

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ  
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

УДК 620.95:628.3

Т. В. ШКОДОВ<sup>1</sup>, Н. С. РУЧАЙ<sup>2</sup>, И. Н. КУЗНЕЦОВ<sup>2</sup>**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОСАДКОВ  
ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД**<sup>1</sup>ОАО «Слонимский водоканал»,<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет

(Поступила в редакцию 13.01.2014)

Введение. При механобиологической очистке сточных вод на городских очистных станциях образуются в больших количествах влажные осадки, основу которых составляют сырой осадок из первичных отстойников и избыточный активный ил. В Республике Беларусь эти осадки являются не утилизируемыми отходами, представляющими серьезную угрозу окружающей среде из-за большого количества (около 200 тыс. т по сухому веществу в год). В 2010 г. на городских очистных станциях осадков образовалось более 199 тыс. т по сухому веществу, в том числе 80,5 т сырых осадков из первичных отстойников и 66,3 тыс. т избыточного активного ила. В крупных населенных пунктах осадки канализационных очистных сооружений подвергают механическому обезвоживанию и обезвреживанию, что требует больших капитальных вложений и эксплуатационных расходов. По затратам энергоресурсов наиболее экономичным является способ переработки осадков анаэробным сбраживанием с выработкой биогаза, являющегося энергоносителем. Сбраживание осадков в метантенках отличается длительностью процесса в зависимости от температурного режима (10–25 сут).

Цель настоящей работы – создание интенсивной технологии анаэробной переработки осадков сточных вод.

**Объекты и методы исследований.** Высокое содержание взвешенных веществ в осадках является лимитирующим фактором процесса метангенерации, в связи с чем исследуют различные методы интенсификации гидролитической стадии анаэробного расщепления органических компонентов, среди которых наибольший интерес представляют ультразвуковая и ферментативная обработка.

Выполненные нами исследования [1, 2] показали, что ультразвуковая обработка приводит к расщеплению коллоидных и взвешенных частиц и переходу их вещества в растворенное состояние. При этом показатель химического потребления кислорода (ХПК) надосадочной жидкости возрастает в 3,5 раза. Следствием данного процесса является увеличение степени трансформации органических веществ и выхода биогаза в 1,75 раза при анаэробной переработке осадков в термофильных (50°C) условиях [1].

**Результаты и их обсуждение.** Обработка осадков гидролитическими ферментами, расщепляющими полисахаридные компоненты, также обеспечивает перевод части взвешенных веществ в растворенное состояние, что приводит к увеличению выхода биогаза в 1,3 раза. Ферментативная обработка осадков в меньшей степени интенсифицирует процесс метангенерации по сравнению с ультразвуковой обработкой.

Предварительная обработка осадков уменьшает продолжительность процесса метангенерации с 17 до 14 сут при ферментативной обработке и до 10 сут при ультразвуковой обработке

с одновременным повышением степени трансформации сухих веществ осадков соответственно от 37 до 39 и 44% [2].

Ультразвуковая обработка осадков требует значительных энергетических затрат. С этой позиции предпочтительна интенсификация процесса метангенерации воздействием гидролитических ферментов на компоненты осадков.

Для формирования технологии анаэробной переработки осадков очистных сооружений приняты следующие технологические решения:

предварительная ферментативная обработка смеси сырого осадка и избыточного активного ила с целью разрушения труднорасщепляемых полисахаридных компонентов;

разделение процесса анаэробного сбраживания осадков на стадиях преацидификации и метангенерации, реализуемых в отдельных аппаратах;

совмещение в одном аппарате процессов преацидификации осадков при 50 °С, ферментативной обработки и гравитационного разделения суспензии на осветленную жидкость и концентрат взвешенных веществ;

раздельное анаэробное сбраживание (метангенерация) осветленной жидкости осуществляют в высокопроизводительном UASB-реакторе, а концентрата взвешенных веществ – в метантенке.

В настоящей работе поставлена задача экспериментальной проверки принятых технологических решений моделированием процессов в лабораторных условиях.

В экспериментах использовали сырой осадок (содержание сухих веществ 3,0–3,5%) и уплотненный избыточный активный ил (содержание сухих веществ 1,6–1,8%), полученные на очистных сооружениях ОАО «Слонимский водоканал».

Преацидификацию смеси сырого осадка и активного ила (1:1 по объему) проводили выдержкой при 50 °С с добавлением ферментного препарата Рестинекс 5XL (1 мл 1%-ного раствора на 100 мл смеси осадков) в течение 24 ч.

Экспериментально установлено, что за время выдержки в преацидификаторе происходит гравитационное расслоение суспензии с образованием верхнего и нижнего слоев, содержащих взвешенные вещества, и среднего слоя осветленной жидкости (табл. 1). При совмещении процессов преацидификации и ферментативной обработки доля осветленной жидкости составляет 70–75%. Концентрат и осветленная жидкость содержат 5,0–6,5 и 0,30–0,50% сухих веществ соответственно.

Таблица 1. Гравитационное разделение суспензии осадков в преацидификаторе

| Слой                           | Доля слоя от общего объема суспензии, % |                              |                        |                              |
|--------------------------------|---|------------------------------|------------------------|------------------------------|
|                                | $\tau = 24$ ч                           |                              | $\tau = 48$ ч          |                              |
|                                | в присутствии фермента                  | без ферментативной обработки | в присутствии фермента | без ферментативной обработки |
| Верхний (взвешенные вещества)  | 17                                      | 23                           | 15                     | 20                           |
| Средний (осветленная жидкость) | 75                                      | 67                           | 77                     | 70                           |
| Нижний (взвешенные вещества)   | 8                                       | 10                           | 8                      | 10                           |

Осветленную жидкость сбраживали в UASB-реакторе в непрерывном режиме при температуре  $(36 \pm 0,5)$  °С. Схема лабораторной установки представлена на рис. 1. Полезный объем UASB-реактора 2 л. В качестве газоилоотделительного устройства использовали насадку «ВИЯ», расположенную в верхней части реактора в виде вертикально ориентированных волокон с плотностью загрузки 12 г/л. Объем, занимаемый насадкой, составляет 35% от полезного объема аппарата. В течение 3 мес осуществляли запуск биореактора с накоплением биомассы анаэробного ила в отъемно-доливном режиме, а затем перевели биореактор на непрерывное питание.

Эксперимент проводили при различной скорости протока преацидификата. Процесс метангенерации контролировали по изменению величин ХПК, содержания сухих веществ в сбраживаемой массе, а также по выходу биогаза.

Концентрат осадков сбраживали в метантенке объемом 2,8 л, функционирующем в мезофильном режиме  $(36 \pm 0,5)$  °С и оснащенном реверсивным циркуляционным насосом для усреднения сбраживаемой массы. Схема лабораторной установки представлена на рис. 2. Метантенк

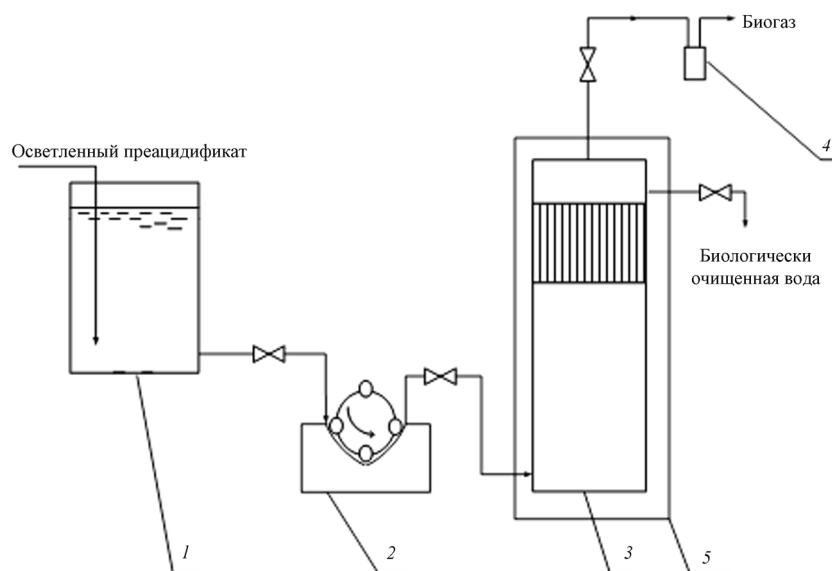


Рис. 1. Схема лабораторной установки для сбраживания осветленного преацидификата: 1 – емкость для декантата ферментированной смеси сырого осадка и активного ила; 2 – перистальтический насос; 3 – UASB-реактор; 4 – счетчик биогаза; 5 – суховоздушный термостат

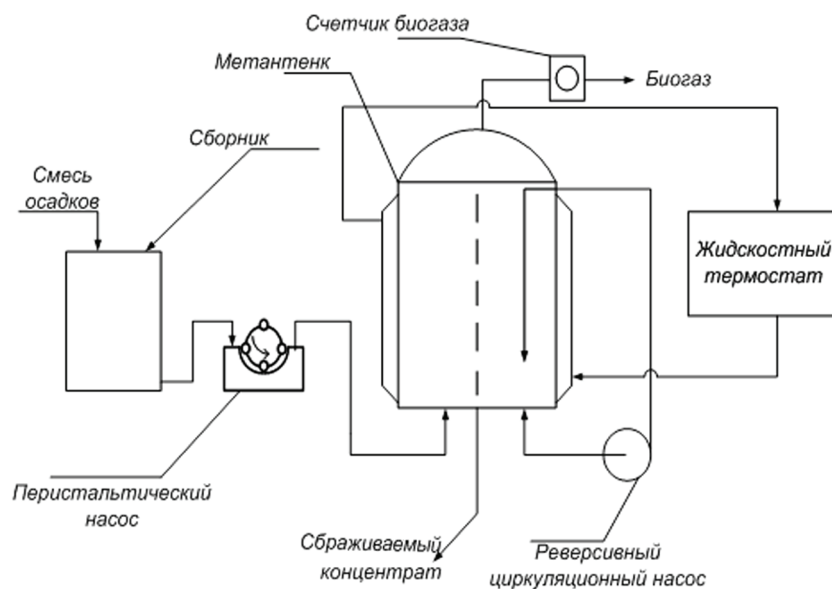


Рис. 2. Схема лабораторной установки для сбраживания концентрата осадков

функционировал в непрерывно-циклическом режиме с регулярной порционной загрузкой концентрата в количестве 150 (время удержания в метантенке 18,7 сут) и 190 мл/сут (время удержания 14,7 сут).

Процесс контролировали по количеству выделившегося биогаза и по изменению содержания сухих и минеральных веществ в сбраживаемой массе. Рассчитывали среднесуточный выход биогаза.

Результаты экспериментов по непрерывному сбраживанию осветленного преацидификата смеси осадков свидетельствуют об эффективном функционировании UASB- реактора (табл. 2).

При времени пребывания осветленного преацидификата в биореакторе 1,7–2,5 сут степень деструкции загрязнений по показателю ХПК достигает 87–89%. Содержание сухих веществ в сбраживаемом преацидификате снижается на 56–69%. Сбраживаемый преацидификат имеет остаточный уровень загрязненности по показателю ХПК 650–800 мг/л, что удовлетворяет требованиям для сброса сточных вод в городскую канализационную сеть для полной очистки (ХПК ≤ 1000 мг/л).

Таблица 2. Эффективность анаэробного сбраживания осветленного преацидификата

| Проток преацидификата, мл/сут | Время удержания преацидификата в биореакторе, сут | Показатель ХПК, мг/л |                | Содержание сухих веществ, % |                | Степень очистки преацидификата, % |                    | Удельная производительность биореактора, кг ХПК/(м <sup>3</sup> ·сут) | Количество биогаза, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> |
|-------------------------------|---|----------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------------|--------------------|---|--|
|                               |   | преацидификат        | очищенная вода | преацидификат               | очищенная вода | по показателю ХПК                 | по сухим веществам |   |  |
| 400                           | 5,0   | 7200                 | 1100           | 0,445                       | 0,135          | 84,7                              | 69,7               | 1,2   | 2,0  |
| 600                           | 3,3   | 7200                 | 1200           | 0,445                       | 0,135          | 83,3                              | 69,7               | 1,8   | 2,1  |
| 800                           | 2,5   | 6300                 | 650            | 0,375                       | 0,115          | 89,7                              | 69,3               | 2,3   | 2,1  |
| 1000                          | 2,0   | 6300                 | 700            | 0,375                       | 0,145          | 88,9                              | 61,3               | 2,8   | 2,3  |
| 1200                          | 1,7   | 6300                 | 800            | 0,375                       | 0,165          | 87,3                              | 56,0               | 3,2   | 1,8  |
| 1400                          | 1,4   | 6300                 | 1300           | 0,375                       | 0,210          | 79,3                              | 44,0               | 3,6   | 1,4  |

Количество выделяющегося в UASB- реакторе биогаза составляет около 2 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> осветленного преацидификата (рис. 3)

Таким образом, 70% смеси сырого осадка и избыточного активного ила в виде ферментализованного при 50 °С и осветленного гравитационным методом преацидификата могут быть подвергнуты анаэробному сбраживанию с генерацией биогаза в высокоскоростном UASB-реакторе в течение 1,7–2,5 сут. Проведенные эксперименты по сбраживанию концентрата преацидифицированной смеси осадков в метантенке показали (рис. 4), что процесс генерации биогаза протекает интенсивно при времени удержания массы в метантенке 18,7 сут: степень трансформации сухих веществ 56,8%, выход биогаза 7,4 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> концентрата. Увеличение дозы загрузки концентрата в метантенк приводит к снижению выхода биогаза до 4,4 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (табл. 3).

Таким образом, технологические решения, положенные в основу создаваемой технологии анаэробной переработки осадков, получили экспериментальное подтверждение.

Разработанная технологическая схема анаэробного сбраживания осадков сточных вод представлена на рис. 5. Исходная смесь сырого осадка и активного ила (содержание сухих веществ 2,0–2,5%) ступенчато подогревается до температуры 50 °С и поступает в преацидификатор-разделитель 3. Подогрев осадков производится последовательно в спиральном теплообменнике 2 с использованием вторичного тепла сбраживаемой массы и горячей водой в кожухотрубчатом теплообменнике 6. Во всасывающую линию подающего насоса дозируется раствор ферментного препарата. Продолжительность процесса преацидификации, совмещенного с ферментативной обработкой, 20–24 ч. Повышенная температура в преацидификаторе (50 °С) ускоряет ферментативное расщепление компонентов осадков.

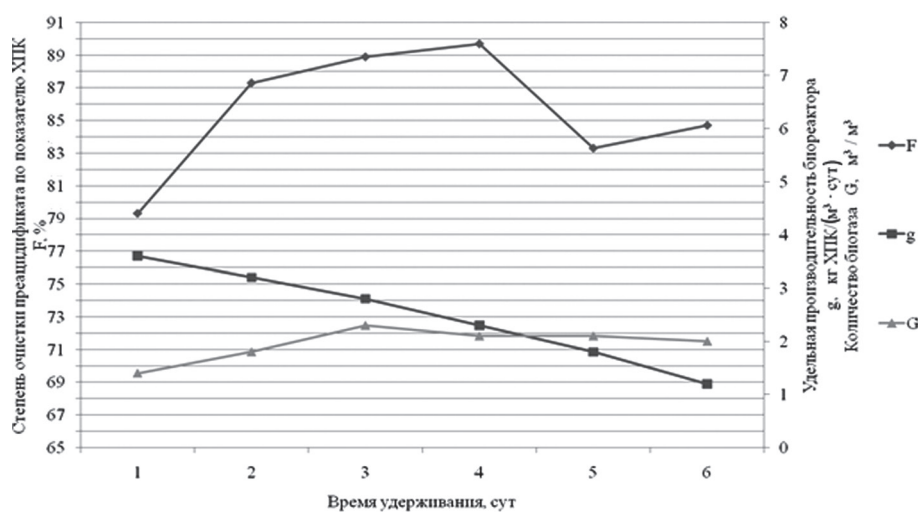


Рис. 3. Эффективность функционирования UASB-реактора

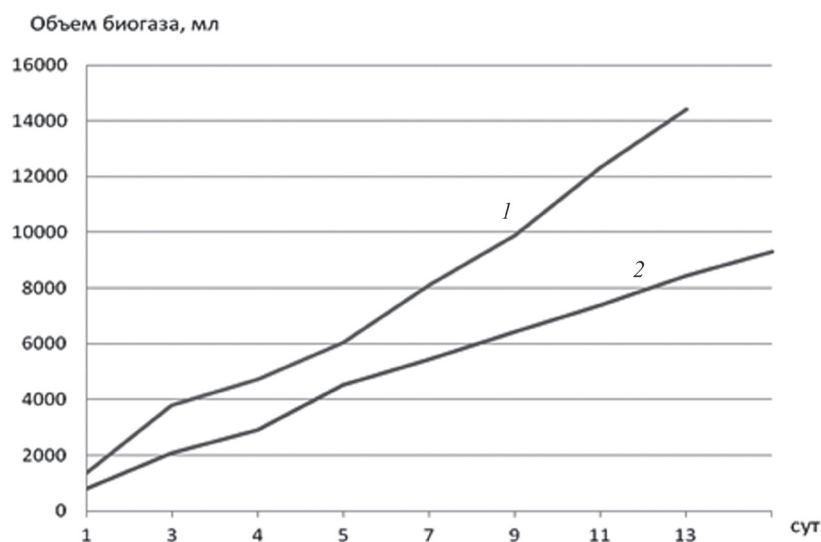


Рис. 4. Интегральные кривые генерации биогаза при сбраживании концентрата осадков: 1, 2 – время удержания концентрата осадков в метантенке 18,7 и 14,7 сут соответственно

Таблица 3. Непрерывное сбраживание концентрата осадков

| Загрузка концентрата, мл/сут | Время удержания в метантенке, сут | Содержание сухих веществ, % |                      |                     |                      |                      |                     | Степень трансформации, % |                      | Выход биогаза                   |  |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------------|--|
|                              |                                   | в концентрате               |                      |                     | в сбраживаемой массе |                      |                     | сухих веществ            | органических веществ | по абсолютному значению, мл/сут | по относительному показателю, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> концентрата |
|                              |                                   | общее                       | органических веществ | минеральных веществ | общее                | органических веществ | минеральных веществ |                          |                      |                                 |  |
| 150                          | 18,7                              | 4,4±0,3                     | 81,0                 | 19,0±0,4            | 1,9±0,2              | 48,0                 | 52,0±0,5            | 56,8                     | 40,7                 | 1108                            | 7,4  |
| 190                          | 14,7                              | 4,4±0,3                     | 81,0                 | 19,0±0,4            | 2,2±0,2              | 51,0                 | 49,0±0,5            | 50,0                     | 37,0                 | 845                             | 4,4  |

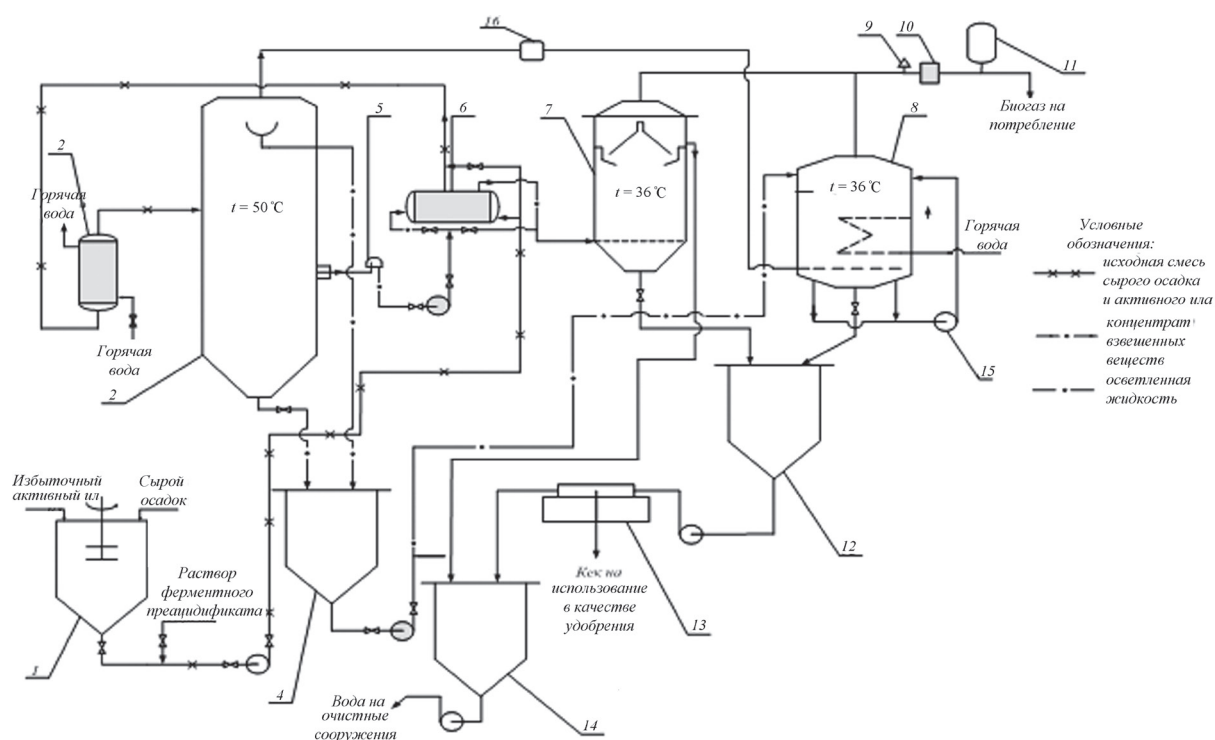


Рис. 5. Технологическая схема переработки осадков сточных вод: 1 – приемник-смеситель осадков; 2 – подогреватель кожухотрубчатый; 3 – преацидификатор-разделитель фаз; 4 – сборник концентрата взвешенных веществ; 5 – смотровой фонарь; 6 – спиральный теплообменник; 7 – UASB-реактор; 8 – метантенк; 9 – факельная свеча безопасности; 10 – установка сухой очистки биогаза от сероводорода; 11 – газгольдер; 12 – приемник сбраживаемой массы; 13 – декантерная центрифуга; 14 – сборник осветленной жидкости; 15 – циркуляционный насос; 16 – компрессор

Выделяющийся в преацидификаторе биогаз, содержащий преимущественно диоксид углерода, компримируется 16 и направляется в метантенк для перемешивания сбразиваемой массы барботируемым газом. При этом часть диоксида углерода трансформируется метаногенными бактериями в метан, что повышает его содержание в биогазе.

Осветленная жидкость, занимающая около 70% общего объема преацидификатора и содержащая 0,30–0,50% сухих веществ, выводится из его средней части через гребенку штуцеров, смотровой фонарь 5 и спиральный теплообменник 6 в UASB-реактор 7, функционирующий в мезофильном режиме (36 °С). Трансформация растворенных веществ в биогаз в UASB-реакторе осуществляется спонтанно формирующимся в аппарате гранулированным активным илом.

Концентрат взвешенных веществ (около 30% от общего объема исходной смеси осадков) содержит 5,0–6,5% сухих веществ. Из сборника 12 концентрат направляется в метантенк 8, где сбразивается в мезофильном режиме (36 °С) с образованием биогаза. Сбразиваемая масса из метантенка совместно с избыточным активным илом из UASB-реактора поступает на обезвоживание с помощью центрифуги 13. Кек используется в качестве удобрения в лесопитомниках. Осветленная жидкость из центрифуги 13 и UASB-реактора поступает на городские очистные сооружения. Биогаз после удаления водного конденсата и очистки от сероводорода направляется потребителю.

**Заключение.** Разработан технологический процесс анаэробной переработки осадков городских сточных вод, отличающийся рядом достоинств:

интенсификация процесса генерации биогаза за счет ферментативной обработки осадков и применения высокоскоростного UASB-реактора;

снижение капитальных затрат за счет резкого уменьшения требуемого объема метантенков в результате переработки 60–70% от общего объема осадков в высокоскоростном UASB-реакторе;

уменьшение в 2,5–3 раза объема сбразиваемой массы, подлежащей обезвоживанию центрифугированием, что снижает затраты реагентов и электроэнергии на процесс;

возможность использования высокопроизводительного UASB-реактора для совместной анаэробной переработки осветленной жидкой части осадков и принимаемых на очистку сточных вод других (например, молокоперерабатывающих) производств.

## Литература

1. Шкодов Т. В., Ручай Н. С., Кузнецов И. Н., Лембович А. И., Флюрик Е. А. // Материалы. Технологии. Инструменты. 2012. Т. 17, № 3. С. 83–89.
2. Шкодов Т. В., Ручай Н. С., Кузнецов И. Н., Лембович А. И. и др. // Весці НАН Беларусі. Сер.фіз-тэхн. навук. 2013. № 1. С. 114–118.

*T. V. SHKODOV, N. S. RUCHAI, I. N. KUZNETSOV*

## ENERGY EFFICIENT TECHNOLOGY OF MUNICIPAL RAW AND ACTIVE SLUDGE PROCESSING

### Summary

A technology of anaerobic treatment of raw and active sludge with biogas production based on research work is developed. It includes preliminary enzymatic treatment of mix of sludges with combine of preacidification stage at 50 °С with gravity separation of suspension on clarified liquid and concentrate of suspended solids. Clarified liquid goes to anaerobic digestion with biogas production to UABS-reactor, and concentrate enters methane tank. Effectiveness of technological processes is confirmed by experimental data.

The developed technology provides intensification of biogas production and reduction in capital costs due to processing of 60–70% from total volume of sludge mix in high effective UASB-reactor.