containing Fertilizers]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 400 p. [in Russian].

12. Peterburgskii A.V. *Sistema primeneniya udobrenii* [Fertilizer Application System]. Moscow, Kolos Publ., 1984. 272 p. [in Russian].

13. Pavlyuchenko M.M., Terentev V.M., Prodan E.A. *Polifosfaty i mineral'noe pitanie rastenii* [Polyphosphates and Mineral Nutrition of Plants]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1978. 231 p. [in Russian].

14. Ruzhitskaya O.A., Lipatov V.S., Zholobova A.V. Analiz fiziko-khimicheskikh metodov udaleniya fosfora iz stochnykh vod s tsel'yu polucheniya struvita [Analysis of Physico-Chemical Methods for Removing Phosphorus from Wastewater to Obtain Struvite]. *Sistemnye tekhnologii - System Technologies*, 2023, No. 2 (47), pp. 84-92. DOI: 10.55287/22275398\_2023\_2\_84. EDN: HYFWEF. [in Russian].

#### Информация об авторах

• Урецкий Евгений Аронович  
Белорусский государственный проектный институт  
Начальник отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Водоснабжение и водоотведение»  
Республика Беларусь, 210602, Витебск, ул. Пушкина, 6  
euretsky@yandex.by

#### Information about the authors

• Uretsky Evgeny A.  
Belarusian State Design Institute  
Head of the Branch Research Laboratory  
«Water Supply and Sanitation»  
6, Pushkin str., Vitebsk, 210602, Republic of Belarus  
euretsky@yandex.by

• Николенко Илья Викторович, доктор технических наук  
Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского  
Институт «Академия строительства и архитектуры»  
Заведующий кафедрой «Водоснабжение, водоотведение и санитарная техника»  
Россия, 295493, Республика Крым, Симферополь, ул. Киевская, 181  
nikoshi@mail.ru

• Nikolenko Ilya V., Doctor of Engineering Sciences  
V.I. Vernadsky Crimean Federal University  
Institute «Academy of Construction and Architecture»  
Head of Water Supply, Sanitation and Sanitary Engineering Department  
181, Kievskaya str., Simferopol, 295493, Crimea Republic, Russia  
nikoshi@mail.ru

• Мороз Владимир Валентинович, кандидат технических наук  
Брестский государственный технический университет  
Доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов»  
Республика Беларусь, 224017, Брест, ул. Московская, 267  
vovavall@mail.ru

• Moroz Vladimir V., Candidate of Engineering Sciences  
Brest State Technical University  
Assistant Professor of Water Supply, Sanitation and Sanitary Engineering Department  
267, Moskovskaya str., 267, Brest, 224017, Republic of Belarus  
vovavall@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 23.10.2023; одобрена после рецензирования 31.10.2023; принята к публикации 01.11.2023.*

*The article was submitted 23.10.2023; approved after reviewing 31.10.2023; accepted for publication 01.11.2023.*