

УДК 628.336.6

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-3-12-23

## **Результаты исследований технологического процесса обработки осадков сточных вод при мезофильном режиме в биореакторе\***

*М. В. Паршикова, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия*

*Б. И. Вейбер, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия*

*М. С. Калашников, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия*

*В данной работе проведен анализ конструкции экспериментальной биогазовой установки, предназначенной для обработки органических отходов. В экспериментальных исследованиях в качестве органических отходов использован осадок сточных вод. В соответствии с программой экспериментальных исследований в период проведения опытов определялся объем выработанного биогаза в установке при мезофильном режиме анаэробного сбраживания. При проведении экспериментов поддерживался периодический мезофильный и термофильный режим анаэробного сбраживания осадков сточных вод в биореакторе, в статье представлены результаты экспериментов при мезофильном режиме анаэробного сбраживания. Наличие биогаза в процессе сбраживания осадка сточных вод при мезофильном режиме определялось с помощью газоанализатора марки «Хоббит-Т». В процессе работы экспериментального биореактора исследовались значимые факторы, влияющие на процесс выработки биогаза в установке. Рассматривались экспериментальные исследования анаэробного сбраживания осадков сточных вод в биореакторе при мезофильном режиме с учетом критерия оптимизации технологического процесса. Проведена подготовка биогазовой установки к выходу на рабочий режим и дальнейшую эксплуатацию на очистных сооружениях канализации водоканалов Удмуртской Республики. Представлен алгоритм экспериментальных исследований, рассмотрен мезофильный режим анаэробного сбраживания и результаты экспериментов. Использование энергоэффективной технологии анаэробного сбраживания осадков сточных вод с применением экспериментальной биогазовой установки позволяет получать биогаз из органических отходов, а также выявить влияние активатора процесса на работу экспериментального биореактора для обработки осадка сточных вод. Биогаз, выработанный в биореакторе позволит частично обеспечить тепловой энергией очистные сооружения канализации водоканалов Удмуртской Республики в периоды аварийных отключений энергии. Осадок сточных вод, переработанный в биогазовой установке, может быть использован в качестве почвогрунта, при применении в «зеленых» технологиях.*

**Ключевые слова:** анаэробное сбраживание, биореактор, мезофильный режим, осадок сточных вод, очистные сооружения канализации, технико-экономическая эффективность, экспериментальные исследования.

### **Введение**

Требования, предъявляемые к обработке сточной воды и осадков сточных вод с каждым годом изменяются. В соответствии с действующей нормативной документацией рекомендована доработка технологического процесса обработки осадков сточных вод в биореакторе.

В этой связи актуальными представляются исследования технологического процесса утилизации осадков сточных вод с применением биогазовой установки и введением активатора процесса для повышения эффективности анаэробного сбраживания.

Основная цель использования подобного подхода заключается в повышении технико-экономической эффективности технологического процесса утилизации осадков сточных вод с применением биогазовой установки и активатора процесса.

### **Материалы и методы. Устройство биогазовой установки и требования предъявляемые к ее эксплуатации**

Повышению энергетической эффективности технологического процесса способствует разработка оптимального метода обработки осадков сточных вод в биореакторе с применением активатора процесса на очистных сооружениях канализации Удмуртской Республики. Ранее для подтверждения теоретических исследований проведены эксперименты по оптимизации технологического процесса обработки органических отходов в биореакторе с последующей выработкой биогаза.

На основании теоретических исследований, представленных в [1, 2], выявлены факторы, влияющие на выработку биогаза при анаэробном сбраживании осадков сточных вод. К таким факторам относятся следующие:

© Паршикова М. В., Вейбер Б. И., Калашников М. С., 2025

\*Исследования проводились в рамках Программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М. Т. Калашникова «Научное обоснование технологий утилизации отходов животноводства и осадков сточных вод в едином цикле на биогазовой установке» (шифр ПМВ-24), приказ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова» от 27.12.2023г. № 1565.

1) режимы работы установки (мезофильный, термофильный). При работе биогазовой установки в мезофильном режиме наблюдается наибольшая выработка биогаза;

2) добавление активатора в биомассу при анаэробном сбраживании осадка сточных вод в биогазовой установке, который интенсифицирует процесс, характеризующийся повышением объема выработанного биогаза [3];

3) теплоизоляция биогазовой установки для поддержания температуры. Установлено, что применение фольгированного изолона в качестве теплоизоляционного материала способствует уменьшению теплопотерь в окружающую среду [4];

4) состав сырья, белки, жиры и углеводы, что подтверждено более ранними исследованиями [5]. При использовании осадка сточных вод с первичных отстойников при повышенном содержании жиров в составе биомассы, удельный выход биогаза больше, чем при использовании сырья с высоким содержанием белков и углеводов. В составе осадка сточных вод с высоким содержанием жиров выработка биогаза повышается [6];

5) водородный показатель ( $\text{pH}$ ) среды и содержание кислот в осадке сточных вод. Метанобразующие бактерии наиболее приспособлены к нейтральной и щелочной среде.

#### **Режимы работы установки**

##### **(термофильный и мезофильный режим)**

Эффективность технологического процесса анаэробного сбраживания осадков сточных вод повышается при периодическом режиме работы биогазовой установки, расположенной на очистных сооружениях канализации Удмуртской Республики. Разделение стадий по fazам и температуре ускоряет процесс сбраживания.

Биогазовая установка состоит из биореактора с встроенными устройствами для перемешивания среды в мезофильном и термофильном режимах, внутри установки предусмотрены нагревательные элементы – ТЭНЫ. Подобный подход можно встретить в трудах других российских и зарубежных ученых [7–9]. При мезофильном режиме анаэробного сбраживания сначала проводилось выдерживание осадка сточных вод в биореакторе в течение 15 дней, затем применялся обогрев биомассы в температурном интервале 25–40 °C и поддержание оптимального температурного диапазона с 33 до 37 °C. Для термофильного режима анаэробного сбраживания характерно выдерживание осадка сточных вод в биореакторе в течение 7 дней, и при данном режиме применяется обогрев биомассы в температурном интервале 53–56 °C.

Отдельные элементы конструкции биореактора имеют общепринятый характер, и особенности их использования встречается в литературных источниках [10–13]. На основании проведенного сравнительного анализа конструктивных особенностей биореакторов разработана и запатентована конструкция двухсекционного биореактора (патент на изобретение RU 2811623 C1 от 15.01.2024 г.) [16].

Конструкция запатентованной экспериментальной биогазовой установки представляет собой совокупность отдельных технических устройств и изделий:

1. Электрический щит управления с возможностью регулирования температуры, а также индикаторы нагревательных приборов.

2. Два электродвигателя с системой шнековых ножей для перемешивания и измельчения среды.

3. Манометры для измерения давления.

4. Нагревательные элементы – ТЭНЫ.

5. Рукав для загрузки сырья.

6. Датчики температуры в биогазовой установке.

Общий внешний вид биогазовой установки представлен на рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальная биогазовая установка

Fig. 1. Experimental biogas plant

В результате проведенного теоретического анализа конструктивных элементов биореактора, оказывающих существенное влияние на протекание технологического процесса анаэробного сбраживания осадков сточных вод в нем, разработан алгоритм экспериментальных исследований.

Алгоритм экспериментальных исследований состоит из следующих этапов:

1. Подготовка экспериментальной биогазовой установки к работе, техническое обслуживание и пуско-наладочные работы.

2. Подготовка исходного сырья для загрузки в биореактор.

3. Загрузка сырья в биореактор с добавлением активатора процесса.

4. Поддержание мезофильного режима при анаэробном сбраживании осадков сточных вод.

5. Циклические замеры показателей температуры и перемешивание исходной биомассы.

6. Замеры уровня воды в расширительном бачке для нормального функционирования ТЭНов.

7. Замеры показателей давления в биореакторе.

8. Замеры показателя выработанного объема биогаза с помощью газоанализатора «ХОББИТ».

### Анализ результатов

Выполненный после экспериментов анализ результатов технологического процесса анаэробного сбраживания осадков сточных вод по выработке биогаза при мезофильном режиме работы в биореакторе позволил выявить некоторые особенности его протекания и пути направления его интенсификации.

В общей сложности, исследования проводились 22 дня последовательно в мезофильном и термофильном режиме работы. В течение данного периода в биореактор загружалась биомасса и запускалась в работу биогазовая установка. Заливка биореактора осуществлялась 100%-м

сырым осадком сточных вод и избыточным активным илом, и для интенсификации процесса добавлялся активатор. Для обеспечения подогрева устанавливались регуляторы температуры 35 °C — при мезофильном режиме и на 55 °C — при термофильном режиме. В период проведения опыта поддерживался периодический мезофильный в течение 15 суток и термофильный режим сбраживания — в течение 7 суток. Режим перемешивания поддерживался на уровне 1–4 скорости, частота перемешивания — один раз в час (по техническим характеристикам устройства), частота перемешивания изменялась в зависимости от режима сбраживания. Ежедневно проводились наблюдения за изменениями значимых факторов, температуры и давления в течение рабочей смены. С периодичностью раз в час проводились замеры, снимались три вида показаний температуры в наружной и внутренней секции, с учетом промежуточной зоны в биореакторе. Три вида показаний температуры, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, снимались во внутренней секции биореактора, в наружной его секции и в переходной зоне между внутренней и наружной секцией, соответственно, в течение 22 дней. Слитую биомассу относили в лабораторию технологического контроля для проведения дальнейшего химического анализа. Результаты опытов по дням представлены в табл. 1–5.

**Таблица 1. Результаты опытов по дням исследований (день первый)**

**Table 1. Results of experiments by days of research (day one)**

№ опыта	t, час	Показания счетчика биогаза		Показания температуры		
		Объем выработанного биогаза, %	Объем выработанного биогаза, гр	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
1	8:00	0,73	2,5172414	20	17	19
	9:00			21	17	20
	10:00	1,34	4,6206897	22	18	21
	11:00			23	19	22
	12:00	1,59	5,4827586	24	20	23
	13:00			28	24	28
	14:00	2,15	7,4137931	32	28	35
	15:00			34	30	35
	16:00	1,89	6,5172414	34	31	36
	17:00			35	31	36

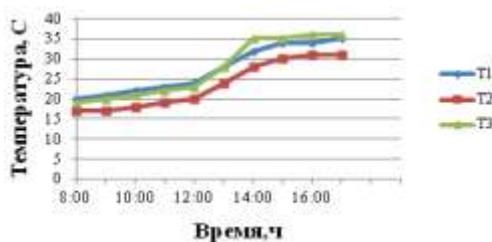


Рис. 2. Экспериментальные исследования зависимости температуры от времени (день первый)

Fig. 2. Experimental studies of temperature versus time (day one)

На рис. 2 приведены графические зависимости изменения температуры от времени.

В последующие дни (второй – пятый день) исследований программа их проведения сохранялась.

Также производились замеры по объему выработанного биогаза в течение рабочей смены с периодичностью один раз в 2 часа.

Таблица 2. Результаты опытов по дням исследований (день второй)

Table 2. Results of experiments by days of research (day two)

№ опыта	t, час	Показания счетчика газа		Показания температуры		
		Объем выработанного биогаза, %	Объем выработанного биогаза, гр	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
1	8:00	1,01	3,4827586	29	26	26
	9:00			30	27	27
	10:00	2,45	8,4482759	30	27	27
	11:00			32	28	32
	12:00	3,07	10,586207	31	29	32
	13:00			32	28	35
	14:00	4,65	16,034483	32.5	28	35
	15:00			32	28	36
	16:00	3,2	11,034483	32	27	35
	17:00			32	27	35

На рис. 3 приведены графические зависимости изменения температуры от времени.

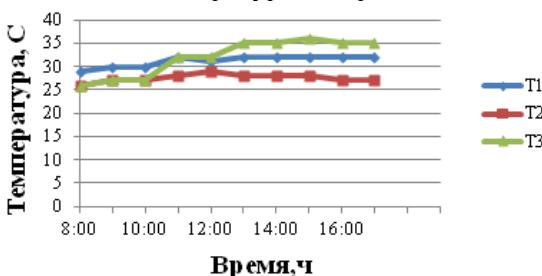


Рис. 3. Экспериментальные исследования зависимости температуры от времени (день второй)

Fig. 3. Experimental studies of temperature versus time (day two)

На рис. 4 приведены графические зависимости изменения температуры от времени.

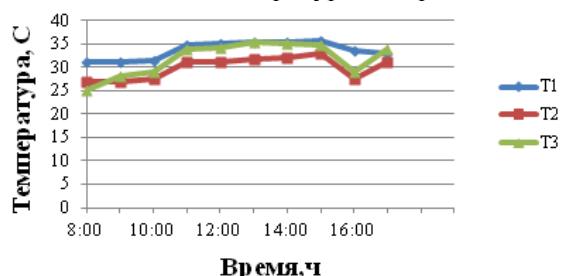


Рис. 4. Экспериментальные исследования зависимости температуры от времени (день третий)

Fig. 4. Experimental studies of temperature versus time (day three)

**Таблица 3. Результаты опытов по дням исследований (день третий)****Table 3. Results of experiments by days of research (day three)**

№ опыта	t, час	Показания счетчика газа		Показания температуры		
		Объем выработанного биогаза, %	Объем выработанного биогаза, гр	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
1	8:00	3,0	10,448276	31	27	25
	9:00			31	27	28
	10:00	4,01	13,827586	31,5	28	29
	11:00			34,8	31	34
	12:00	3,6	12,413793	35	31	34
	13:00			35,3	31,8	35
	14:00	4,46	15,37931	35,5	32	35
	15:00			35,8	32,9	34,8
	16:00	4,2	14,482759	33,5	28	29
	17:00			33	31	34

**Таблица 4. Результаты опытов по дням исследований (день четвертый)****Table 4. Results of experiments by days of research (day four)**

№ опыта	t, час	Показания счетчика газа		Показания температуры		
		Объем выработанного биогаза, %	Объем выработанного биогаза, гр	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
1	8:00	1,76	6,0689655	33	28	28
	9:00			34	29	29
	10:00	2,36	8,137931	34,1	30	30
	11:00			34,8	31	33,8
	12:00	3,24	11,172414	35	31,5	33,5
	13:00			34,9	31,5	33,8
	14:00	5,56	19,172414	35,8	31,4	34
	15:00			35	31	33
	16:00	3,95	13,62069	34	30	32
	17:00			34	30	31

На рис. 5 приведены графические зависимости изменения температуры от времени.

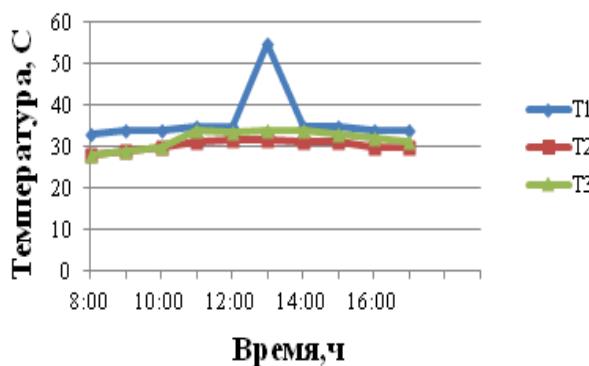


Рис. 5. Экспериментальные исследования зависимости температуры от времени (день четвертый)

Fig. 5. Experimental studies of temperature versus time (day four)

Сравнительная характеристика экспериментальных данных отражает реальные значения выработки биогаза, скачкообразное максимальное значение обусловлено влиянием активатора и увеличением роста метаногенных микроорга-

низмов на четвертый день экспериментов при мезофильном режиме сбраживания.

На рис. 6 приведены графические зависимости изменения температуры от времени.

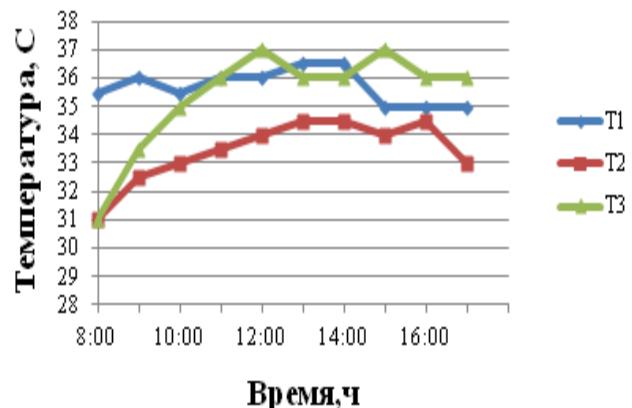


Рис. 6. Экспериментальные исследования зависимости температуры от времени (день пятый)

Fig. 6. Experimental studies of temperature versus time (day five)

Таблица 5. Результаты опытов по дням исследований (день пятый)

Table 5. Results of experiments by days of research (day five)

№ опыта	t, час	Показания счетчика газа		Показания температуры		
		Объем выработанного биогаза, %	Объем выработанного биогаза, гр	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
1	8:00	0,77	2,6551724	35,5	31	31
	9:00			36	32,5	33,5
	10:00	0,85	2,9310345	35,5	33	35
	11:00			36	33,5	36
	12:00	0,92	3,1724138	36	34	37
	13:00			36,5	34,5	36
	14:00	7,66	26,413793	36,5	35	36
	15:00			35	34	37
	16:00	3,65	12,586207	35	34,5	36
	17:00			35	33	36

Зависимость выработанного биогаза по дням исследований при мезофильном режиме анаэробного сбраживания в биореакторе при

достижении оптимальных показателей по объему выработанного биогаза представлена на рис. 7.



Рис. 7. Зависимость выработанного биогаза по дням исследований

Fig. 7. Dependence of the produced biogas by days of research

Количество вырабатываемого биогаза определялось с помощью газоанализатора марки «Хоббит-Т», предназначенного для измерения содержания горючих газов, в том числе метана. Точность измерения прибора находится в пределах допускаемой вариации показаний газоанализатора в долях от предела основной погрешности и не превышает 0,5 %. Предел  $T_{0,9d}$  допускаемого времени установления показаний не превышает 20 с для каналов O<sub>2</sub> и каналов горючих газов с термокаталитическими сенсорами.

Принцип работы прибора «Хоббит-Т» основан на преобразовании измеряемых концентраций в электрические параметры первичных сенсоров. При включении после длительного перерыва показания газоанализатора стабилизируются не более чем через 15 минут. По истечении режима подготовки к работе газоанализатор работает в автоматическом режиме.

Результаты измерений и показания газоанализатора выводятся на дисплей, в табло представлена формула и концентрация биогаза, а также единица измерения. Газоанализатор выдает сигналы управления контактами реле, которые переключаются в случае достижения содержания метана пороговых значений, которые составляют 0,44 об. % (Порог 1) и в случае преждевременного износа сенсоров срабатывает сигнализация перегрузки сенсоров, которая регулируется уровнем пороговых значений, составляющих 0,66–2,2 об. % (Порог 2). О загазованности помещения персонал предупреждает устройство звукового оповещения газоанализатора. Краткие технические характеристики газоанализатора марки «Хоббит-Т»: способ забора пробы является диффузионным, диапазон измерений и показаний метана составляет 0–2,5 об. %, цена единицы наименьшего разряда составляет 0,01 об. %, верхний предел относительной влажности воздуха составляет 95 % с учетом температуры

равной 30 °C и рабочих климатических условий УХЛ.2.

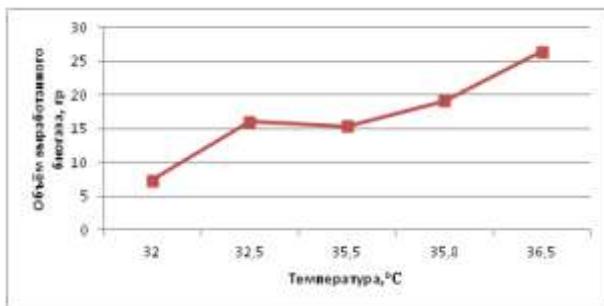


Рис. 8. Зависимость выработанного биогаза от температуры

Fig. 8. Dependence of the produced biogas on temperature

Анализ экспериментальных данных выработки биогаза в зависимости от факторов (режим работы биогазовой установки, применение активатора, теплоизоляция установки состав сырья, водородный показатель среды), позволил выявить наиболее значимый критерий – активатор процесса. Активатор анаэробного сбраживания органических отходов представляет собой вещество, которое стимулирует развитие метаногенных микроорганизмов при благоприятных факторах процесса. Подобный эффект был получен и в исследовании российских ученых [14–17].

Рассматривая метод обработки осадков сточных вод с учетом климатических условий Удмуртской Республики, проводилось сравнение по системе критериев, представляющих собой:

- объем вырабатываемого биогаза;
- производительность технологического процесса по объему перерабатываемого субстрата;
- выход готовых продуктов;
- степень очистки готового продукта;
- простота поддержания технологического процесса.

Представленные критерии в совокупности формируют интегральный критерий оптимизации технологического процесса анаэробного сбраживания осадков сточных вод в биореакторе, реализуемого на очистных сооружениях канализации по обработке осадка, и влияют на его экономическую эффективность и экологическую безопасность произведенной готовой продукции. Экологическая безопасность зависит от значимого фактора загрязненности органических отходов патогенными микроорганизмами, такими бактериями, как *Salmonella* sp., *Shigella* sp., *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, и вирусами, такими как *Enterovirus* sp.,

*Hepatovirus sp.*, *Reovirus sp.*, а также яйцами гельминтов [14]. Обеззараживание осадков сточных вод в биоректоре при мезофильном и термофильном режиме анаэробного сбраживания является эффективным методом обработки от патогенных микроорганизмов. Эффективность технологического процесса зависит от таких факторов, как скорость загрузки сырья в биореактор, соотношение величины показателя углерода и азота С/Н в сбраживаемой биомассе, дозы внесения активатора процесса, температуры, значение величины рН, влажности биомассы, химического состав субстрата и количества органических веществ в биомассе до и после загрузки в биореактор, продолжительности анаэробного сбраживания осадков сточных вод в биореакторе, конструкции биореактора, загрязненности органических отходов патогенными микроорганизмами.

При проведении сравнительного анализа на основании теоретических и экспериментальных данных с учетом критерия оценки производительности технологического процесса по объему перерабатываемого субстрата и вырабатываемого биогаза, выходу готовых продуктов было установлено, что активатор является значимым фактором. Влияние активатора на интенсификацию технологического процесса по выработке максимального объема вырабатываемого биогаза зависит от микроорганизмов-активаторов, образующих активные вещества, посредством которых происходит стимулирование развития метаногенных микроорганизмов при поддержании оптимальных температур в мезофильном и термофильном режиме анаэробного сбраживания в биоректоре.

При добавлении активатора происходит интенсификация процесса анаэробного сбраживания осадков сточных вод в биогазовой установке, что также подтверждается источниками [18, 19]. Можно отметить, что качественные результаты не противоречат ранее полученным данным.

По экспериментальным данным произведен технико-экономический расчет и определен объем выработанного биогаза, который составил  $v=1,286 \text{ м}^3/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$

Стоимость 1  $\text{м}^3$  биогаза на 2024 год составляет 7,50 руб. Исходя из вышесказанного, стоимость продажи выработанного биогаза составит 5545,87 руб./сут. или 2 024 244 руб./год. Как установлено группой ученых в [20–23], биогаз, выработанный в биореакторе,

позволит обеспечить 50 % потребностей станции очистных сооружений канализации тепловой энергией при использовании Мини-ТЭС. Предполагается, что применение биогазовых технологий позволит обеспечить энергоэффективность процесса очистки сточных вод при аварийном отключении внешних источников энергоснабжения. В табл. 6 представлены технико-экономические показатели эффективности использования биореактора.

**Таблица 6. Технико-экономические показатели эффективности использования биореактора**

*Table 6. Technical and economic indicators of bioreactor utilization efficiency*

Статьи затрат	Годовые затраты, руб.
Затраты на электроэнергию	7 187 500,00
Заработка платы производственных рабочих	819 600,00
Социальные отчисления	272 829,60
Амортизационные отчисления	720 000,00
Затраты на сушку осадка	23 000 000,00
Затраты на текущий ремонт	43 200,00
Экономия от продажи биогаза	1 152 470,00
Экономия от продажи биоудобрения	4 440 000,00
<b>Итого:</b>	<b>3 450 659,6</b>

Годовые затраты при внедрении экспериментального биореактора на очистных сооружениях канализации водоканалов Удмуртской Республики составят 3 450 659,6 рублей.

### Выводы

1. В период проведения технологической и научно-исследовательской практики студентов на базовой кафедре «Инженерные системы ЖКХ» проведены экспериментальные исследования анаэробного сбраживания осадков сточных вод в мезофильном режиме. Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графических зависимостей объема выработанного биогаза от температуры и продолжительности процесса. Объем выработанного биогаза возрастает в зависимости от повышения температуры и продолжительности процесса.

В первый день опыта объем выработанного биогаза составил 2,15 % (7,41 гр) при температуре 32 °C, с увеличением температуры объем выработанного биогаза повышался.

2. Представлены результаты экспериментальных исследований при мезофильном режиме анаэробного сбраживания органических отходов в биореакторе. Максимальный объем выработанного биогаза достиг наибольшего значения на пятый день опыта и составил 7,66 % (26,413 гр.) при температуре 36,5 °C.

3. При проведении сравнительного анализа на основании теоретических и экспериментальных данным с учетом критерия оценки производительности технологического процесса по объему перерабатываемого субстрата и вырабатываемого биогаза установлено, что на интенсификацию технологического процесса влияет концентрация микроорганизмов-активаторов, способствующих выработке максимального объема вырабатываемого биогаза.

4. В процессе экспериментов был выявлен один из наиболее значимых факторов, влияющий на выработку биогаза, – активатор процесса. Применение биореактора на очистных сооружениях канализации водоканалов Удмуртской Республики позволит повысить энергоэффективность технологического процесса обработки осадков сточных вод за счет использования активатора процесса.

5. Биогаз, выработанный в биореакторе, позволит частично обеспечить тепловой энергией очистные сооружения канализации водоканалов Удмуртской Республики. Осадок сточных вод, переработанный в биогазовой установке, можно будет использовать в качестве почвогрунта, при применении в «зеленых» технологиях.

#### **Библиографические ссылки**

1. Абрамова А. А., Исаков В. Г., Непогодин А. М. Зеленые технологии в очистке поверхностных и сточных вод объектов ЖКХ // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования : материалы VIII Междунар. конф. : в 2 т. Т. 1. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. С. 460–465. EDN: ZIXZFZ.
2. Оценка специфических загрязнений в составе городских сточных вод / А. А. Абрамова, Н. М. Мезрин, М. Ю. Дягелев, В. Г. Исаков // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 7. С. 34–41. DOI: 10.35776/VST.2022.07.05. EDN: MZBRAVA.
3. Благоразумова А. М. Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод : учеб. пособие. М. : Лань, 2014. 208 с. EDN: TXPJOt.
4. Волкова А. А., Шишкунов В. Г. Системный анализ и моделирование процессов в техносфере : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. 244 с.
5. Горлушкина Н. Н. Системный анализ и моделирование информационных процессов и систем : учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2016. 120 с.
6. Горбачева Т. Т., Мазухина С. И., Черепанова Т. А. Физико-химическое моделирование форм нахождения элементов как дополнение к методу биотестирования талых снежных вод // Химия в интересах устойчивого развития. 2017. Т. 25, № 2. С. 165–172. DOI 10.15372/KhUR20170207. EDN YLEVfJ.
7. Григорьев В. С., Ковалев А. А. Система предварительной подготовки субстратов метантенков в аппарате вихревого слоя с рекуперацией теплоты // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67, № 2 (39). С. 8–13. DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-2-8-13. EDN APQBVY.
8. Гюнтер Л. И., Гольдфарб Л. Л. Метантенки : учеб. пособие. Москва : Стройиздат, 199. 126 с. (Охрана окружающей природ. среды). ISBN 5-274-00323-0.
9. Метод сравнительной оценки тепловых потерь биореакторов на этапе аванпроекта биогазовой установки / В. Н. Диценко, М. В. Свалова, А. В. Исаев, Н. Д. Узаков // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 5 (121). С. 61–66. EDN QFKORS.
10. Копылов А. С., Лавыгин В. М., Очков В. Ф. Водоподготовка в энергетике : учеб. пособие. М. : Изд. дом МЭИ, 2016. 310 с.
11. Колосова Н. В., Монах С. И. Математическая модель тепломассообмена при получении биогаза в метантенке // Современное промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 67–74.
12. Ксенофонтов Б. С. Обработка осадков сточных вод : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2022. 262 с. Доп. материалы. (Высшее образование: Магистратура). DOI 10.12737/textbook\_5d0c6abec8d5f8.14129585. ISBN 978-5-16-014577-8.
13. Ксенофонтов Б. С. Технологические основы обработки осадков сточных вод с использованием комбинированной техники и технологий : монография. М. : ИНФРА-М, 2024. 362 с. (Научная мысль). DOI 10.12737/2137625. ISBN 978-5-16-019793-7.
14. Никитина А. А. Биотехнологические и микробиологические аспекты термофильной анаэробной переработки коммунальных органических отходов при высокой нагрузке по субстрату: автореф. дис. Москва, 2019. 24 с. EDN: YYEQZF.
15. Оковитая К. О. Повышение эффективности работы метантенков // Эффективные технологии в области водоподготовки и очистки в системах водоснабжения и водоотведения. 2021. С. 54–56.
16. Паршикова М. В. Двухсекционный биореактор для анаэробного сбраживания органических

- отходов. Паршикова М. В. Патент на изобретение RU 2811623 C1, 15.01.2024. Заявка от 30.10.2023. // Патентообладатель ИжГТУ. EDN: NSAUDQ.
17. Петухова Е. А., Ручникова О. И. Дефосфатация сточных вод // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. № 2. 136 с.
18. Провоторова А. А. Сравнительный анализ использования аэротенков и метантенков при очистке сточных вод // Современная наука и ее ресурсное обеспечение: Инновационная парадигма : сборник статей по материалам VI Международной научно-практической конференции. 2021. С. 97–102.
19. Соловьева Е. А., Бабенко А. С. Очистка городских сточных вод, обработка и биологическая трансформация осадка : монография. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2019. 140 с. ISBN 978-5-94621-875-7.
20. Смирнова А. Р. Пути повышения эффективности работы метантенков // Научный форум: технические и физико-математические науки : сборник статей по материалам XXXI Международной научно-практической конференции. 2020. С. 23–30.
21. Trusey, I. V., Gurevich, Yu. L., Ladygin, V. P., Lakin, Yu. P. and Fadeev, S. V. Analysis of the content of nitrate and ammonium ions at bioremediation of ground water polluted by oil products. Chemistry for Sustainable Development, 2017, No. 2. pp. 199–205.
22. Ханова Е. Л., Сахарова А. А., Геращенко А. А. Способ интенсификации работы метантенков с разделением фаз брожения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 1 (74). С. 72–79.
23. Юхин Д. П. К вопросу повышения эффективности функционирования метантенка биогазовой установки // Наука молодых – инновационному развитию АПК : материалы XII национальной научно-практической конференции молодых ученых. 2019. С. 168–172.

### References

1. Abramova A. A., Isakov V. G., Nepogodin. A. M. *Zelenye tekhnologii v ochistke poverkhnostnykh i stochnykh vod ob"ektov ZHKKH* [Green technologies in the treatment of surface and waste water of housing and communal facilities]. *Tekhnicheskie university: integraciya s evropejskimi i mirovymi sistemami obrazovaniya : materialy VIII Mezhdunar. konf.* [Proceedings of the VIII International Conf. "Technical Universities: Integration with European and World Education Systems"]: in 2 vol. Vol. 1. Izhevsk: IzdvolzhGTU named after M.T. Kalashnikov. 2019. Pp. 460-465 (in Russ.). EDN: ZIXZFZ.
2. Abramova A. A., Mezrin N. M., Dyagelev M.Yu., Isakov V.G. [Assessment of specific pollutants in the composition of urban wastewater]. Water supply and sanitary engineering. 2022. No. 7. Pp. 34–41 (in Russ.). DOI: 10.35776/VST.2022.07.05. EDN: MZBRVA.
3. Blagorazumova A.M. *Obrabotka i obezvozhivanie osadkov gorodskikh stochnykh vod* [Processing and dewatering of urban sewage sludge: textbook]. Moscow, Lan, 2014. 208 p. (in Russ.). EDN: TXPJOT
4. Volkova A.A., Shishkunov V.G. *Sistemnyj analiz i modelirovanie processov v tekhnosfere* [System analysis and modeling of processes in the technosphere : textbook]. Yekaterinburg: Izd-v. Ural. unta, 2019. 244 p. (in Russ.).
5. Gorlushkina N.N. *Sistemnyj analiz i modelirovanie informacionnykh processov i sistem* [System analysis and modeling of information processes and systems: textbook]. SPb.: ITMO University, 2016. 120 p. (in Russ.).
6. Gorbacheva T.T., Mazukhina S.I. and Cherepanova T.A. [Physicochemical modelling of element speciation as an addition to a biotestingmethod of melted snow water]. Chemistry for Sustainable Development. 2017. No. 2. Pp. 161-168 (in Russ.). EDN YLEVFJ.
7. Grigoriev V.S., Kovalev A.A. [System of preliminary preparation of digester substrates in a vortex layer apparatus with heat recovery]. Electrotechnologies and electrical equipment in agroindustrial complex. 2020. No. 2. P. 8-13 (in Russ.). EDN APQBPY.
8. Gunter L.I., Goldfarb L.L. *Metantenki* [Metanteki: textbook]. Moscow. Stroyizdat (Environmental Protection), 1991. 126 p. (in Russ.). ISBN 5-274-00323-0.
9. Didenko V.N., Isaev A.V., Uzakov N.D. [Method of comparative evaluation of the bioreactor heat losses at the stage of the biogas plant advance design]. Scientific and Technical Journal "Energy saving and water treatment". 2019. No. 5. Pp. 61-65 (in Russ.). EDN QFKORS.
10. Kopylov A.S., Lavigin V.M., Ochkov V.F. *Vodopodgotovka v ehnergetike* [Water treatment in power engineering: textbook]. Moscow: MPEI Publishing House, 2016. 310 pp. (in Russ.).
11. Kolosova N.V., Monakh S.I. [Mathematical model of heat and mass transfer at biogas production in a digester]. Modern industrial and civil engineering. 2019. No. 2. Pp. 67-74 (in Russ.).
12. Ksenofontov B.S. *Obrabotka osadkov stochnykh vod* [Processing of sewage sludge: textbook]. Moscow: INFRA-M, 2022. 262 p. (Higher education: Master's degree) (in Russ.). DOI 10.12737/textbook\_5d0c6a6ec8d5f8.14129585.
13. Ksenofontov B.S. *Tekhnologicheskie osnovy obrabotki osadkov stochnykh vod s ispol'zovaniem kombinirovannoj tekhniki i tekhnologij* [Technological bases of sewage sludge treatment using combined techniques and technologies: a monograph]. Moscow: INFRA-M, 2024. 362 p. (Scientific thought) (in Russ.). DOI 10.12737/2137625.
14. Nikitina A.A. *Biotehnologicheskie i mikrobiologicheskie aspekty termofil'noj anaerobnoj pererabotki kommunal'nykh organicheskikh otkhodov pri*

- vysokoj nagruzke po substratu [Biotechnological and microbiological aspects of thermophilic anaerobic processing of municipal organic wastes at high substrate load: thesis abstract]. Moscow. 2019. 24 p. (in Russ.). EDN: YYEQZF
15. Okovitaya K.O. [Improving the efficiency of digesters]. Effective technologies in the field of water treatment and purification in water supply and wastewater disposal systems. 2021. P. 54-56 (in Russ.).
16. Parshikova M.V. *Dvuhsekcionnyj bioreaktor dlya anaerobnogo sbrazhivaniya organicheskikh otkhodov* [Two-section bioreactor for anaerobic digestion of organic wastes]. Parshikova M.V. Patent for invention RU 2811623 C1, 15.01.2024. Application dated 30.10.2023. // Patentee IzhGTU (in Russ.). EDN: NSAUDQ.
17. Petukhova E.A., Ruchnikova O.I. [Defosfation of wastewater]. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urbanistics. 2017. No. 2. 136 p. (in Russ.).
18. Provotorova A.A. *Sravnitel'nyj analiz ispol'zovaniya aehrotenkov i metantenkov pri ochistke stochnykh vod* [Comparative analysis of the use of aeration tanks and digesters in wastewater treatment]. Sovremennaya nauka i ee resursnoe obespechenie: Innovacionnaya paradigma : sbornik statej po materialam VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Proc. Modern science and its resource support: Innovation paradigm. Collection of articles on the materials of VI international scientific-practical conference]. 2021. Pp. 97-102 (in Russ.).
19. Solovieva E.A., Babenko A.S. *Ochistka gorodskikh stochnykh vod, obrabotka i biologicheskaya transformaciya osadka* [Urban wastewater treatment, sludge treatment and biological transformation: a monograph]. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2019. 140 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94621-875-7.
20. Smirnova A.R. *Puti povyshenii ehffektivnosti raboty metantenkov* [Ways to improve the efficiency of digesters]. Nauchnyj forum: tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki : sbornik statej po materialam XXXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Proc. scientific forum: technical, physical, and mathematical sciences. Collection of articles on the materials of XXXI international scientific-practical conference]. 2020. Pp. 23-30 (in Russ.).
21. Trusey I.V., Gurevich Yu.L., Ladygin V.P., Lakin Yu.P. and Fadeev S.V. [Analysis of the content of nitrate and ammonium ions at bioremediation of ground water polluted by oil products]. Chemistry for Sustainable Development. 2017. No. 2. Pp. 199-205 (in Russ.).
22. Khanova E.L., Sakharova A.A., Gerashchenko A.A. [Method of intensification of digesters with separation of fermentation phases]. Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. 2019. No. 1. Pp. 72-79 (in Russ.).
23. Yukhin D.P. *K voprosu povysheniya ehffektivnosti funkcionirovaniya metantenka biogazovoj ustanovki* [To the issue of improving the efficiency of biogas digester functioning]. Nauka molodykh – innovacionnomu razvitiyu APK : materialy XII nacion-al'noj nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh uchenykh [Proc. Science of the young - innovative development of agroindustrial complex. Materials of the XII national scientific-practical conference of young scientists], 2019. Pp. 168-172 (in Russ.).

\*\*\*

## Results of Research on Technological Process of Sewage Sludge Treatment in Bioreactor

M. V. Parshikova, Ph.D., associate professor of water supply and water treatment, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

B. I. Veiber, Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

M. S. Kalashnikov, Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

*This paper analyzes the design of an experimental biogas plant for organic waste treatment. In the experimental studies, sewage sludge was used as organic waste. Based on the experimental research program, the volume of biogas produced in the plant under mesophilic mode of anaerobic digestion was determined during the period of experiments. During the experiments, the periodic mesophilic and thermophilic mode of anaerobic digestion of sewage sludge in the bioreactor was maintained, the paper presents the results of experiments in the mesophilic mode of anaerobic digestion. In the process of digestion of sewage sludge, in mesophilic mode, the presence of biogas was determined using a gas analyzer «Hobbit-T». During the operation of the experimental bioreactor the significant factors affecting the process of biogas production in the plant were investigated. The article considered the principle of operation and design of the biogas plant. Experimental studies of anaerobic digestion of sewage sludge in the bioreactor under mesophilic mode with regard to the optimization criterion of the technological process were considered. Preparation of the biogas plant for the operational mode and further operation at the sewage treatment facilities of water channels of the Udmurt Republic is carried out. The algorithm of experimental research is presented, the mesophilic mode of anaerobic digestion and the results of experiments are considered. The use of energy-efficient technology of anaerobic digestion of sewage sludge using an experimental biogas plant allows to obtain biogas from organic wastes, as well as to reveal the influence of the process activator on the operation of the experimental*

*bioreactor for sewage sludge treatment. The biogas produced in the bioreactor will partially provide heat energy for sewage treatment facilities of the Udmurt Republic during emergency power outages. The sewage sludge processed in the biogas plant can be used as soil when applied in «green» technologies.*

**Keywords:** anaerobic digestion, bioreactor, mesophilic regime, sewage sludge, sewage treatment facilities, technical and economic efficiency, experimental studies.

Получено: 13.02.25

**Образец цитирования**

Паршикова М. В., Вейбер Б. И., Калашников М. С. Результаты исследований технологического процесса обработки осадков сточных вод при мезофильном режиме в биореактор // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 3. С. 12–27. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-3-12-23.

**For Citation**

Parshikova M.V., Veiber B.I., Kalashnikov M.S. [Results of research on technological process of sewage sludge treatment in bioreactor]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 12-23 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-3-12-23.