

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Сәтбаев Университеті

Институт Химических и Биологических Технологий

Кафедра Химической и Биохимической Инженерии

Моминова Рисалят Мурадиловна

Планирование и оптимизация биотехнологических процессов при анаэробном  
разложении органических отходов в метантенках

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

Специальность 5В701000 - Биотехнология

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Сәтбаев Университеті

Институт Химических и Биологических Технологий

Кафедра Химической и Биохимической Инженерии

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой  
Химической и Биологической  
Инженерии  
Доктор химических наук,  
доцент  
\_\_\_\_\_ Елигбаева Г.Ж.  
“21” мая 2020 г.

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

На тему: “Планирование и оптимизация биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках”

по специальности 5В070100-Биотехнология

Выполнила

Моминова Р.М.

Научный руководитель  
канд. с/х. наук, доцент,  
ассоц. Профессор  
\_\_\_\_\_ Джамалова Г.А.  
“21” мая 2020 г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Сәтбаев Университеті

Институт Химических и Биологических Технологий

Кафедра Химической и Биохимической Инженерии

Специальность 5В070100 - Биотехнология

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
Химической и Биологической  
Инженерии  
Доктор химических наук,  
доцент  
\_\_\_\_\_ Елигбаева Г.Ж.  
“21” мая 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломного проекта**

Обучающейся: Моминовой Рисалят Мурадиловне

Тема: “Планирование и оптимизация биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках”

Утверждена приказом Ректора Университета № 1163-б от “16” октября 2020г.

Срок сдачи законченной работы “15” мая 2020г.

Исходные данные к дипломному проекту

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) проведение теоретических исследований по изучению особенностей анаэробного разложения органических отходов в метантенках;*
- б) планирование пятифакторного эксперимента на основе биохимических процессов разложения органических отходов в условиях метантенка;*
- в) оптимизация рассматриваемых факторов анаэробного биоразложения в метантенках на процесс образования метана в составе биогаза.*

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): *представлены 9 слайдов в презентации проекта.*

Рекомендуемая основная литература *состоит из 43 наименований.*

## ГРАФИК

### Подготовки дипломного проекта

| Наименование разделов,<br>перечень разрабатываемых<br>вопросов | Сроки представления<br>научному<br>руководителю | Примечание |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|
| 1 Обзор литературы                                             | 25.03.2020                                      |            |
| 2 Материал и методика<br>исследований                          | 05.04.2020                                      |            |
| 3 Результаты исследований                                      | 10.05.2020                                      |            |

## Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с  
указанием относящихся к ним разделов проекта

| Наименования<br>разделов             | Консультанты,<br>И.О.Ф.<br>(уч.степень,<br>звание)              | Дата подписания | Подпись |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|---------|
| Разделы 1-3<br>дипломного<br>проекта | Г.А.Джамалова<br>канд. с/х. наук,<br>доцент,<br>ассоц.профессор | 22.04.2020      |         |
| Нормоконтролер                       | Г.А.Джамалова<br>канд. с/х. наук,<br>доцент,<br>ассоц.профессор | 22.04.2020      |         |

Научный руководитель \_\_\_\_\_

Джамалова Г.А.

Задание принял к исполнению обучающийся \_\_\_\_\_

Моминова Р.М.

Дата

“22” апреля 2020г.

## АННОТАЦИЯ

Тема. Планирование и оптимизация биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках.

Ключевые слова: органические отходы, метантенк, анаэробное биоразложение, метаногенез, биогаз.

Цель. Планирование и оптимизация биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках.

Объект исследования: Органические отходы.

Предмет исследования: Процесс анаэробного разложения органических отходов в условиях метантенка.

Задачи. Провести теоретические исследования по изучению особенностей анаэробного разложения органических отходов в метантенках. Планирование пятифакторного эксперимента на основе биохимических процессов разложения органических отходов в условиях метантенка. Оптимизация рассматриваемых факторов анаэробного биоразложения в метантенках на процесс образования метана в составе биогаза.

Полученные результаты. Анализ обобщенного уравнения показал, что метаногенез при анаэробном разложении органических веществ в метантенке при заданных технологических параметрах (температура, фактор  $X_1$ ; 55 °C), содержание в субстрате летучих жирных кислот ( $X_2 = 6000$  мг/л), аммиака (фактор  $X_3 = 200$  мг/л), щелочных металлов (фактор  $X_5 = 200$  мг/л), а также pH (фактор  $X_4 = 7,8$ ) способствует выделению метана в составе биогаза в максимальном интервале 79,06 %.

Практическое значение. В условиях производства применение методов математического моделирования имеет практическое решение, т.к. позволяет интенсифицировать и оптимизировать процесс анаэробного разложения органических отходов в условиях метантенка в целях повышения выхода продуктов разложения – метана в составе биогаза.

Структура и объем. Дипломная работа оформлена на 31 странице компьютерного текста, включает введение, три главы (обзор литературы, материал и методика исследований, результаты исследования) и заключение, содержит 6 рисунков, 6 таблиц. В библиографическом указателе литературы даны ссылки на 43 источников.

## АНДАТПА

Тақырыбы. Метантенктердегі органикалық қалдықтардың анаэробты ыдырауы кезіндегі биотехнологиялық процестерді жоспарлау және оңтайландыру.

Негізгі сөздер: органикалық қалдықтар, метантенк, анаэробты биологиялық ыдырау, метаногенез, биогаз.

Мақсаты. Метантенктердегі органикалық қалдықтардың анаэробты ыдырауы кезіндегі биотехнологиялық процесстерді жоспарлау және оңтайландыру.

Зерттеу нысаны: органикалық қалдықтар.

Зерттеу тақырыбы: метантенк жағдайында органикалық қалдықтардың анаэробты ыдырау процессі.

Міндеттері. Метантенктердегі органикалық қалдықтардың анаэробты ыдырауының ерекшеліктерін зерттеу бойынша теориялық зерттеулер жүргізу. Органикалық қалдықтарды метантенкте ыдыраудың биохимиялық процесстеріне негізделген бес факторлы экспериментті жоспарлау. Биогаз құрамындағы метанның түзілуіне байланысты анаэробты биоалаңдаудың қарастырылған факторларын оңтайландыру.

Алынған нәтижелер. Қорытылған теңдеу талдауы көрсетілген технологиялық параметрлермен (температура, фактор  $X_1$ ; 55 °C) метантенкте органикалық заттардың анаэробтық ыдырауы кезіндегі метаногенез, ұшпа май қышқылдарының ( $X_2 = 6000$  мг/л), аммиак (фактор  $X_3 = 200$  мг/л), сілтілі металдар (фактор  $X_5 = 200$  мг/л), сондай-ақ рН (фактор  $X_4 = 7,8$ ) биогаз құрамындағы метанның максималды 79,06%диапазонда шығарылуына әсер ететінін көрсетті.

Практикалық маңызы. Өндіріс жағдайында математикалық моделдеу әдістерін қолдану практикалық шешімі бар, өйткені биогаз құрамындағы ыдырау өнімдерінің шығуын арттыру мақсатында метантенк\ жағдайында органикалық қалдықтардың анаэробтық ыдырау процесін қарқындатуға және оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Құрылымы және көлемі. Дипломдық жұмыс компьютерлік мәтіннің 31беттерінде ресімделген, кіріспе, үш тарау (әдебиетке шолу, зерттеу материалдары мен әдістемесі, зерттеу нәтижелері) және қорытынды, 6 сурет, 6 кестеден тұрады. Библиографиялық көрсеткіште 43 дерекнамаға сілтемелер берілген.

## ANNOTATION

Topic. Planning and optimization of biotechnological processes for anaerobic decomposition of organic waste in methane tanks.

Key words: organic waste, digester, anaerobic biodegradation, methanogenesis, biogas.

Goal. Planning and optimization of biotechnological processes for anaerobic decomposition of organic waste in methane tanks.

Object of research: Organic waste.

Subject of research: the process of anaerobic decomposition of organic waste in a methane tank.

Tasks. Conduct theoretical research on the study of the features of anaerobic decomposition of organic waste in methane tanks. Planning a five-factor experiment based on the biochemical processes of decomposition of organic waste in a methane tank. Optimization of the considered factors of anaerobic biodegradation in methane tanks for the formation of methane in the composition of biogas.

Obtained result. Analysis of the generalized equation showed that methanogenesis during anaerobic decomposition of organic substances in the methane tank at the specified technological parameters (temperature, factor X1; 55 °C), the content of volatile fatty acids in the substrate ( $x_2 = 6000$  mg/l), ammonia (factor X3 = 200 mg/l), alkali metals (factor X5 = 200 mg/l), and pH (factor X4 = 7.8) contributes to the release of methane in the biogas in the maximum range of 79.06 %.

Practical importance. In production conditions, the use of mathematical modeling methods has a practical solution, since it allows to intensify and optimize the process of anaerobic decomposition of organic waste in a methane tank in order to increase the yield of decomposition products-methane in the composition of biogas.

Structure and volume. The thesis is designed on 31 pages of computer text, includes an introduction, three chapters (literature review, research material and methodology, research results) and a conclusion, contains 6 figures, 6 tables. The bibliographic index of literature contains references to 43 sources.

## СОДЕРЖАНИЕ

|         |                                                                                                        |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|         | Введение                                                                                               | 9  |
| 1       | Аналитический обзор литературы                                                                         | 10 |
| 1.1     | Органические отходы: классификация и методы переработки                                                | 10 |
| 1.1.1   | Классификация отходов                                                                                  | 10 |
| 1.1.2   | Методы переработки органических отходов                                                                | 11 |
| 1.2     | Экотребования по обращению с отходами                                                                  | 11 |
| 1.3     | Метантенк, как аппарат для анаэробного биоразложения отходов                                           | 12 |
| 1.3.1   | Метантенк-резервуар для биологической переработки отходов                                              | 12 |
| 1.3.2   | Конструктивные особенности метантенка                                                                  | 13 |
| 1.3.3   | Классификация метантенков                                                                              | 14 |
| 1.4     | Характеристика анаэробного разложения отходов                                                          | 15 |
| 1.4.1   | Фазы анаэробного биоразложения органических отходов                                                    | 15 |
| 1.4.1.1 | Гидролиз                                                                                               | 15 |
| 1.4.1.2 | Ацидогенез                                                                                             | 16 |
| 1.4.1.3 | Ацетогенез                                                                                             | 16 |
| 1.4.1.4 | Метаногенез                                                                                            | 16 |
| 1.4.2   | Микроорганизмы анаэробного разложения                                                                  | 17 |
| 1.4.3   | Условия протекания процессов анаэробного разложения                                                    | 17 |
| 1.4.3.1 | Температура                                                                                            | 17 |
| 1.4.3.2 | pH                                                                                                     | 18 |
| 1.4.3.3 | Скорость загрузки метантенка                                                                           | 18 |
| 1.4.3.4 | Давление                                                                                               | 18 |
| 1.4.3.5 | Оптимальное соотношение C / N                                                                          | 18 |
| 2       | Объект, предмет и методы исследования                                                                  | 19 |
| 3       | Результаты исследования                                                                                | 20 |
| 3.1     | Планирование биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках | 20 |
| 3.2     | Оптимизация биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках  | 24 |
|         | Заключение                                                                                             | 30 |
|         | Библиографический список литературы                                                                    | 31 |



## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность.* Планирование и оптимизация биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках методами математического моделирования позволит в условиях производства найти решения по интенсифицированной и оптимизированной схеме переработке органических отходов в целях производства возобновляемой энергии – биогаза, который, в свою очередь, можно использовать для получения тепловой или электрической энергии, что очень актуально для хозяйственных нужд производственных объектов.

*Цель.* Планирование и оптимизация биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках.

*Объект исследования:* Органические отходы.

*Предмет исследования:* Процесс анаэробного разложения органических отходов в условиях метантенка.

*Задачи:*

1 Провести теоретические исследования по изучению особенностей анаэробного разложения органических отходов в метантенках.

2 Планирование пятифакторного эксперимента на основе биохимических процессов разложения органических отходов в условиях метантенка.

3 Оптимизация рассматриваемых факторов анаэробного биоразложения в метантенках на процесс образования метана в составе биогаза.

*Практическое значение.* В условиях производства применение методов математического моделирования имеет практическое решение, т.к. позволяет интенсифицировать и оптимизировать процесс анаэробного разложения органических отходов в условиях метантенка в целях повышения выхода продуктов разложения – метана в составе биогаза.

*Структура и объем.* Дипломная работа оформлена на 31 странице компьютерного текста, включает введение, три главы (обзор литературы, материал и методика исследований, результаты исследования) и заключение, содержит 6 рисунков, 6 таблиц. В библиографическом указателе литературы даны ссылки на 43 источников.

# 1 Аналитический обзор литературы

## 1.1 Органические отходы: классификация и методы переработки

### 1.1.1 Классификация отходов

Органические отходы – это отходы, которые легко разлагаются[1]. Отходы разделяют на два класса - производства и потребления [2, 42 с.], которые могут быть опасными и неопасными[3].

Отходы производства, как это показано на рисунке 1, подразделяются по степени опасности на четыре класса.

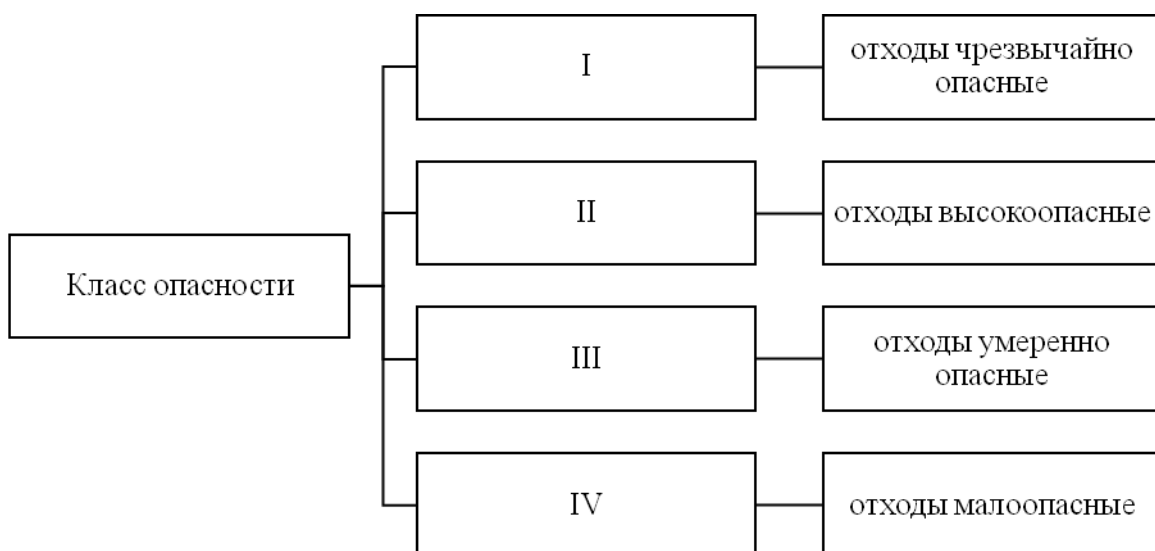


Рисунок 1 – Классификация отходов производства по степени опасности[4].

Отходы производства, в свою очередь, в зависимости от локальных производственных условий формирования, классифицируют:

1) по отраслям промышленности:

- отходы горнодобывающей промышленности,
- отходы нефтяной промышленности,
- отходы энергетической промышленности,
- отходы химической и фармацевтической промышленности,
- отходы нефтяной промышленности,
- отходы металлургической промышленности,
- отходы электротехнической промышленности,
- отходы машиностроения,
- отходы строительной индустрии,
- отходы пищевой промышленности,
- отходы сельскохозяйственной промышленности и других отраслей;

2) по видам производств:

- отходы сернокислотного производства,
- отходы автосборочного производства,
- отходы подшипникового производства,
- отходы сельскохозяйственного производства,
- отходы пищевого производства и др.[5, 42 с.].

По фазовому составу отходы разделяют на твердые, жидкие и газообразные[7, 19 с.].

Таким образом, к органическим отходам можно отнести:

- навоз сельскохозяйственных животных,
- помет сельскохозяйственных птиц,
- отходы растениеводческой продукции,
- осадки сточных вод и др.

В составе твердых отходов, образующихся на сельскохозяйственном предприятии, содержание органических отходов может достигать до 80 %, из которых производство навоза от 1000 кг живой массы может составить до 5,27 кг в день в расчете на влажную массу[8].

#### 1.1.2 Методы переработки органических отходов

В промышленных условиях органические отходы перерабатывают на основе микробиологических процессов при:

1) получении кормовых продуктов, обогащенных:

- белком,
- белком одноклеточных организмов;

2) силосовании;

3) компостировании;

4) анаэробной ферментации;

5) биоконверсии в топливо:

- в этанол,
- в биогаз (метаногенез в анаэробных реакторах, прямая конверсия в тепло) [9].

#### 1.2 Экологические требования по обращению с отходами

В Казахстане в соответствии с Базельской конвенцией, как показано на рисунке 2, установлены 3 уровня опасности отходов [10].

При проектировании жилых и хозяйственных объектов, согласно Экологическому кодексу РК [3], хозяйственный субъект в целях обращения с отходами обязан:

1) разрабатывать программу управления отходами;

2) учитывать требования законодательной системы Республики Казахстан в области благополучия населения:

- экологического,

- санитарно-эпидемиологического;
- 3) разрабатывать документацию по обращению с отходами:
  - техническую,
  - технологическую;
- 4) предусматривать локализацию сбора отходов на соответствующих площадках в соответствии со всеми требованиями, правилами и нормативами в области обращения с отходами.

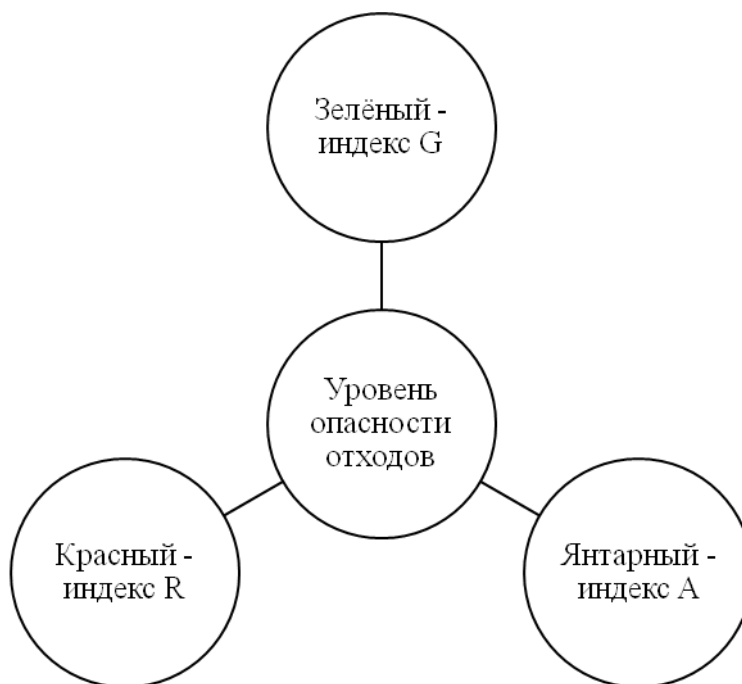


Рисунок 2 – Уровни опасности отходов[10].

### **1.3Метантенк, как аппарат для анаэробного биоразложения отходов**

#### **1.3.1 Метантенк-резервуар для биологической переработки отходов**

Интерес к промышленному применению возобновляемых источников энергии, которые можно производить на макроуровне из органических отходов, что образуется в сельскохозяйственном производстве, в промышленности в виде вспомогательных отходов, а также в городском коммунальном хозяйстве, обоснован из-за быстрого расходования запасов природного топлива, ограничений строительства электростанций (гидро- и атомных)[11].

Поэтому перспективность использования подходов биологической конверсии органических отходов с производством метана в составе биогаза не оставляет сомнений при решении вопросов охраны и защиты природной среды от различных антропогенных загрязнителей [12].

Метантенк – это железобетонный резервуар заданной ёмкости, который предназначен для биологической анаэробной переработки органических отходов [13].

Эффективность функционирования метантенков:

1) зависит от [14]:

- конструктивных особенностей аппарата,
- принятой технологии переработки,
- используемых микроорганизмов,
- поддержанием оптимальных параметров анаэробного биоразложения;

2) определяется выходом продукта[15]:

- из 1 кг сухого вещества перерабатываемого органического сырья производят примерно 0,23 м<sup>3</sup> метана или 0,45 м<sup>3</sup> биогаза,
- состав биогаза в метантенках: CH<sub>4</sub> – 60-67%, CO<sub>2</sub> – 30-33%, H<sub>2</sub> – не превышает 1-2%, N – около 0,5%.
- содержание метана в составе биогаза определяется распадом жиров и белков.

В дополнение к вышеизложенному следует отметить, что получаемый при анаэробном биоразложении биогаз[14]:

- имеет, в среднем, теплоту сгорания 5340-6230 ккал/м<sup>3</sup> (или 1 м<sup>3</sup> биогаза равен 0,7 л мазута),
- из 1 м<sup>3</sup> вырабатывает около 2 кВт\*ч электроэнергии.

### 1.3.2 Конструктивные особенности метантенка

Метантенки конструктивно могут работать в режиме [11]:

- периодическом (загружают 1 раз в сутки и поэтому скорость разложения высоко вариабельна, т.к. изменяется в период между загрузками),
- непрерывном (скорость биоразложения органических отходов и выход биогаза постоянны),
- полунепрерывном.

В метантенках поддерживается один из двух режимов биоразложения[16, 37 с.]:

- мезофильный – осуществляется при температуре 32–35°С;
- термофильный – осуществляется при температуре 50–60°С.

Метантенк конструктивно изготавливается в форме цилиндра, которая перегороджена на трисегмента:

- загрузочную,
- рабочую,
- разгрузочную.

В центре рабочей емкости располагается мешалка для передвижения и перемешивания перерабатываемых отходов[17, 65 с.].

Перемешивание обеспечивает[16, 38 с.]:

- 1) эффективное применение всего объема метантенка;
- 2) исключение образования мертвых зон;
- 3) предотвращение:
  - расслоения отходов,
  - отложения песка,

- образования корки;

4) выравнивание температурного поля.

Для обеспечения технологической программы анаэробного разложения в требуемом интервале температур и для обеспечения сбора биогаза в газгольдер, метантенк имеет крышку, которая может быть фиксированной или плавающей [12, 253 с.]. Следовательно, производимый в процессе ферментации биогаз от метантенка поступает в газгольдер [12, 279 с.]. Тепловой режим в метантенке поддерживается обогревом на основе работы бойлера, который, в свою очередь, работает на биогазе [12, 176 с.]

Метантенк располагается вертикально или горизонтально. Вертикальные метантенки более компактны, имеют выгодное соотношение площади поверхности к объему, уменьшают затраты материалов и теплотери. Горизонтальные метантенки имеют хороший эффект перемешивания, с одной стороны, за счет вертикально направленным лопастям мешалки, с другой стороны, при вращении лопастей формируется тангенциальное течение, который поднимает осевший слой субстрата и разрушает образовавшиеся корки [18, 7 с.].

Простота эксплуатации анаэробного реактора является важным фактором в выборе конкретной конструкции метантенка [19, 17 с.].

### 1.3.3 Классификация метантенков

Конструктивные подходы в организации метантенка позволяют классифицировать технологии анаэробного биоразложения органических отходов, как это показано на рисунке 3, по ряду признаков.

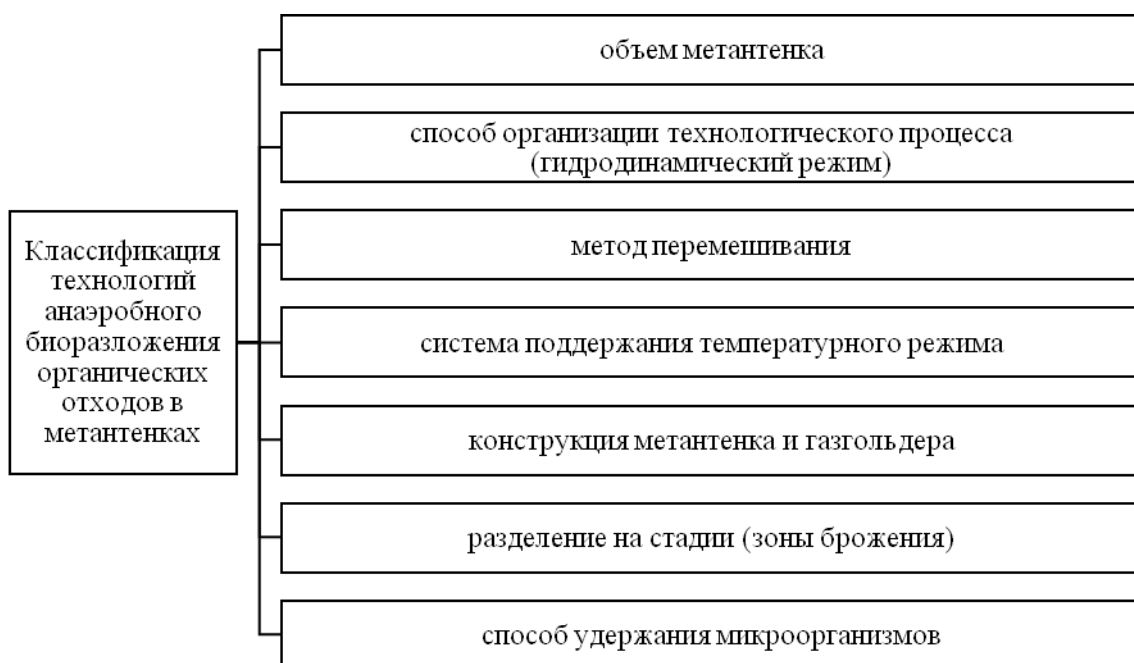


Рисунок 3 – Классификация технологий анаэробного биоразложения органических отходов в метантенках [20].

По объему метантенка технологии анаэробного биоразложения органических отходов можно разделить на следующие типы мощностей[21, 11 с.]:

а) малой ( $5 - 20 \text{ м}^3$ ), используются в фермерских хозяйствах;  
б) средней ( $20 - 1000 \text{ м}^3$ ), используются в крупных животноводческих комплексах;

в) большой ( $1000 - 10000 \text{ м}^3$ ), используются на крупных промышленных объектах, например, на заводе по переработке твердых бытовых отходов.

В метантенках способ перемешивания может осуществляться[20]:

- с помощью механических приспособлений,
- гидравлическими средствами (рециркуляция под действием насоса),
- под напором пневматической системы (частичная рециркуляция биогаза).

По конструктивному разделению на стадии (зоны анаэробного биоразложения органических отходов) различают следующие метаногенные технологии[21, 13 с.; 22]:

- без разделения на стадии, когда все реакции протекают одновременно в одной емкости реактора,
- двух-стадийные, когда реакции протекают последовательно в двух реакторах,
- трех-стадийные, когда реакции протекают последовательно в трех реакторах.

## **1.4 Характеристика анаэробного разложения отходов**

### **1.4.1 Фазы анаэробного биоразложения органических отходов**

Анаэробное биоразложение характеризуется серией биохимических превращений, вызванных деградацией органической материи.

Весь процесс биоразложения включает в себя несколько различных этапов:

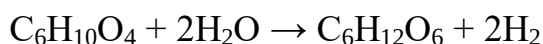
- гидролиз,
- ацидогенез,
- ацетогенез,
- метаногенез[22].

#### **1.4.1.1 Гидролиз**

Продолжительность варьирует в пределах 1-6 месяцев [23, 41 с.]. При гидролизе сложные органические молекулы разлагаются на растворимые мономеры образуя:

- растворимые сахара,
- аминокислоты,
- глицерин,
- длинноцепочечные карбоновые кислоты.

Реакция такого гидролиза представлена следующим уравнением[24, 10 р.]:

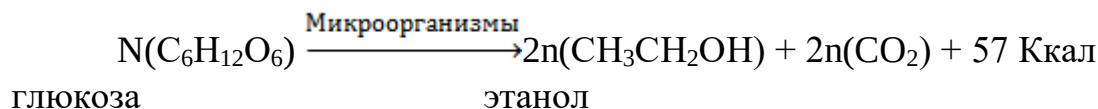


#### 1.4.1.2 Ацидогенез

Ацидогенез – это кислотообразующая фаза. Продукты разложения первой фазы при ацидогенезе разлагаются последовательно кислотообразующими ацидогенными бактериями на другие органические вещества:

- 1) кислоты:
  - уксусную,
  - масляную,
  - пропионовую и др.;
- 2) спирты;
- 3) альдегиды;
- 4) неорганические вещества:
  - $\text{H}_2$ ,
  - $\text{CO}_2$ ,
  - $\text{N}_2$ ,
  - $\text{H}_2\text{S}$ .

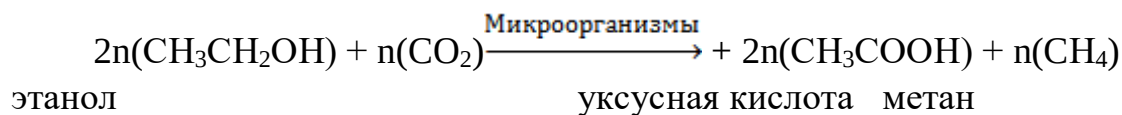
Данный процесс протекает до тех пор, пока кислотная среды не замедлит развитие бактерий под действием собственно образованных кислот[25]. Данную реакцию можно описать следующим уравнением[26]:



#### 1.4.1.3 Ацетогенез

При ацетогенезе летучие и длинноцепочечные жирные кислоты, спирты трансформируются ацетогенными бактериями в водород, углекислый газ и уксусную кислоту.

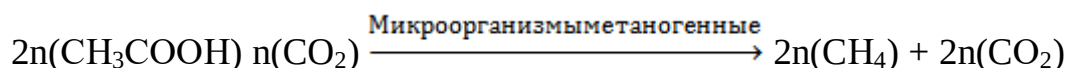
Процесс ацетогенеза описывается уравнением [26]:



#### 1.4.1.4 Метаногенез

Ключевым этапом в оснащении биогаза метаном служит метаногенез. На этом этапе метаногенные бактерии трансформируют водород и уксусную кислоту в два основных газа - метан и углекислый газ[27, 24 р.].

Фазу метаногенеза описывает общее уравнение [26]:





уксусная кислота                      метан

#### 1.4.2 Микроорганизмы анаэробного разложения

Анаэробное разложение природных и антропогенных веществ органической природы обеспечивают четыре трофические группы бактерий:

- гидролитические,
- ацидогенные,
- ацетогенные
- метаногенные[28].

В анаэробных условиях виды *Clostridium* являются общими деградерами. Гидролиз проводится бактериями из группы факультативных (относительных) анаэробов родов, подобных *Streptococcus* и *Enterobacterium*[29].

Вариации организмов такие как *Actinomyces*, *Thermomonospora*, *Ralstonia* и *Shewanella* отвечают за превращение органических отходов в летучие жирные кислоты, в то время как *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter* и *Methanosarcina* участвуют в производстве метана[30].

Бактерии, такие как *Methanobacteriumsuboxydans*, составляют разложение пентановой кислоты до пропионовой кислоты, тогда как *Methanobacteriumpropionicum* объясняет разложение пропионовой кислоты в уксусную кислоту[31].

Метаногены подразделяются на шесть категорий:

- *Methanobacteriales*,
- *Methanococcales*,
- *Methanomicrobiales*,
- *Methanosarcinales*,
- *Methanocellales*,
- *Methanopyrales* [32].

#### 1.4.3 Условия протекания процессов анаэробного разложения

Успех метанового анаэробного разложения определяется факторами, перечисленными на рисунке 4.

В дополнение к рисунку 4 остановимся более подробно на следующих ключевых факторах, которые в условиях производства учитываются в обязательном порядке – это температура, pH, скорость загрузки, давление и оптимальное соотношение C / N.

##### 1.4.3.1 Температура

Оптимальной температурой для метаногенеза является температура от 35°C (мезофильный режим, который влияет на процесс обогащения биогаза метаном) до 55°C (термофильный режим, который влияет на ускорение процесса разложения). По содержанию сухого вещества различают ферментацию: 1) жидкофазную, когда содержание сухого вещества в органических отходах находится в пределах 10- 15%; 2) твердофазную, когда содержание сухого вещества достигает 25 – 30%[23, 307 с.]

#### 1.4.3.2 pH

Метаногенные микроорганизмы имеют высокую чувствительность к уровню pH: он должен быть для них в диапазоне от 7,2 до 8,8 с оптимумом от 7,5 до 8,3.

Гидролитические бактерии проявляют активность в более широком диапазоне pH: от 4,5 до 8,5. Уровень pH, близкий к 6,0, для них считается наиболее благоприятным при гидролизе и кислотогенезе [34, 27 с.].

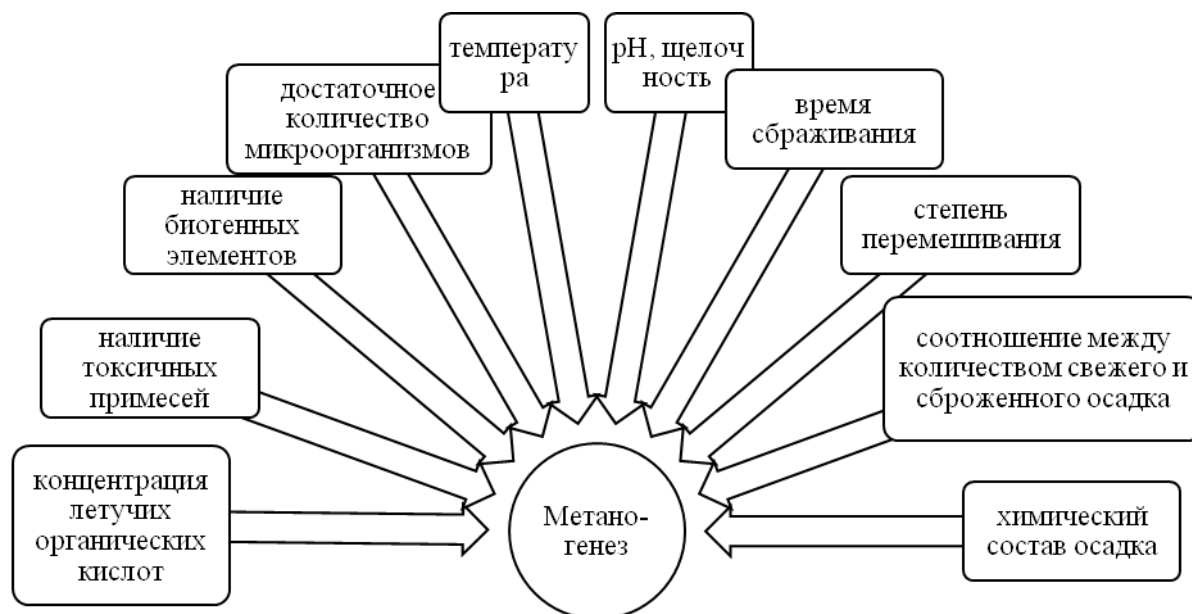


Рисунок 4 – Факторы, влияющие на успех метаногенеза [33,36 с.]

#### 1.4.3.3 Скорость загрузки метантенка

Скорость загрузки метантенка является одним из важных параметров в анаэробном процессе биоразложения, т.к. определяется, например в пищеварении, мерой количества летучих твердых веществ в биосистеме, т.к. может быть осуществима для входа в систему. Высокая загрузка увеличивает сумму ацидогенных бактерий, они, в свою очередь, стимулируют падение pH и, в итоге, происходит ликвидация метаногенных бактерий и, следовательно, снижается производство метана [35].

#### 1.4.3.4 Давление

В процессе производства биогаза давление имеет большое значение. Эксперименты показали, что при гидростатическом давлении, при котором действуют метаногенные бактерии, увеличивается содержания воды до более 400 - 500 мм, в итоге, производство биогаза прекращается. Процесс метаногенеза возобновляется лишь тогда, когда гидростатическое давление падает ниже упомянутого значения [36].

#### 1.4.3.5 Оптимальное соотношение C / N

Оптимальное соотношение C / N будет в диапазоне 15-25, когда анаэробный процесс проводится в одну стадию, и для ситуации, когда процесс развивается в два этапа, оптимальное соотношение C / N будет варьироваться: для этапа I: 10 - 45; для этапа II: 20-30 [36].

## 2 Объект, предмет и методы исследования

Объект исследования: Органические отходы.

Предмет исследования: Процесс анаэробного разложения органических отходов в условиях метантенка.

Методы исследования. Исследования по планированию и оптимизации биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках проводили на основе методики, подробно изложенные в работах [37-42].

Основные формулы и уравнения, использованные в решении поставленных задач, приведены ниже:

Уравнение нелинейной множественной корреляции [37-42]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1) \times \sum (Y_{\text{э}} - Y_m)^2}{(N-K-1) \times \sum (Y_{\text{э}} - Y_{\text{ср}})^2}} \quad (1)$$

где:

| N                       | K                          | $Y_{\text{э}}$              | $Y_m$                               | $Y_{\text{ср}}$                    |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| число описываемых точек | число действующих факторов | Экспериментальный результат | Теоретический (расчетный) результат | среднее экспериментальное значение |

Достоверность определяется по формуле:

$$t_R = \frac{R \times \sqrt{N-K-1}}{1-R^2} > 2 \quad (2)$$

Анализ значимости частной функции  $N = 5$ ,  $K = 1$ .

Метод наименьших квадратов:

$$Y = a + b \times X. \quad (3)$$

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (4)$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} \quad (5)$$

Формула для обобщенного уравнения  $Y_{\text{об}}$ :

$$Y_{\text{об}} = \frac{Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_n}{Y_{\text{ср}}^{n-1}} \quad (6)$$

где:

$Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$  – частные функции,

$Y_{\text{ср}}$  – общее среднее всех учитываемых значений обобщенной функции.

### 3 Результаты исследования

#### 3.1 Планирование биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках

В целях планирования биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках были приняты для изучения пять факторов, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы, оказывающие влияние на активность метаногенных микроорганизмов

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| X <sub>1</sub> – температура, °С                   | 35-55     |
| X <sub>2</sub> – летучие жирные кислоты, мг/л      | 6000-8000 |
| X <sub>3</sub> – аммиак, мг/л                      | 200-500   |
| X <sub>4</sub> – pH                                | 6,6-7,8   |
| X <sub>5</sub> – щелочные металлы, мг/л            | 200-400   |
| Выход метана в метантенке примем в пределах 70-90% |           |

Как видно из таблицы 1, для экспериментальной работы были использованы пять факторов:

##### 1 Температура (X<sub>1</sub>, °С)

Оптимальной температурой для метаногенеза является температура от 35°С (мезофильный режим, который влияет на процесс обогащения биогаза метаном) до 55°С (термофильный режим, который влияет на ускорение процесса разложения)[23].

##### 2 Летучие жирные кислоты (X<sub>2</sub>, мг/л)

Как известно [43], если содержание летучих жирных кислот в перерабатываемом субстрате превышает 8000 мг/л, то их присутствие является губительным для метаногенных микроорганизмов. В этой связи исследуемая область интервала находилось в пределах от 6000-8000 мг/л.

##### 3 Аммиак (X<sub>3</sub>, мг/л)

Данное вещество стимулирует метаногенез при концентрации 200 мг/л, затормаживает процесс метаногенеза при концентрации выше 500 мг/л. Если же концентрация аммиака в субстрате достигает 3000 мг/л, то аммиак для метаногенных микроорганизмов становится токсичным[43].

##### 4 pH (X<sub>4</sub>)

Для экспериментального исследования, согласно [43], pH был принят в интервале 7,4-7,6.

##### 5 Щелочные металлы (X<sub>5</sub>, мг/л)

Щелочные металлы, согласно [43], стимулируют метаногенез при концентрации 200-400 мг/л, тогда как при 8000 – 12000 мг/л они для метаногенных бактерий становятся токсичными.

Таким образом, область факторного пространства для эксперимента был принят в интервале, указанных для исследуемых факторов в таблице 2.

Таблица 2 - Область факторного пространства

| Факторы                                       | Уровни факторов |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|
|                                               | 1               | 2    | 3    | 4    | 5    |
| X <sub>1</sub> – температура °С               | 35              | 40   | 45   | 50   | 55   |
| X <sub>2</sub> – летучие жирные кислоты, мг/л | 6000            | 6500 | 7000 | 7500 | 8000 |
| X <sub>3</sub> – аммиак, мг/л                 | 200             | 275  | 350  | 425  | 500  |
| X <sub>4</sub> – pH                           | 6,6             | 6,9  | 7,2  | 7,5  | 7,8  |
| X <sub>5</sub> – щелочные металлы, мг/л       | 200             | 250  | 300  | 350  | 400  |

На следующем этапе, как это показано в таблице 3, разрабатывается на основе латинского квадрата матрица планирования.

Таблица 3 - Фактор матрица планирования эксперимента

| № опыта | X <sub>1</sub> |    | X <sub>2</sub> |      | X <sub>3</sub> |     | X <sub>4</sub> |     | X <sub>5</sub> |     | CH <sub>4</sub> , % |
|---------|----------------|----|----------------|------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|---------------------|
|         | Ур             | Зн | Ур             | Зн   | Ур             | Зн  | Ур             | Зн  | Ур             | Зн  |                     |
| 1       | 1              | 35 | 1              | 6000 | 5              | 500 | 4              | 7,5 | 3              | 300 | 73                  |
| 2       | 1              | 35 | 2              | 6500 | 4              | 425 | 3              | 7,2 | 2              | 250 | 82                  |
| 3       | 1              | 35 | 3              | 7000 | 3              | 350 | 5              | 7,8 | 1              | 200 | 90                  |
| 4       | 1              | 35 | 4              | 7500 | 2              | 275 | 1              | 6,6 | 5              | 400 | 80                  |
| 5       | 1              | 35 | 5              | 8000 | 1              | 200 | 2              | 6,9 | 4              | 350 | 71                  |
| 6       | 2              | 40 | 1              | 6000 | 5              | 500 | 4              | 7,5 | 3              | 300 | 70                  |
| 7       | 2              | 40 | 2              | 6500 | 4              | 425 | 3              | 7,2 | 2              | 250 | 81                  |
| 8       | 2              | 40 | 3              | 7000 | 3              | 350 | 5              | 7,8 | 1              | 200 | 72                  |
| 9       | 2              | 40 | 4              | 7500 | 2              | 275 | 1              | 6,6 | 5              | 400 | 76                  |
| 10      | 2              | 40 | 5              | 8000 | 1              | 200 | 2              | 6,9 | 4              | 350 | 73                  |
| 11      | 3              | 45 | 1              | 6000 | 5              | 500 | 4              | 7,5 | 3              | 300 | 85                  |
| 12      | 3              | 45 | 2              | 6500 | 4              | 425 | 3              | 7,2 | 2              | 250 | 75                  |
| 13      | 3              | 45 | 3              | 7000 | 3              | 350 | 5              | 7,8 | 1              | 200 | 84                  |
| 14      | 3              | 45 | 4              | 7500 | 2              | 275 | 1              | 6,6 | 5              | 400 | 74                  |
| 15      | 3              | 45 | 5              | 8000 | 1              | 200 | 2              | 6,9 | 4              | 350 | 76                  |
| 16      | 4              | 50 | 1              | 6000 | 5              | 500 | 4              | 7,5 | 3              | 300 | 88                  |
| 17      | 4              | 50 | 2              | 6500 | 4              | 425 | 3              | 7,2 | 2              | 250 | 73                  |
| 18      | 4              | 50 | 3              | 7000 | 3              | 350 | 5              | 7,8 | 1              | 200 | 77                  |
| 19      | 4              | 50 | 4              | 7500 | 2              | 275 | 1              | 6,6 | 5              | 400 | 82                  |
| 20      | 4              | 50 | 5              | 8000 | 1              | 200 | 2              | 6,9 | 4              | 350 | 80                  |
| 21      | 5              | 55 | 1              | 6000 | 5              | 500 | 4              | 7,5 | 3              | 300 | 79                  |
| 22      | 5              | 55 | 2              | 6500 | 4              | 425 | 3              | 7,2 | 2              | 250 | 84                  |
| 23      | 5              | 55 | 3              | 7000 | 3              | 350 | 5              | 7,8 | 1              | 200 | 75                  |
| 24      | 5              | 55 | 4              | 7500 | 2              | 275 | 1              | 6,6 | 5              | 400 | 78                  |
| 25      | 5              | 55 | 5              | 8000 | 1              | 200 | 2              | 6,9 | 4              | 350 | 90                  |

Матрица планирования в основе которого находится латинский квадрат, включает, как это видно из таблицы 3, 25 экспериментов ( $n = p^2$ ,  $p = 5$ ), в которой рассредоточены исследуемые в нашем случае независимые факторы ( $X_1 - X_5$  по уровням 1–5).

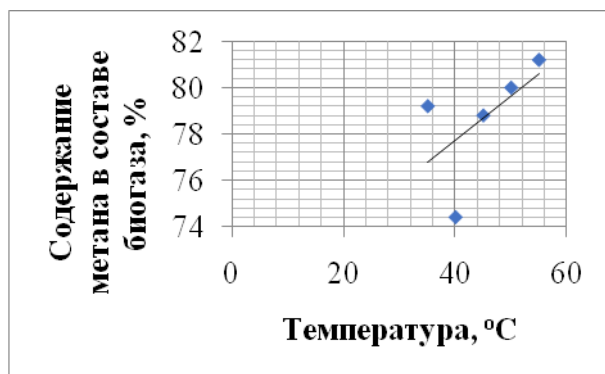
Далее, согласно методике, осуществляем расчет значений частных функций (таблица 4).

Таблица 4 - Расчет значений частных функций

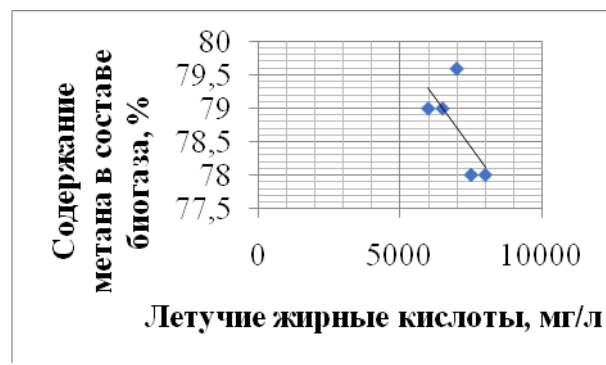
| № фактора | 1    | 2    | 3    | 4  | 5    | $Y_{cp}$ |
|-----------|------|------|------|----|------|----------|
| $X_1$     | 73   | 70   | 85   | 88 | 79   |          |
|           | 82   | 81   | 75   | 73 | 84   |          |
|           | 90   | 72   | 84   | 77 | 75   |          |
|           | 80   | 76   | 74   | 82 | 78   |          |
|           | 71   | 73   | 76   | 80 | 90   |          |
| $\Sigma$  | 79,2 | 74,4 | 78,8 | 80 | 81,2 | 78,72    |
| $X_2$     | 73   | 82   | 90   | 80 | 71   |          |
|           | 70   | 81   | 72   | 76 | 73   |          |
|           | 85   | 75   | 84   | 74 | 76   |          |
|           | 88   | 73   | 77   | 82 | 80   |          |
|           | 79   | 84   | 75   | 78 | 90   |          |
| $\Sigma$  | 79   | 79   | 79,6 | 78 | 78   | 78,72    |
| $X_3$     | 71   | 80   | 90   | 82 | 73   |          |
|           | 73   | 76   | 72   | 81 | 70   |          |
|           | 76   | 74   | 84   | 75 | 85   |          |
|           | 80   | 82   | 77   | 73 | 88   |          |
|           | 90   | 78   | 75   | 84 | 79   |          |
| $\Sigma$  | 78   | 78   | 79,6 | 79 | 79   | 78,72    |
| $X_4$     | 80   | 71   | 82   | 73 | 90   |          |
|           | 76   | 73   | 81   | 70 | 72   |          |
|           | 74   | 76   | 75   | 85 | 84   |          |
|           | 82   | 80   | 73   | 88 | 77   |          |
|           | 78   | 90   | 84   | 79 | 75   |          |
| $\Sigma$  | 78   | 78   | 79   | 79 | 79,6 | 78,72    |
| $X_5$     | 90   | 82   | 73   | 71 | 80   |          |
|           | 72   | 81   | 70   | 73 | 76   |          |
|           | 84   | 75   | 85   | 76 | 74   |          |
|           | 77   | 73   | 88   | 80 | 82   |          |
|           | 75   | 84   | 79   | 90 | 78   |          |
| $\Sigma$  | 79,6 | 79   | 79   | 78 | 78   | 78,72    |

Как видно из таблицы 4, полученные частные функции ( $Y_1, Y_2, \dots Y_5$ ) описывают влияние рассматриваемых факторов на производство метана в составе биогазов %.

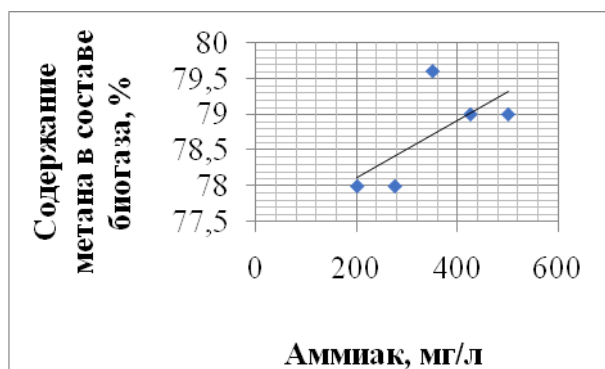
После определяем выборку на точечные графики. В этом случае изучаем влияние всех пяти рассматриваемых факторов на производство метана в составе биогаза (рисунок 5):



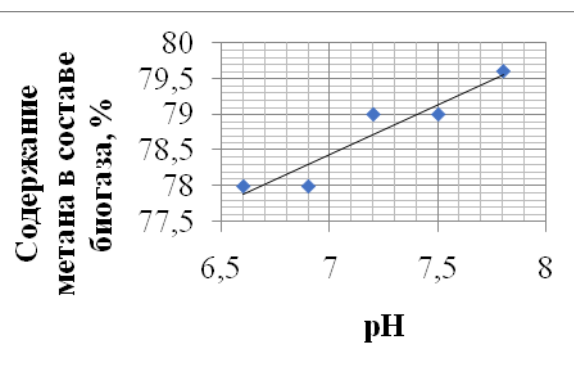
а) влияние температуры ( $X_1$ ) на содержание метана в составе биогаза



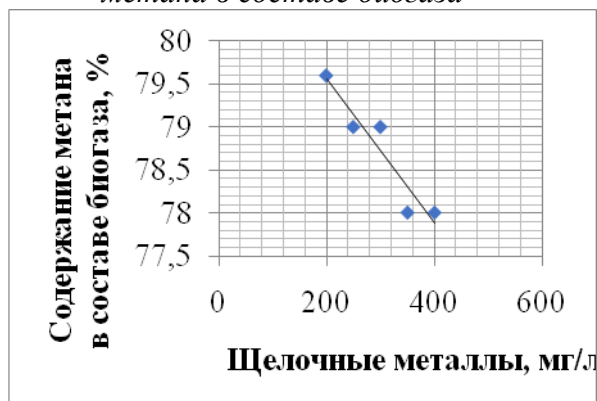
б) влияние содержания в субстрате летучих жирных кислот ( $X_2$ , мг/л) на содержание метана в составе биогаза



в) влияние содержания в субстрате аммиака ( $X_3$ , мг/л) на содержание метана в составе биогаза



г) влияние pH ( $X_4$ ) на содержание метана в составе биогаза



д) влияние содержания щелочных металлов ( $X_5$ , мг/л) в субстрате на содержание метана в составе биогаза

Рисунок 5 - Выборка на точечные графики: влияние независимых факторов на содержание (%) основного энергетического компонента биогаза – метана

Методом наименьших квадратов, как видно из рисунка 5, проведен анализ моделей.

### 3.2 Оптимизация биотехнологических процессов при анаэробном разложении органических отходов в метантенках

На следующем этапе рассчитываем теоретические алгебраические значения частных функций. Расчёты приводятся в таблице 5.

Таблица 5 - Расчетные значения и аппроксимация исследуемой функции

Таблица 5.1 - Фактор  $X_1$ : температура °C

| №        | $X_1$ |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|
|          | X     | Y     | $X^2$ | XY    |
| 1        | 35    | 79,2  | 1225  | 2772  |
| 2        | 40    | 74,4  | 1600  | 2976  |
| 3        | 45    | 78,8  | 2025  | 3546  |
| 4        | 50    | 80    | 2500  | 4000  |
| 5        | 55    | 81,2  | 3025  | 4466  |
| $\Sigma$ | 225   | 393,6 | 10375 | 17760 |

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{5 \times 17760 - 225 \times 393,6}{5 \times 10375 - 225^2} = \frac{88800 - 88560}{51875 - 50625} = 0,192$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} = \frac{393,6 - 0,192 \times 225}{5} = 70,08$$

Таблица 5.2 - Фактор  $X_2$ : летучие жирные кислоты, мг/л

| №        | $X_2$ |       |           |         |
|----------|-------|-------|-----------|---------|
|          | X     | Y     | $X^2$     | XY      |
| 1        | 6000  | 79    | 36000000  | 474000  |
| 2        | 6500  | 79    | 42250000  | 513500  |
| 3        | 7000  | 79,6  | 49000000  | 557200  |
| 4        | 7500  | 78    | 56250000  | 585000  |
| 5        | 8000  | 78    | 64000000  | 624000  |
| $\Sigma$ | 35000 | 393,6 | 247500000 | 2753700 |

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{5 \times 2753700 - 35000 \times 393,6}{5 \times 247500000 - 35000^2}$$

$$= \frac{13768500 - 13776000}{1237500000 - 1225000000} = -0,0006$$



$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} = \frac{393,6 - (-0,0006) \times 35000}{5} = 82,92$$

Таблица 5.3 - Фактор X<sub>3</sub>: аммиак, мг/л

| № | X <sub>3</sub> |       |                |        |
|---|----------------|-------|----------------|--------|
|   | X              | Y     | X <sup>2</sup> | XY     |
| 1 | 200            | 78    | 40000          | 15600  |
| 2 | 275            | 78    | 75625          | 21450  |
| 3 | 350            | 79,6  | 122500         | 27860  |
| 4 | 425            | 79    | 180625         | 33575  |
| 5 | 500            | 79    | 250000         | 39500  |
| Σ | 1750           | 393,6 | 668750         | 137985 |

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{5 \times 137985 - 1750 \times 393,6}{5 * 668750 - 1750^2} = \frac{689925 - 688800}{3343750 - 3062500} = 0,004$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} = \frac{393,6 - 0,004 \times 1750}{5} = 77,32$$

Таблица 5.4 - Фактор X<sub>4</sub>: pH

| № | X <sub>4</sub> |       |                |         |
|---|----------------|-------|----------------|---------|
|   | X              | Y     | X <sup>2</sup> | XY      |
| 1 | 6,6            | 78    | 43,56          | 514,8   |
| 2 | 6,9            | 78    | 47,61          | 538,2   |
| 3 | 7,2            | 79    | 51,84          | 568,8   |
| 4 | 7,5            | 79    | 56,25          | 592,5   |
| 5 | 7,8            | 79,6  | 60,84          | 620,88  |
| Σ | 36             | 393,6 | 260,1          | 2835,18 |

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{5 \times 2835,18 - 36 \times 393,6}{5 * 260,1 - 36^2} = \frac{14175,9 - 14169,6}{1300,5 - 1296} = 1,4$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} = \frac{393,6 - 1,4 \times 36}{5} = 68,64$$

Таблица 5.5 - Фактор X<sub>5</sub>: щелочные металлы, мг/л

| № | X <sub>4</sub> |      |                |       |
|---|----------------|------|----------------|-------|
|   | X              | Y    | X <sup>2</sup> | XY    |
| 1 | 200            | 79,6 | 40000          | 15920 |

|          |      |       |        |        |
|----------|------|-------|--------|--------|
| 2        | 250  | 79    | 62500  | 19750  |
| 3        | 300  | 79    | 90000  | 23700  |
| 4        | 350  | 78    | 122500 | 27300  |
| 5        | 400  | 78    | 160000 | 31200  |
| $\Sigma$ | 1500 | 393,6 | 475000 | 117870 |

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{5 \times 117870 - 1500 \times 393,6}{5 \times 475000 - 1500^2} = \frac{589350 - 590400}{2375000 - 2250000} = -0,0084$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} = \frac{393,6 - (-0,0084) \times 1500}{5} = 81,24$$

Теоретические значения частных функций приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Теоретические значения частных функций

| Формула                 | Расчетное содержание метана в биогазе |
|-------------------------|---------------------------------------|
| $Y_{n1} = a + bxX_{n1}$ | 80,64                                 |
| $Y_{n2} = a + bxX_{n2}$ | 79,32                                 |
| $Y_{n3} = a + bxX_{n3}$ | 76,52                                 |
| $Y_{n4} = a + bxX_{n4}$ | 79,56                                 |
| $Y_{n5} = a + bxX_{n5}$ | 79,56                                 |

$$Y_{n1} = a + bxX_{n1} = 70,08 + 0,192 \times 35 = 76,8$$

$$Y_{n1} = a + bxX_{n1} = 70,08 + 0,192 \times 40 = 77,76$$

$$Y_{n1} = a + bxX_{n1} = 70,08 + 0,192 \times 45 = 78,72$$

$$Y_{n1} = a + bxX_{n1} = 70,08 + 0,192 \times 50 = 79,68$$

$$Y_{n1} = a + bxX_{n1} = 70,08 + 0,192 \times 55 = 80,64$$

$$Y_{n2} = a + bxX_{n2} = 82,92 - 0,0006 \times 6000 = 79,32$$

$$Y_{n2} = a + bxX_{n2} = 82,92 - 0,0006 \times 6500 = 79,02$$

$$Y_{n2} = a + bxX_{n2} = 82,92 - 0,0006 \times 7000 = 78,72$$

$$Y_{n2} = a + bxX_{n2} = 82,92 - 0,0006 \times 7500 = 78,42$$

$$Y_{n2} = a + bxX_{n2} = 82,92 - 0,0006 \times 8000 = 78,12$$

$$Y_{n3} = a + bxX_{n3} = 77,32 + 0,004 \times 200 = 76,52$$

$$Y_{n3} = a + bxX_{n3} = 77,32 + 0,004 \times 275 = 76,22$$

$$Y_{n3} = a + bxX_{n3} = 77,32 + 0,004 \times 350 = 75,92$$

$$Y_{n3} = a + bxX_{n3} = 77,32 + 0,004 \times 425 = 75,62$$

$$Y_{n3} = a + bxX_{n3} = 77,32 + 0,004 \times 500 = 75,32$$

$$Y_{n4} = a + bxX_{n4} = 68,64 + 1,4 \times 6,6 = 77,88$$

$$Y_{n4} = a + bxX_{n4} = 68,64 + 1,4 \times 6,9 = 78,3$$

$$Y_{n4} = a + bxX_{n4} = 68,64 + 1,4 \times 7,2 = 78,72$$

$$Y_{n4} = a + bxX_{n4} = 68,64 + 1,4 \times 7,5 = 79,14$$

$$Y_{n4} = a + bxX_{n4} = 68,64 + 1,4 \times 7,8 = 79,56$$

$$Y_{n5} = a + bxX_{n5} = 81,24 - 0,0084 \times 200 = 79,56$$

$$Y_{n5} = a + bxX_{n5} = 81,24 - 0,0084 \times 250 = 79,14$$

$$Y_{n5} = a + bxX_{n5} = 81,24 - 0,0084 \times 300 = 78,72$$

$$Y_{n5} = a + bxX_{n5} = 81,24 - 0,0084 \times 350 = 78,3$$

$$Y_{n5} = a + bxX_{n5} = 81,24 - 0,0084 \times 400 = 77,88$$

Определяем выборку на точечные графики. Вычисляем влияние исследуемых в эксперименте факторов  $X_1 - X_5$ :

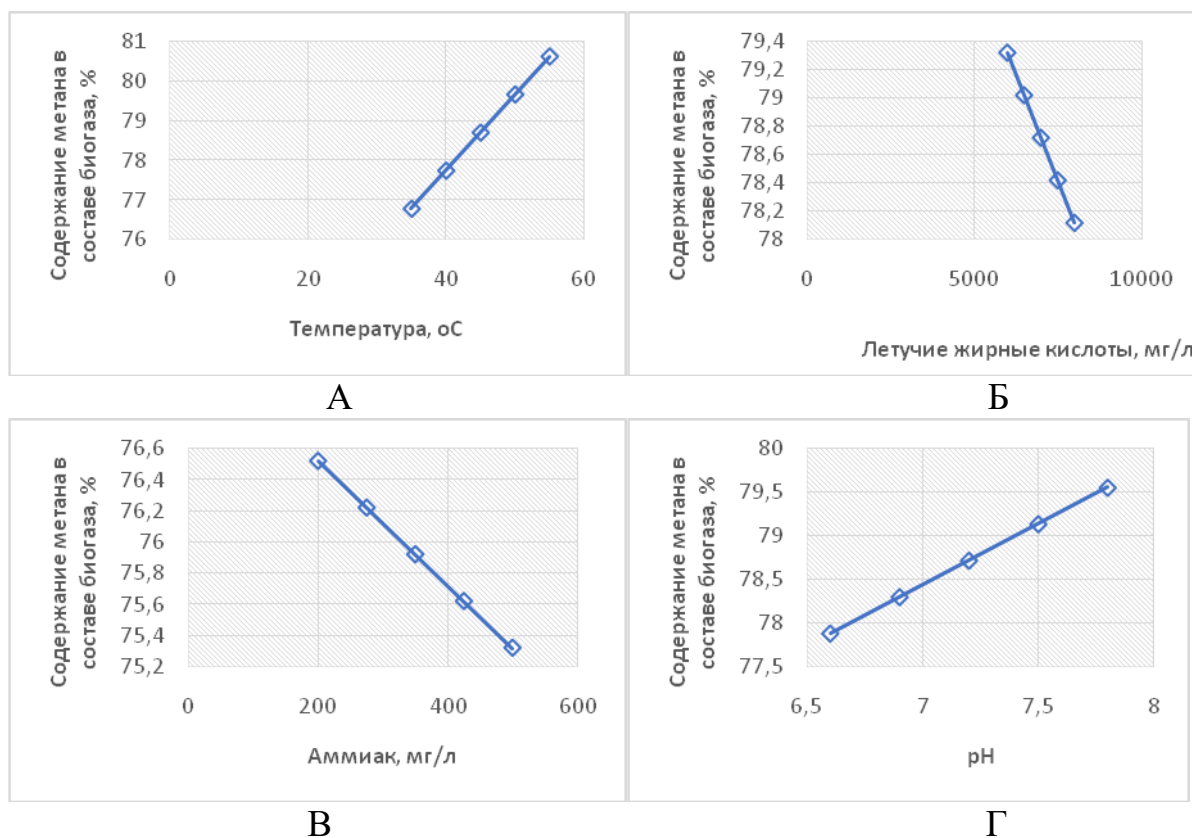
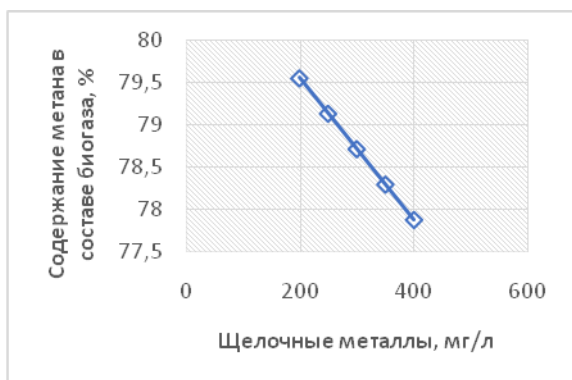


Рисунок 6 - Выборка на точечные графики: влияние (а) температуры ( $X_1$ ), (б) летучие кислоты ( $X_2$ ), (в) аммиак, (г) pH ( $X_4$ ) и (д) щелочные металлы ( $X_5$ ) на образование метана в составе биогаза.



Д

Как видим из графиков (рисунок 6), изучено влияние таких независимых факторов, как температура (фактор  $X_1, ^\circ\text{C}$ ), содержание в субстрате летучих жирных кислот, аммиака и щелочных металлов (факторы  $X_2, X_3, X_5$ ; мг/л), уровень pH (фактор  $X_4$ ) на производство метана в составе биогаза при анаэробном биоразложении органических отходов в метантенке.

В результате экспериментальных расчетов получены закономерности, которые описываются частными уравнениями.

Анализ функций показал следующее:

1) влияние содержания летучих жирных кислот ( $X_2$ , мг/л), аммиака ( $X_3$ , мг/л) и щелочных металлов ( $X_5$ , мг/л) в субстрате значительно, т.к.:

- во-первых, значения  $Y_2, Y_3$  и  $Y_5$  увеличивается в достаточно заметном интервале,

- во-вторых, значения  $Y_2, Y_3$  и  $Y_5$  имеют сотые доли, что указывает на особую чувствительность метаногенных микроорганизмов к рассматриваемым факторам;

2) функции значений  $Y_2, Y_3$  и  $Y_5$  описывающие влияние факторов  $X_2, X_3$  и  $X_5$  хорошо выраженные, т.е. активно действующие (сильнодействующие), т.к. характеризуются высокой крутизной при изменении в интервале 6000-8000 мг/л, 200-500 мг/л и 200-400 мг/л;

3) чем ниже содержание в субстрате летучих жирных кислот (6000 мг/л против 8000 мг/л), аммиака (200 мг/л против 500 мг/л) и щелочных металлов (200 мг/л против 400 мг/л) и чем выше температуры ( $55^\circ\text{C}$  против  $35^\circ\text{C}$ ) и pH (7,8 против 6,6), тем выше процент выработки метана при производстве биогаза в метантенке.

Восприимчивость изменения степени генерации  $\text{CH}_4$  находится в интервале сотых долей, что указывает о высокой восприимчивости исследований к рассматриваемым факторам при метаногенезе.

Построение точечных графиков по расчётным данным выявляет естественный разброс с учетом репрезентативной ошибки, т.е. присущую эксперименту, описывающему сложное взаимодействие в процессе разложения органических отходов в динамически изменчивых условиях. Коэффициент корреляции 0,9 ( $t_R = 2,4 > 2$ ) указывает об адекватности уравнения функциональному.

Частные функции объединяются в уравнение 6:

$$\begin{aligned} Y_{об} &= \frac{Y^1 \times Y^2 \times \dots \times Y^n}{Y_{ср}^{n-1}} = \frac{80,64 \times 79,32 \times 76,52 \times 79,56 \times 79,56}{79,12^4} \\ &= \frac{3098116429,9138}{39187279,488655} = 79,0592 \end{aligned}$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ функций показал следующее:

1) влияние содержания летучих жирных кислот ( $X_2$ , мг/л), аммиака ( $X_3$ , мг/л) и щелочных металлов ( $X_5$ , мг/л) в субстрате значительно, т.к.:

- во-первых, значения  $Y_2, Y_3$  и  $Y_5$  увеличивается в достаточно заметном интервале,

- во-вторых, значения  $Y_2, Y_3$  и  $Y_5$  имеют сотые доли, что указывает на особую чувствительность метаногенных микроорганизмов к рассматриваемым факторам;

2) функции значений  $Y_2, Y_3$  и  $Y_5$  описывающие влияние факторов  $X_2, X_3$  и  $X_5$  хорошо выраженные, т.е. активно действующие (сильнодействующие), т.к. характеризуются высокой крутизной при изменении в интервале 6000-8000 мг/л, 200-500 мг/л и 200-400 мг/л;

3) чем ниже содержание в субстрате летучих жирных кислот (6000 мг/л против 8000 мг/л), аммиака (200 мг/л против 500 мг/л) и щелочных металлов (200 мг/л против 400 мг/л) и чем выше температуры ( $55^{\circ}\text{C}$  против  $35^{\circ}\text{C}$ ) и pH (7,8 против 6,6), тем выше процент выработки метана при производстве биогаза в метантенке.

Вывод: анализ обобщенного уравнения показал, что метаногенез при анаэробном разложении органических веществ в метантенке при заданных технологических параметрах (температура, фактор  $X_1$ ;  $55^{\circ}\text{C}$ ), содержание в субстрате летучих жирных кислот ( $X_2 = 6000$  мг/л), аммиака (фактор  $X_3 = 200$  мг/л), щелочных металлов (фактор  $X_5 = 200$  мг/л), а также pH (фактор  $X_4 = 7,8$ ) способствует выделению метана в составе биогаза в максимальном интервале 79,06 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Kadir A. A. An Overview of Organic Waste in Composting/ A. A. Kadir, N. W. Azhar, S. N. Jamaludin// MATEC Web of Conferences. -2016.-p.5025-5030.
- 2 Бобович Б. Б. Переработка отходов производства и потребления: Справочное издание под ред. докт. техн. наук, проф. Б. Б. Бобовича. -Москва: «Интернет Инжиниринг», 2000. - 496с.
- 3 Кодекс Республики Казахстан от 9 января 2007 года № 212-III «Экологический кодекс Республики Казахстан» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 26.12.2019 г.).
- 4 Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан № 187 от 23 апреля 2018 года об утверждении Санитарных правил «Санитарно-эпидемиологические требования к сбору, использованию, применению, обезвреживанию, транспортировке, хранению и захоронению отходов производства и потребления.
- 5 Бобович Б. Б. Переработка отходов производства и потребления: Справочное издание под ред. докт. техн. наук, проф. Б. Б. Бобовича. -Москва: "Интернет Инжиниринг", 2000. - 496с.
- 6Хорошавин, Л. Б. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов : учеб. пособие/ Л. Б. Хорошавин, В. А. Беляков, Е. А. Свалов ; [науч. ред. А. С. Носков] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 220 с.
- 7Obi F. O.Agricultural waste concept, generation, utilization and management/F. O. Obi, B. O. Ugwuishiwu, J. N Nwakaire//Nigerian Journal of Technology. -Vol. 35, No. 4.-2016.- P. 957 – 964.
- 8Миронов В.В.Экобиотехнологии переработки органических отходов/ В.В. Миронов//Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. -2018.-№1.- С.60-65.
- 9 Закон Республики Казахстан от 10 февраля 2003 года N 389. О присоединении Республики Казахстан к Базельской конвенции о контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением.
- 10 Ковалев А.А. Оптимизация кратности загрузки субстрата в анаэробный биореактор/ А.А.Ковалев, Д.А. Ковалев// Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. -2019.- №1(33). - С.96-99.
- 11Ножевникова А.Н, Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов: учебник/ общая ред. и составл. А.Н. Кожевниковой, А.Ю. Каллистова, Ю.В. Литти, М.В. Кевбрина. - Москва: Логос, 2017. - 320 с.

12 Сорокина В.Е. Использование биогаза на канализационных очистных сооружениях в качестве альтернативного источника энергии/ В.Е. Сорокина, Ю.Н. Плахова//Науковий вісник Будівництва.-2014.- С.199-201.

13 Винаров А.Ю. Оптимизация процесса сбраживания отходов животноводства при использовании метаногенизирующей микробной ассоциации/ А.Ю. Винаров, Д.П. Соколов, В.Н. Смирнов, З.Н. Робышева//Сельскохозяйственная биология. -2013.-№6.-С. 27-37.

14 Сорокина В.Е. Использование биогаза на канализационных очистных сооружениях в качестве альтернативного источника энергии/ В.Е. Сорокина, Ю.Н. Плахова//Науковий вісник Будівництва.-2014.- С.199-201.

15Обработка осадков городских сточных вод: учебное пособие/ Л.Р. Хисамеева, А.С. Селюгин, Р.Н. Абитов [и др.]. - Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2016. – 105 с.

16Зими́на Т.В. Комбинированная переработка промышленно – бытовых стоков на примере ООО «Тольяттинский Трансформатор»:диссертация/ Т.В. Зими́на, В.С. Гончаров.- Тольятти,2017.-95 с.

17Егорова Е. Н. Обоснование параметров метантенка малого объема с перемешивающим устройством для условий Республика Саха: автореферат/ Е. Н. Егорова. – Благовещенск, 2017.- 20 с.

18Rowse L. E. Design of Small Scale Anaerobic Digesters for Application in Rural Developing Countries: Graduate Theses and Dissertations/ L. E. Rowse: South Florida, 2011.- 125 p.

19Караева Ю.В. Обзор биогазовых технологий и методов интенсификации процессов анаэробного сбраживания / Ю.В. Караева, И.А. Трахунова // Труды Академэнерго. – 2010. - №3. – С.109-127.

20Трахунова И. А. Повышение эффективности анаэробной переработки органических отходов в метантенке с гидравлическим перемешиванием на основе численного эксперимента: диссертация/ И. А. Трахунова. - Казань, 2014.- 137 с.

21Vandevivere P. Types of anaerobic digesters for solid wastes/P. Vandevivere, L. De Baere and W. Verstraete//ResearchGate.-2002/- p. 1-31.

22 Ramatsa I. M. Design of the Bio-digester for Biogas Production: A Review / I. M. Ramatsa, E. T. Akinlabi, D. M. Madyira, R. Huberts// Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science.-2014.- VolIII.- pp. 22-25.

23 Шубов Л.Я. Технологии отходов (Технологические процессы в сервисе): Учебник/ Л.Я. Шубов, М.Е. Ставра́нский, Д.В. Шехирев.-Москва: ГОУВПО «МГУС», 2006.- 412 с.

24 Arsova L. Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product:book/ L. Arsova.- Department of Earth and Environmental Engineering Fu Foundation of Engineering and Applied Science Columbia University,2010.- 77 p.

25 Добрынина О.М. Технологические аспекты получения биогаза/ О.М. Добрынина, Е.В. Калинина//Вестник Пермского Государственного



Технического Университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. -2010.-№2.- С. 33-40.

26 Бабаев В.Н. Энергетический потенциал метанообразования при мезофильном анаэробном разложении органической составляющей отходов/В.Н. Бабаев, Н.П. Горох, И.В. Коринько//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. -2011.-# 4/6 (32). - С. 59.64.

27 Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Information and Case Studies/ Y. Vögeli, C. R. Lohri, A. Gallardo [other]. - Dübendorf: Sandec: Department of Water and Sanitation in Developing Countries,2014.- 137 p.

28 Kwietniewska E. Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation/ E. Kwietniewska, J. Tys// Renew Sustain Energy Rev.-2014.- 34.-pp. 491–500.

29 Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis/ F. A. Shah, M. Qaisar, M. M. Shah// The Scientific World Journal. - 2017.- pp. 1-22.

30 Characterizing Bacterial Consortia from an Anaerobic Digester Treating Organic Waste for Biogas Production/ R. Liaquat, A. Jamal, I. Tauseef// Pol. J. Environ. Stud. - Vol. 26, No.- pp. 709-716.

31 Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis/ F. A. Shah, M. Qaisar, M. M. Shah// The Scientific World Journal.- 2017.- pp. 1-22.

32 De Macario, E.C. Taxonomy of Methanogens. In Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, 2nd ed.; Springer: New York, NY, USA, 2008. –275p.

33 Сидорова Л.П. Очистка сточных и промышленных вод:учебное пособие/ Л.П. Сидорова, А.Н. Снигирева.- Екатеринбург: Уральский Федеральный университет,2017.-127 с.

34 Никитина А. А. Биотехнологические и микробиологические аспекты термофильной анаэробной переработки коммунальных органических отходов при высокой нагрузке по субстрату: диссертация. Канд. Биол. Наук Института микробиологии им. С.Н. Виноградского.-Москва,2018.- 165 с.

35 Factors affecting anaerobic digestion of organic waste / S. Singh, K. S. Kaushik, B. Prashanth [other]// International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering. - Vol 3, Issue 2.-2018.- pp. 99-103.

36 Dobre P. Main factors affecting biogas production - an overview/Romanian Biotechnological Letters.-Vol. 19, No. 3.- 2014.-pp. 9283-9296.

37 Джамалова Г.А. Биотехнология производства биогаза из ТБО Карасайского полигона/Г. А. Джамалова // Вестник КазНУ, Серия биологическая. -2015.-№1.-С.39-40.

38 Джамалова Г.А. Математическое планирование эмиссии биогаза и фильтрата в процессе интенсивного анаэробного разложения твердых бытовых отходов в биореакторе // Современные проблемы науки и образования. – 2015.

– № 2-2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21861> (дата обращения: 06.04.2020).

39 Джамалова Г.А. Анализ изменчивости качественного состава биогаза, производимого биореактором при интенсификации анаэробного разложения твердых бытовых отходов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 4.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21119> (дата обращения: 06.04.2020).

40 Джамалова Г.А. Математическое планирование выхода продуктов биоразложения твердых бытовых отходов в зависимости от протокола загрузки биореактора // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 4.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21293> (дата обращения: 06.04.2020).

41 Джамалова Г.А., Ивахнюк Г.К. Количественный и качественный состав фильтрата, получаемого из биореактора при ускоренной биodeградации твердых бытовых отходов. Известия СПбГТИ(ТУ), № 24 (50), СПб- 2014.С.73-77.

42 Джамалова Г.А. Анализ изменчивости химического состава фильтрата и эмиссии биогаза при интенсивном анаэробном разложении твердых бытовых отходов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7-4. – С. 669-674.

43 Крупский К.Н. Использование биогаза в качестве источника энергии: обзорная информация/ Крупский К.Н., Андреев Е.Н., Ютина А.С. - М.:ЦБНТИ Минжилкомхоз РСФСР, 1988. – 43 с.