

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Сәтбаев Университеті

Институт Химических и Биологических Технологий

Кафедра Химической и Биохимической Инженерии

Земцова Алина Сергеевна

Планирование и оптимизация эмиссии биогаза на полигонах ТБО

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

Специальность 5В070100 – 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 Биохимической  
Инженерии

Доктор химических наук, доцент

\_\_\_\_\_ Елигбаева Г.Ж.

"21" мая 2020 г.

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

На тему: "Планирование и оптимизация эмиссии биогаза на полигонах  
ТБО"

по специальности 5В070100– Биотехнология

Выполнила

Земцова А.С.

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 Биохимической  
Инженерии  
Доктор химических наук, доцент

\_\_\_\_\_ Елигбаева Г.Ж.

"21" мая 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломного проекта**

Обучающейся: Земцовой Алине Сергеевне

Тема: "Планирование и оптимизация эмиссии биогаза на полигонах ТБО"

Утверждена приказом Ректора Университета № 1163–б от "16" октября 2020 г.

Срок сдачи законченной работы "15" мая 2020 г.

Исходные данные к дипломному проекту

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

*а) изучение особенности антропогенного развития свалочного тела полигона ТБО;*

*б) планирование пятифакторного эксперимента на основе биохимических процессов разложения свалочного тела полигона ТБО;*

*в) оптимизация исследуемых пяти независимых факторов анаэробного биоразложения 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 54 наименований.*

**ГРАФИК**  
подготовки дипломной проекта

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

**Подписи**

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

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

Научный руководитель \_\_\_\_\_

Джамалова Г.А.

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

Земцова А.С.

Дата

"22" апреля 2020 г.

## АННОТАЦИЯ

Тема. Планирование и оптимизация эмиссии биогаза на полигонах ТБО.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, свалочное тело, полигон, метаногенез, пятифакторный эксперимент.

Цель. Планирование и оптимизация эмиссии биогаза на полигонах ТБО.

Задачи. Изучить особенности антропогенного развития свалочного тела полигона ТБО. Планирование пятифакторного эксперимента на основе биохимических процессов разложения свалочного тела полигона ТБО. Оптимизация исследуемых пяти независимых факторов анаэробного биоразложения на процесс образования метана в составе биогаза.

Полученные результаты. Методом моделирования изучено влияние независимых переменных на степень генерирования метана в составе биогаза при биоразложении органических отходов в свалочном теле полигона ТБО. Установлено, что наиболее существенными факторами для метаногенеза являются температура (фактор  $X_1$ ; 45 °С), влажность среды (фактор  $X_2$ ; 60 %), уровень рН (фактор  $X_3$ ; 8,5) и соотношение С: N (фактор  $X_4$ ; 20). Наибольшее содержание метана в составе биогаза 50,40 % планируется получить при изменении факторов  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  и  $X_4$ .

Практическое значение. Нахождение, методами математического моделирования, оптимальных биотехнологических параметров анаэробного разложения органических отходов, имеющихся в составе свалочного тела полигона ТБО, позволит сконструировать инженерно-технические локальные для конкретного полигона решения в целях увеличения степени образования метана в составе биогаза.

Структура и объем. Дипломная работа изложена на 34 страницах компьютерного текста, содержит 5 рисунков, 6 таблиц. В библиографическом указателе литературы даны ссылки на 54 источника.

## АНДАТПА

Тақырыбы. ТҚҚ полигондарында биогаз эмиссиясын жоспарлау және оңтайландыру.

Түйін сөздер: тұрмыстық қатты қалдықтар, үйінді дене, полигон, метаногенез, бес факторлы эксперимент.

Мақсаты. ТҚҚ полигондарында биогаз эмиссиясын жоспарлау және оңтайландыру.

Міндеттері. ТҚҚ полигонының үйінді денесінің антропогендік даму ерекшеліктерін зерттеу. ТҚҚ полигонының үйінді денесінің биохимиялық процестердің ыдырауы негізінде бес факторлы экспериментті жоспарлау. Биогаз құрамында метан түзілу процесіне анаэробты биологиялық ыдыраудың зерттелетін бес тәуелсіз факторларын оңтайландыру.

Алынған нәтижелер. Модельдеу әдісімен ҚТҚ полигонының үйінді денесінде органикалық қалдықтардың биологиялық ыдырауы кезінде биогаз құрамында метанның генерациялау дәрежесіне тәуелсіз өзгерулердің әсері зерттелді. Метаногенез үшін ең маңызды факторлар температура (X1 факторы; 45 °С), ортаның ылғалдылығы (X2 факторы; 60%), РН деңгейі (X3 факторы; 8,5) және С: N қатынасы (X4 факторы; 20) болып табылатыны анықталды. Биогаз құрамында метанның ең көп мөлшерін 50,40% X1, X2, X3 және X4 факторлары өзгерген кезде алу жоспарлануда.

Практикалық маңызы. ТҚҚ полигонының үйінді денесінің құрамында бар органикалық қалдықтардың биотехнологиялық параметрлерін анаэробты ыдырауын математикалық модельдеу әдістерімен табу, биогаз құрамында метанның пайда болу дәрежесін арттыру мақсатында нақты полигон үшін инженерлік-техникалық, жергілікті шешімдерді құрастыруға мүмкіндік береді.

Құрылымы және көлемі. Дипломдық жұмыс 34 беттен тұрады, 5 сурет, 6 кесте бар. Библиографиялық көрсеткіште 54 дереккөзге сілтеме жасалған.

## ANNOTATION

Topic. Planning and optimization of biogas emissions at landfills.

Keywords: solid household waste, landfill body, landfill, methanogenesis, five-factor experiment.

Objective. Planning and optimization of biogas emissions at landfills.

Tasks. To study the features of the anthropogenic development of the landfill body of a landfill. Planning a five-factor experiment based on biochemical decomposition processes of a landfill solid waste landfill. Optimization of the studied five independent factors of anaerobic biodegradation on the process of methane formation in the composition of biogas.

Results. The simulation method was used to study the effect of independent variables on the degree of methane generation in biogas during biodegradation of organic waste in the landfill body of a solid waste landfill.

It was established that the most significant factors for methanogenesis are temperature (factor X1; 45 ° C), humidity (factor X2; 60%), pH (factor X3; 8.5) and the ratio C: N (factor X4; 20). The highest methane content in the biogas composition of 50.40% is planned to be obtained by changing factors X1, X2, X3 and X4.

Practical value. Finding by the methods of mathematical modeling the optimal biotechnological parameters of the anaerobic decomposition of the organic waste contained in the landfill body of the landfill, will allow us to design engineering and technical local solutions for a particular landfill in order to increase the degree of methane formation in biogas.

Structure and volume. The diploma thesis is presented on the 34 pages of computer text, contains 5 figures, 6 tables. In the bibliographic index of literature references to 54 sources are given.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Обзор литературы	10
1.1	Полигон ТБО, как геобиореактор	10
1.2	Анаэробное разложение органических отходов	14
1.2.1	Стадии и микроорганизмы анаэробного разложения	14
1.2.2	Факторы, влияющие на процесс анаэробного разложения	15
1.3	Биогаз, как продукт анаэробного разложения органических фракций ТБО	16
1.3.1	Состав биогаза	16
1.3.2	Свалочный газ	17
1.3.3	Биогаз как источник электроэнергии	17
2	Материал и методика исследований	19
3	Результаты исследования	21
	Заключение	29
	Библиографический список литературы	30

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность.* Для жизнедеятельности человека необходимыми условиями, наравне с природной средой, является и антропогенная среда. Если в первом случае мы ассоциируем свою жизнь на природе, как отдых, то во втором случае, как необходимую потребность своего существования. Это свидетельствует о том, что человек ассоциирует свою жизнь в просторах антропогенной среды как должное. И для нас, развитие антропогенной среды является на сегодня первостепенной задачей, т.к. с этим развитием мы получаем более комфортную, по нашему пониманию, жизнь. Данный комфорт наравне с уютом и теплом, означает развитие наших потребительских возможностей в виде товаров, изделий и продуктов. И чем выше экономическое развитие локальной антропогенной среды, тем более легко заменимыми они, т.е. продукты, изделия и товары, становятся. Поэтому не удивительно, что эти ненужные и скоро портящиеся продукты, а также товары и изделия, как отслужившие свой срок в быту, скоропостижно устремляются в контейнер для твердых бытовых отходов (ТБО) и, далее, в 94-97 %-ном случае с нашими локальными возможностями, на полигон ТБО, где, в процессе биохимического разложения уже сформированного свалочного тела, образуются в составе фильтрата и биогаза различные по составу и структуре ксенобиотики и, которые, в свою очередь, устремляются в природную среду. Данная цепь антропогенного развития товаров и изделий обязывает нас находить и разрабатывать новые системы управления ТБО, т.к. игнорирование этими проблемами приведет, в будущем, к тому, что нам просто трудно будет найти место для отдыха.

*Цель.* Планирование и оптимизация эмиссии биогаза на полигонах ТБО.

*Задачи:*

- 1 Изучить особенности антропогенного развития свалочного тела полигона ТБО.
- 2 Планирование пятифакторного эксперимента на основе биохимических процессов разложения свалочного тела полигона ТБО.
- 3 Оптимизация исследуемых пяти независимых факторов анаэробного биоразложения на процесс образования метана в составе биогаза.

*Практическое значение.* Нахождение, методами математического моделирования, оптимальных биотехнологических параметрах анаэробного разложения органических отходов, имеющихся в составе свалочного тела полигона ТБО, позволит сконструировать инженерно-технические локальные для конкретного полигона решения в целях увеличения степени образования метана в составе биогаза и практического его применения.

*Структура и объем.* Дипломная работа изложена на 34 страницах компьютерного текста, содержит 5 рисунков, 6 таблиц. В библиографическом указателе литературы даны ссылки на 54 источника.

# 1 Обзор литературы

## 1.1 Полигон твердых бытовых отходов, как геобиореактор

Твердые бытовые отходы (ТБО) [1; с.4] – это образовавшиеся в антропогенной среде:

- ненужные или пришедшие в негодность продукты и их остатки,
- товары и изделия, отслужившие свой срок в быту,
- многотоннажные, различные по составу, структуре и объему, отходы потребления.

Свалочное тело полигона ТБО [2, с.48] – это:

- антропогенно – обустроенная территория с различными инженерно-технологическими решениями для снижения от отходов потребления техногенной нагрузки на окружающую среду,
- зона технологического складирования,
- целостность абиотических факторов литогенной сферы и биоты.

Исходя из изложенного выше можно заключить, что свалочное тело полигона ТБО – это геологическое природно-техногенное (био-антропогенное) образование, ассоциируемое с полигоном ТБО. В связи с особым сложным составом грунта на полигоне ТБО, свалочное тело четко разграничено и имеет особые эколого-геологические и гидрогеологические условия [3, с.23].

ТБО на полигоне [3, с.16]:

- 1) представляет собой:
  - техногенный свалочный грунт,
  - гетерогенную, сложно-многофазную, практически однородную систему;
- 2) состоит из компонентов:
  - твердой, куда входят металлы, пластик, различные бытовые приборы и их части и т. д.,
  - жидкой, представленной продуктами гидролиза, атмосферными осадками и отжимной жидкостью, т.е. фильтратом,
  - газовой, представленной продуктами химического, а также биохимического разложения органоминеральной массы отходов,
  - биотической (живой) составляющей.

В такой сложной массе этого техногенно сложившегося свалочного тела происходят многообразные химические и биологические процессы, приводящие к распространению в природную среду, с одной стороны, различных ксенобиотиков, с другой, болезнетворных агентов.

Следует отметить, что свалочные тела полигонов ТБО подразделяют от уровня образования биогаза, как показано на рисунке 1, на пять категорий.

Как видно из рисунка 1, различают безопасные, потенциально опасные, опасные категории I и опасные категории II и пожаровзрывоопасные, отличающиеся содержанием  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в приземном слое, в первом случае менее 0,1 и 0,5 об. %, более 0,1 и 0,5 об. %, более 1,0 и до 10,0 об. %, до 5,0 и  $n \cdot 10$  об. % и более 5,0 и  $n \cdot 10$  об. % соответственно [4, 9 с.].

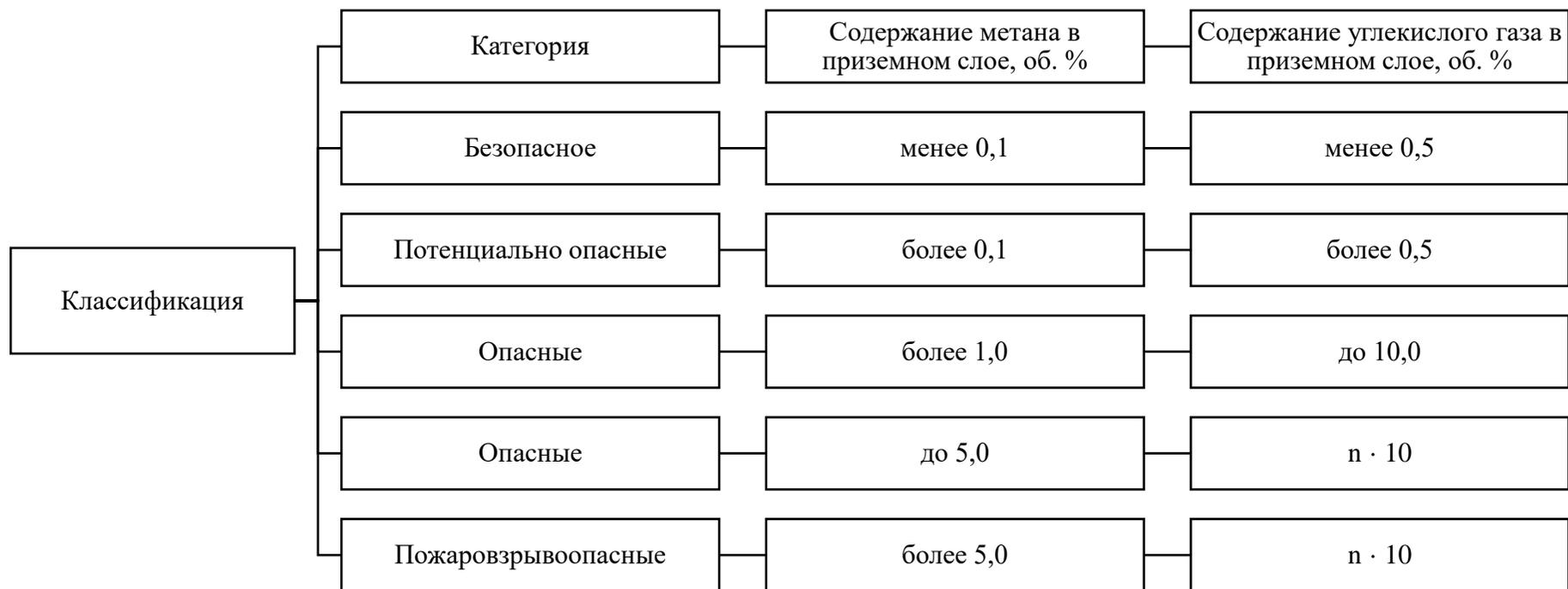


Рисунок 1 – Классификация свалочных тел полигонов в зависимости от уровня образования биогаза [4, 9 с.]

Согласно Экологическому кодексу Республики Казахстан [5] полигон для размещения отходов может быть отнесен к одному из следующих классов:

- 1 класс - полигон для размещения опасных отходов;
- 2 класс - полигон для размещения неопасных отходов;
- 3 класс - полигон для размещения ТБО.

Полигоны для ТБО [6]:

- представляют собой инженерно-технологически обустроенные сооружения,
- выполняющие функции изоляции и обезвреживания твердых бытовых отходов.

Из изложенного следует, что полигон складирования (депонирования) твердых бытовых отходов может рассматриваться сегодня как действенный геобиореактор.

Основные элементы полигона ТБО приведены в виде схемы на рисунке 1.



Рисунок 2 – Основные элементы полигона ТБО [7, с.182]

Как видно из рисунка 2, основными элементами Полигона ТБО служат хозяйственная (вспомогательная) зона, где сосредоточены подъездная дорога, контрольно-приемный пункт с весами, производственные площадки для административно-бытового корпуса и техники и, технологическая зона, в которой сосредоточены участки для депонирования ТБО. Более подробно это изложено в виде схемы на рисунке 3.

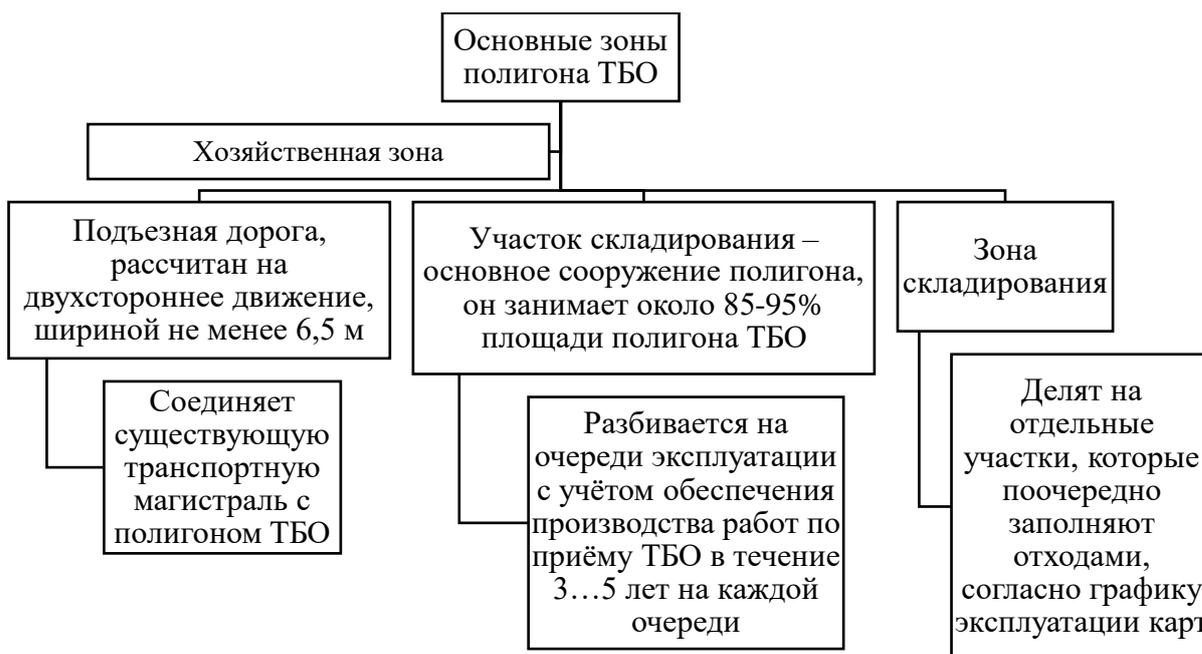


Рисунок 3 – Основные зоны полигона ТБО [8, с.13; 6]

Как видно из рисунка 3, участок складирования на полигоне ТБО представляет собой основное сооружение и занимает от общей площади полигона ТБО примерно 85-95%, при этом он разбивается на очереди эксплуатации для обеспечения технологии производства работ по приёму и депонированию ТБО в течение 3-5 лет для каждой очереди [8, с.13]. Тогда как Зона складирования представляет собой Технологическую карту складирования ТБО, которая заполняется поочередно согласно графику эксплуатации карт, что составляется администрацией полигона [6]. В хозяйственной зоне, вместе с контрольно-приемным пунктом и административно-бытовым корпусом, также размещаются гараж, складские помещения для горюче-смазочных материалов, энергоресурсов, строительных материалов, спецодежды, хозяйственного инвентаря и пр. [9, с.7].

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить следующие положения [1-9]:

1 Свалочное тело полигона ТБО можно рассматривать как геобиореактор, т.к. представляет собой геологическое природно-техногенное образование с особыми эколого-геологическими и гидрогеологическими условиями.

2 Полигоны твердых бытовых отходов для окружающей природной среды выполняют функцию защитного барьера с целью предотвращения вредного влияния на природу и, после завершения периода эксплуатации, возможной их рекультивации.

3 Полигон твердых бытовых отходов для предупреждения их негативного воздействия на природную среду обязательно должен быть оборудован системой мониторинга эмиссии таких ксенобиотиков, как:

- биогаза, т.е. свалочного газа,
- ядовитого фильтрата, что образуется в депонированных отходах в процессе биохимического их разложения.

4 Требования, которые следует учитывать при выборе местоположения полигона размещения ТБО:

1) расстояние от границы полигона до:

- водных объектов,
- земель сельскохозяйственного назначения,
- жилых и рекреационных зон,
- населенных пунктов.

2) наличие:

- подземных вод,
- поверхностных вод,
- водоохраных зон,
- особо охраняемых природных территорий;

3) геологические условия;

4) гидрогеологические условия;

5) риск наводнения на участке;

6) риск понижения на участке;

7) риск оползней на участке;

- 8) риск лавин на участке;
- 9) защиты объектов государственного природно-заповедного фонда.

#### 5 Обеспечение контроля за состоянием:

- загрязнения атмосферного воздуха,
- воды открытых водоемов,
- подземных вод в рабочей зоне полигона,
- границы санитарно-защитной зоны (СЗЗ).

6 По периметру всей территории полигона ТБО требуется устраивать ограждение (траншея глубиной около 2 м или земляной вал высотой около 2 м).

7 При складировании ТБО на технологической карте осуществляют изоляцию грунтом (инертным материалом):

- промежуточную толщиной около 0,25-0,5 м примерно через каждые 5 м,
- окончательную (до 2 м) на поверхности уплотненного слоя отходов.

## 1.2 Анаэробное разложение органических отходов

### 1.2.1 Стадии и микроорганизмы анаэробного разложения

Получение биогаза из свалочного тела полигона ТБО имеет некоторые отличия от типового анаэробного сбраживания органических отходов в метантенке, так как распад органической фракции ТБО протекает напрямую на свалке после захоронения отходов в отсутствие кислорода. Биомассу на свалках не изолируют в отдельную емкость (например, в метантенк) ввиду того, что процесс выделения биогаза из свалочного тела полигона ТБО протекает вне зависимости от того, предусмотрены инженерные решения по сбору биогаза из свалочного тела или нет, т.к. процесс метан-образования начинает протекать в отсутствие кислорода.

Анаэробное разложение основано на эффективном превращении органического вещества в ценный продукт известный как биогаз, с метаном (CH<sub>4</sub>) в качестве основного горючего компонента [10, с.2].

Процесс анаэробного разложения проходит через четыре последовательных этапа: гидролиз, ацидогенез, ацетогенез и метаногенез. Анаэробный процесс биоразложения зависит от взаимодействия между различными микроорганизмами, которые способны выполнять четыре вышеупомянутых стадии [11, с.8].

В процессе гидролиза гидролитические бактерии способны выделять внеклеточные ферменты, которые могут превращать углеводы, липиды и белки в сахара, длинноцепочечные жирные кислоты и аминокислоты, соответственно. [12, с.824].

Реакции гидролиза:

Липиды → Жирные кислоты

Полисахариды → Моносахариды

Белок → Аминокислоты

Нуклеиновые Кислоты → Пурины и Пиримидин [13, с.3].

Скорость, с которой происходит гидролиз, определяется доступностью субстрата, популяцией бактерий, плотностью, температурой и pH [14, с.35].

Гидролиз осуществляется бактериями из группы факультативных анаэробов рода: *Streptococcus*, *Enterobacterium* [15, с.4130].

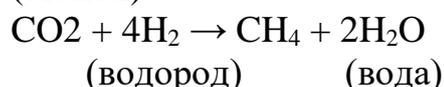
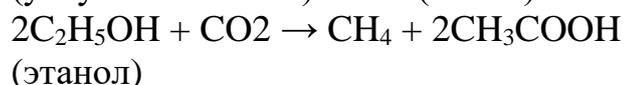
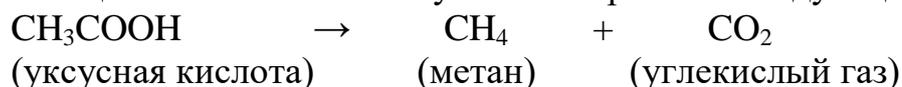
На втором этапе, ацетогенные бактерии, также известные как кислотообразующие, превращают продукты первой фазы в простые органические кислоты [16, с.3], такие как уксусная, пропионовая и масляная кислоты и другие второстепенные продукты, такие как водород, углекислый газ и уксусная кислота [17].

На третьем этапе, ацетатные бактерии, в том числе из родов *Syntrophomonas* и *Syntrophobacter* преобразуют летучие жирные кислоты в ацетат, CO, водород (H<sub>2</sub>). Бактерии *Methanobacterium suboxydans* разлагают пентановую кислоту до пропионовой кислоты, тогда как *Methanobacterium propionicum* разлагают пропионовую кислоту до уксусной кислоты [15, с.4131].

Метаногенез знаменует собой последнюю стадию анаэробного брожения, когда доступные промежуточные продукты потребляются метаногенными микроорганизмами для производства метана [18].

К метаногенным бактериям относятся *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* and *Methanosarcina* [13].

Реакции метаногенеза могут быть выражены следующим образом [16]:



### 1.2.2 Факторы, влияющие на процесс анаэробного разложения

Анаэробное разложение сильно зависит от температуры [19]. Существуют два основных температурных режима для анаэробного брожения: мезофильный (35°C) и термофильный (55°C) [20].

Оптимальная температура мезофильного реактора для производства биогаза составляет 35°C. В мезофильном диапазоне активность, и скорость роста бактерий уменьшаются на 50% для каждого падения на 10°C. Падение производства биогаза начинается, когда температура падает до 20°C, а производство прекращается при 10°C [21].

Увеличение уровня температуры до 37 ° C приводит к сокращению времени, необходимого для процесса разложения. Дальнейшее повышение температуры снижает скорость образования биогаза [22, с.788].

pH анаэробного процесса биоразложения является еще одним параметром, который оказывает существенное влияние на процесс разложения [23, 24]. Оптимальный диапазон pH в анаэробном геобиореакторе составляет от 6,8 до 7,2 [25, с.2] Метаногенез в анаэробном геобиореакторе эффективно происходит при

pH 6,5–8,2, тогда как гидролиз и ацидогенез происходят при pH 5,5 и 6,5, соответственно [26].

Отношение C / N в органическом материале играет решающую роль в анаэробном разложении [27, с.1684]. Оптимальное соотношение C / N для анаэробной деградации органических отходов составляет 20–35 [26]. Однако, в действительности отношения C / N исходного сырья часто намного ниже или выше, чем 25-30 [28]. Если соотношение C/N слишком велико, азот быстро расходуется метаногенами для удовлетворения своих потребностей в белке и больше не может реагировать на оставшееся содержание углерода в материале [29, с.5].

Эффективность анаэробного пищеварения также можно оценить с помощью ХПК. Снижение ХПК может отражать количество разложения, происходящего в анаэробном реакторе, так как оно отражает потребление органики [30].

Минеральные ионы, особенно тяжелых металлов, и моющие средства являются одними из материалов, которые препятствуют нормальному росту бактерий. Небольшие количества минералов (натрий, калий, кальций, магний, аммоний и сера) стимулируют рост бактерий, но более высокие их концентрации оказывают токсическое действие [31, с.9].

### **1.3 Биогаз, как продукт анаэробного разложения органических фракций ТБО**

#### **1.3.1 Состав биогаза**

Основным продуктом при анаэробном разложении органических отходов на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО) является биогаз.

Биогаз - горючая смесь газов. Он состоит в основном из метана (CH<sub>4</sub>) и углекислого газа (CO<sub>2</sub>) и образуется в результате анаэробного бактериального разложения органических соединений, то есть без кислорода [32, с.4].

Его состав зависит от типа сырья подвергнутому процессу разложения. Относительно состав биогаза:

- метан CH<sub>4</sub> (50–75%),
- углекислый газ CO<sub>2</sub> (25–35%),
- сероводород H<sub>2</sub>S (0–1%),
- водород H<sub>2</sub> (0–1%),
- окись углерода CO (0–2%),
- азот N<sub>2</sub> (0–2%),
- аммиак NH<sub>3</sub> (0–1%),
- кислород O<sub>2</sub> (0–2%) и
- вода - H<sub>2</sub>O (2–7%).

При горении свалочных тел вместе с дымом и копотью в атмосферу выделяются такие токсичные вещества, как оксиды азота, серы, хлористый

водород и др. Всего биогазе идентифицируется более 100 химических соединений [33, с.64].

Полигоны ТБО являются антропогенными источниками выбросов метана в атмосферу. Так, их вклад в глобальную эмиссию парникового газа можно оценить в 35-73 т /год (10-20% от антропогенной или 6-12% от общей эмиссии метана) [34, с.39].

В основе биогазовых (метаногенных) технологий находятся сложные природно-антропогенные процессы анаэробного биоразложения органических отходов под воздействием анаэробных бактерий [35, с.105].

Из изложенного выше можно заключить, что в биогазогенезе условно принимают участие две группы микроорганизмов:

- кислотообразующие (бродильные) бактерии расщепляет сложные органические соединения (белки, жиры, клетчатку и др.) в более простые, приводящие к тому, что в сброживаемой среде накапливаются первичные продукты брожения - летучие жирные кислоты, низшие спирты, водород, оксид углерода, уксусная и муравьиная кислоты и др.;

- метанообразующие бактерии (архебактерии) используют накопленные менее сложные органические кислоты для питания и, которые, ферментируют их, в большей части, в метан и углекислый газ [36, с.22].

### 1.3.2 Свалочный газ

Свалочный газ, как разновидность биогаза, образуется на свалках при биоразложении ТБО.

На свалках ТБО органическая фракция (пищевые отходы, бумага, картон, текстиль, дерево, кости и кожа) подвергаются биохимическому процессу разложения. В результате этого в толще свалочного тела интенсивно формируются анаэробные процессы разложения органического вещества. В таких условиях выход свалочного газа находится в пределах 120-200 м<sup>3</sup>/т ТБО, при этом следует отметить, что свалочный газ формируется преимущественно в первые 5 – 50-60 лет работы свалки, особенно интенсивно данный газ выделяется в первые 5-15 лет – около 50% от полного запаса [37, с.12; 38, с.44].

При накоплении большого количества газа, давление внутри свалки становится выше атмосферного давления, и он движется в атмосферу. Эти газы вызывают неприятные запахи внутри и снаружи свалок [39, с.31]. Метан, имеющийся в составе свалочного газа, на порядок более активно влияет на развитие парникового эффекта по сравнению с диоксидом углерода. Дополнительно метан токсичен для природной среды, взрывоопасен и пожароопасен [40, с.77].

### 1.3.3 Биогаз как источник электроэнергии

Как уже было отмечено выше, при складировании ТБО на полигоне формируется свалочное тело, где, в условиях недостатка кислорода, повышенной

влажности и температуры формируются анаэробные процессы разложения органических отходов в результате которого образуется свалочный газ и в составе которого определяется смесь метана и углекислого газа с минимальным количеством примесей (сера, сероводород, азот, кремний) [41, с. 1103].

Для минимизации вредных выбросов и сбросов, свалку можно преобразовать в полигон ТБО, оборудовав его системами сбора, обезвреживания и утилизации как свалочного газа, так и фильтрата. Для этого в свалочном теле устанавливают комплекс соединенных между собой вертикальных и горизонтальных трубопроводов, выполняющие функцию сбора и вывода продуктов биоразложения отходов – свалочного газа и фильтрата. Собранный таким образом свалочный газ, обезвреживается и, в дальнейшем, может быть использован для получения тепловой (теплотворная способность 6000-9500 ккал/м<sup>3</sup>) и электрической энергии [42, с.165; 43].

Сырой свалочный биогаз после удаления из него конденсата и твердых частиц поставляется к промышленному потребителю с целью производства тепла или для непосредственного использования в определенном технологическом процессе (обжиг, производство технологического пара и пр.) [44].

Такой подход в эксплуатации полигона приносит пользу природной среде и экономике за счет [45, с.4]:

- 1) сокращения выбросов парниковых газов (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>);
- 2) улучшенного управления ТБО;
- 3) финансовых перспектив при сборе и очистке биогаза;
- 4) устойчивой утилизации органических отходов на полигонах;
- 5) уменьшения загрязнения воздуха, водной среды и почвы;
- 6) улучшение местной / сельской экономики.

## 2 Материал и методика исследований

Объект исследования: биогаз, вырабатываемый в свалочном теле полигона ТБО.

Материалы исследования были отобраны из экспериментальных данных, полученных за период с 2009-2015 гг. [46-48].

Методика исследований. В основе анаэробного биоразложения органической фракции ТБО находится многофакторная зависимость. Планирование пятифакторного эксперимента позволит определить некую эмпирическую зависимость, в нашем случае, изучить влияние исследуемых пяти факторов на эмиссию биогаза в условиях полигона ТБО.

В исследовании применен метод планирования эксперимента на основе нелинейной множественной корреляции [49, 50]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1) \times \sum (Y_s - Y_m)^2}{(N-K-1) \times \sum (Y_s - Y_{cp})^2}}. \quad (1)$$

Принятые в формуле 1 значения:

$N$  – число описываемых точек,

$K$  – число действующих факторов,

$Y_s$  – экспериментальный результат,

$Y_m$  – теоретический (расчетный) результат,

$Y_{cp}$  – среднее экспериментальное значение.

Величина значима при выполнении следующих условий:

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

Математическая биология и теория вероятностей рассматривает исследуемые функции как значимые и незначимые, которые вычисляются коэффициентом  $R$  - нелинейной множественной корреляции, и его значимостью  $t_R$  при 5 %-ном уровне), что является достаточным в биотехнологических экспериментах. Когда функция незначима, то границы ее вариации не выходят за доверительный интервал (лимиты допустимого разброса результатов). Следовательно, при анализе значимости частной функции  $N = 5$ ,  $K = 1$ , так как рассматривается влияние каждого из пяти фактора по отдельности.

Подбор аппроксимирующей функции основан на методе 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  $Y_{об}$ :

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

обозначения:

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

$Y_{cp}$  – общее среднее всех учитываемых значений обобщенной функции.

Обобщенное уравнение:

- анализируется по величине коэффициента корреляции  $R$  и значимости  $t_R$  на адекватность,

- позволяет определить оптимальные условия для эмиссии биогаза в процессе анаэробного биоразложения органической фракции ТБО в свалочном теле полигона.

### 3 Результаты исследования

В математическом эксперименте использованы факторы, которые оказывают влияние на анаэробный процесс разложения ТБО в свалочном теле полигона, при этом их показатели были приняты согласно теоретическим данным из различных научных работ:

1  $X_1$  – температура °С: был принят мезофильный режим в интервале от 35 (относительно на глубине от 2 м и ниже) до 45 °С (относительно на глубине от 5 м и ниже), т.к. в условиях свалочного тела полигона ТБО это наиболее оптимальный режим для анаэробного разложения органических составляющих ТБО [51].

2  $X_2$  – влажность среды %: как известно [51], с глубиной в свалочном теле полигона ТБО влажность (осадки + вода, образующаяся при уплотнении отходов + вода, образующаяся в процессе биоразложения) увеличивается, поэтому были приняты, по влажности, следующие лимиты: 60 (относительно на глубине от 2 м и ниже) – 80 (относительно на глубине от 5-7 м и ниже) %.

3  $X_3$  – уровень рН: для благоприятного течения биохимического анаэробного процесса производства биогаза в толще свалочного тела приняты показатели рН в интервале от 6,5 (относительно на глубине от 2 м и ниже) до 8,5 (относительно на глубине от 5-7 м и ниже) [51].

4  $X_4$  – соотношение С : N: углерод-азотный баланс (отношение C/N) – это главный параметр анаэробного процесса разложения органических составляющих ТБО, поэтому был принят предел соотношения C/N в свалочном теле полигона ТБО в зависимости от глубины его залегания: 20/1 (относительно на глубине от 2 м и ниже) – 35/1 (относительно на глубине от 5-7 м и ниже) [52].

5  $X_5$  – ХПК мгО/л: 1100 (относительно на глубине от 5-7 м и ниже для метановой фазы) до 15100 (относительно на глубине от 0,5 м и ниже для кислой фазы) [53].

Учитывая рассматриваемые условия для свалочного тела полигона ТБО, были выделены уровни для пяти факторов, определяющие область факторного пространства. Критерием полноты протекания анаэробного процесса разложения органических составляющих ТБО в свалочном теле, как известно, являются степень как перехода органического субстрата в биогаз [54], так и выделения энергетически полезного компонента – метана. Этот критерий – зависимая величина (функция  $U_p$ ). По результатам различных по данной теме экспериментов из массива экспериментальных данных степени превращения вещества ( $Y$ , %) в нашем случае дана выборка согласно плану – матрице для построения частных зависимостей, описывающих влияние отдельных факторов на  $U_p$ . Область факторного пространства приводится в таблице 1.

Таблица 1 - Область факторного пространства для эксперимента

Фактор	Уровень фактора
$X_1$ – температура °С	35–45

X <sub>2</sub> – влажность среды %	60–80
X <sub>3</sub> – уровень pH	6,5–8,5
X <sub>4</sub> – соотношение C : N	20–35
X <sub>5</sub> – ХПК мгО/л	1100 до 15100
Эмиссия биогаза 45-55, выход метана 60-70%	

Как видим из таблицы 1, в исследовании были использованы следующие факторы необходимые для процесса анаэробного разложения: температура (фактор X<sub>1</sub>), влажность среды (фактор X<sub>2</sub>), уровень pH (фактор X<sub>3</sub>), соотношение C: N (фактор X<sub>4</sub>), ХПК (фактор X<sub>5</sub>).

В таблице 2 показаны области исследуемого факторного пространства.

Таблица 2 - Область факторного пространства

Факторы	Уровни факторов				
	1	2	3	4	5
X <sub>1</sub> – температура °С	35	37,5	40	42,5	45
X <sub>2</sub> – влажность среды %	60	65	70	75	80
X <sub>3</sub> – уровень pH	6,5	7	7,5	8	8,5
X <sub>4</sub> – соотношение C: N	20	23,75	27,5	31,25	35
X <sub>5</sub> – ХПК мгО/л	1100	4600	8100	11600	15100

Таблица 3 - Матрица (пятифакторная) планирования эксперимента

№ опы та	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>		X <sub>4</sub>		X <sub>5</sub>		СН 4, %
	Урове нь	Значен ие	Урове нь	Зна ч.	Урове нь	Зна ч.	Урове нь	Значен ие	урове нь	Значен ие	
1	1	35	1	60	5	8,5	4	31,25	3	8100	50
2	1	35	2	65	4	8	3	27,5	2	4600	51
3	1	35	3	70	3	7,5	5	35	1	1100	47
4	1	35	4	75	2	7	1	20	5	15100	54
5	1	35	5	80	1	6,5	2	23,75	4	11600	49
6	2	37,5	1	60	5	8,5	4	31,25	3	8100	46
7	2	37,5	2	65	4	8	3	27,5	2	4600	52
8	2	37,5	3	70	3	7,5	5	35	1	1100	48
9	2	37,6	4	75	2	7	1	20	5	15100	53
10	2	37,5	5	80	1	6,5	2	23,75	4	11600	45
11	3	40	1	60	5	8,5	4	31,25	3	8100	55
12	3	40	2	65	4	8	3	27,5	2	4600	47
13	3	40	3	70	3	7,5	5	35	1	1100	54
14	3	40	4	75	2	7	1	20	5	15100	46
15	3	40	5	80	1	6,5	2	23,75	4	11600	49
16	4	42,5	1	60	5	8,5	4	31,25	3	8100	50
17	4	42,5	2	65	4	8	3	27,5	2	4600	51

18	4	42,5	3	70	3	7,5	5	35	1	1100	52
19	4	42,5	4	75	2	7	1	20	5	15100	47
20	4	42,5	5	80	1	6,5	2	23,75	4	11600	55
21	5	45	1	60	5	8,5	4	31,25	3	8100	45
22	5	45	2	65	4	8	3	27,5	2	4600	53
23	5	45	3	70	3	7,5	5	35	1	1100	48
24	5	45	4	75	2	7	1	20	5	15100	54
25	5	45	5	80	1	6,5	2	23,75	4	11600	46

Как видно из таблицы 3, по изучаемым факторам разработана матрица планирования на основе латинского квадрата, основанная на 25 экспериментах ( $n = p^2$ ,  $p = 5$ ), по ней рассредоточены независимые факторы от  $X_1$  до  $X_5$  по уровням 1–5.

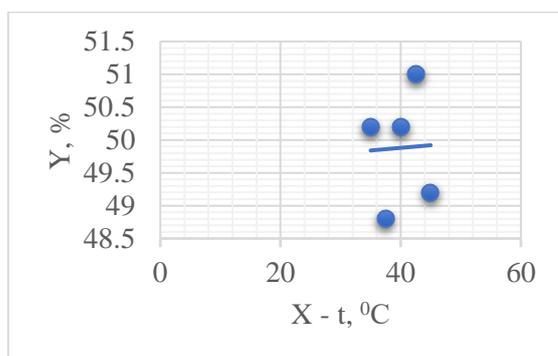
Далее на основе выборки экспериментальных данных вычисляют частные функции ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_5$ ), которые описывают влияние изучаемых факторов на выработку биогаза и содержание в биогазе метана (%) (таблица 4).

Таблица 4 - Расчет экспериментальных значений частных функций

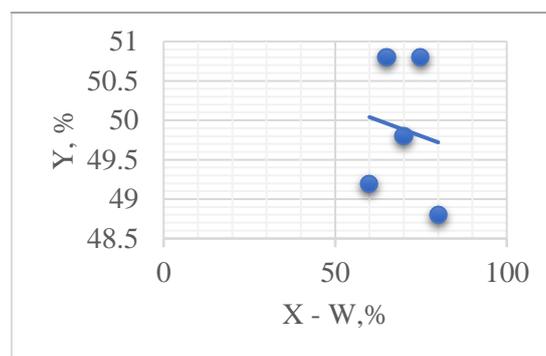
№ фактора	1	2	3	4	5	$Y_{cp}$
$X_1$	50	46	55	50	45	
	51	52	47	51	53	
	47	48	54	52	48	
	54	53	46	47	54	
	49	45	49	55	46	
$\Sigma$	50,2	48,8	50,2	51	49,2	49,9
$X_2$	50	51	47	54	49	
	46	52	48	53	45	
	55	47	54	46	49	
	50	51	52	47	55	
	45	53	48	54	46	
$\Sigma$	49,2	50,8	49,8	50,8	48,8	49,9
$X_3$	49	54	47	51	50	
	45	53	48	52	46	
	49	46	54	47	55	
	55	47	52	51	50	
	46	54	48	53	45	
$\Sigma$	48,8	50,8	49,8	50,8	49,2	49,9
$X_4$	54	49	51	50	47	
	53	45	52	46	48	
	46	49	47	55	54	
	47	55	51	50	52	
	54	46	53	45	48	
$\Sigma$	50,8	48,8	50,8	49,2	49,8	49,9
$X_5$	47	51	50	49	54	
	48	52	46	45	53	
	54	47	55	49	46	
	52	51	50	55	47	

	48	53	45	46	54	
	49,8	50,8	49,2	48,8	50,8	49,9

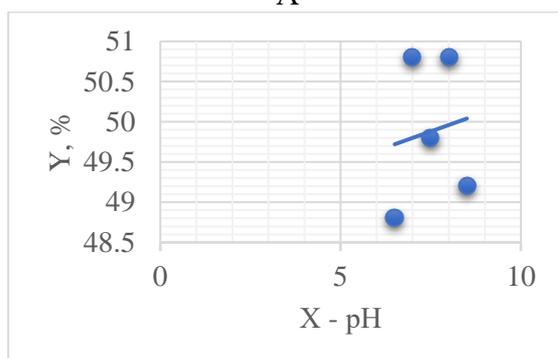
На основе полученных экспериментальных данных приведен рисунок 4, где представлены точечные графики: изучение влияния рассматриваемых независимых факторов: X1 (температура, °C), X2 (влажность, %), X3 (pH), X4 (C:N), X5 (ХПК, мгО/л) на метангенез при биоразложении свалочного тела полигона ТБО % образования биогаза.



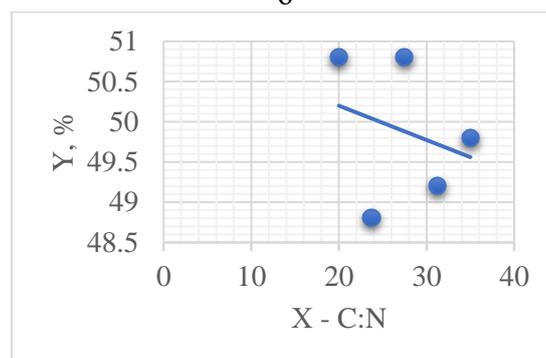
А



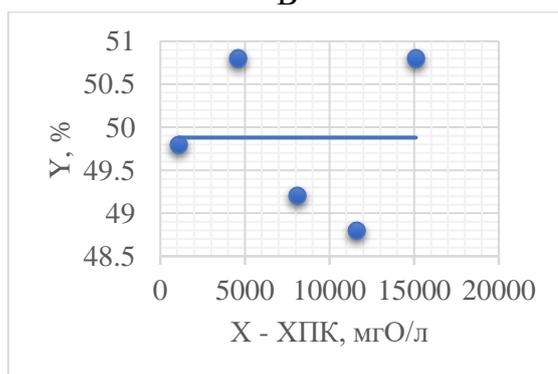
б



В



г



Д

Рисунок 4 - Выборка на точечные графики: изучение влияния рассматриваемых независимых факторов: X<sub>1</sub> (температура, °C), X<sub>2</sub> (влажность, %), X<sub>3</sub> (pH), X<sub>4</sub> (C:N), X<sub>5</sub> (ХПК, мгО/л) на метангенез при биоразложении свалочного тела полигона ТБО % образования биогаза.

Проведенный методом наименьших квадратов анализ моделей (таблица 4) позволил рассчитать теоретические алгебраические значения частных функций (таблица 5).

Таблица 5 - Расчетные значения и аппроксимация исследуемой функции

Фактор  $X_1$  температура °С

№	$X_1$			
	X	Y	$X^2$	XY
1	35	50,2	1225	1757
2	37,5	48,8	1406,25	1830
3	40	50,2	1600	2008
4	42,5	51	1806,25	2167,5
5	45	49,2	2025	2214
$\Sigma$	200	249,4	8062,5	9976,5

Фактор  $X_2$  – влажность среды %

№	$X_2$			
	X	Y	$X^2$	XY
1	60	49,2	3600	2952
2	65	50,8	4225	3302
3	70	49,8	4900	3486
4	75	50,8	5625	3810
5	80	48,8	6400	3904
$\Sigma$	350	249,4	24750	17454

Фактор  $X_3$  – уровень pH

№	$X_3$			
	X	Y	$X^2$	XY
1	6,5	48,8	42,25	317,2
2	7	50,8	49	355,6
3	7,5	49,8	56,25	373,5
4	8	50,8	64	406,4
5	8,5	49,2	72,25	418,2
$\Sigma$	37,5	249,4	283,75	1870,9

Фактор  $X_4$  – соотношение C: N

№	$X_4$			
	X	Y	$X^2$	XY
1	20	50,8	400	1016
2	23,75	48,8	564,0625	1159
3	27,5	50,8	756,25	1397
4	31,25	49,2	976,5625	1537,5
5	35	49,8	1225	1743
$\Sigma$	137,5	249,4	3921,875	6852,5

Фактор  $X_5$  – ХПК мгО/л

№	$X_5$			
	X	Y	$X^2$	XY
1	1100	49,8	1 210 000	54 780
2	4600	50,8	21 160 000	233 680
3	8100	49,2	65 610 000	398 520
4	11600	48,8	134 560 000	566 080
5	15100	50,8	228 010 000	767 080
$\Sigma$	40500	249,4	450 550 000	2 020 140

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

$$b_1 = \frac{5 \cdot 9976,5 - 200 \cdot 249,4}{5 \cdot 8062,5 - (200)^2} = 0,008$$

$$b_2 = \frac{5 \cdot 17454 - 350 \cdot 249,4}{5 \cdot 24750 - (350)^2} = -0,016$$

$$b_3 = \frac{5 \cdot 1870,9 - 37,5 \cdot 249,4}{5 \cdot 283,75 - (37,5)^2} = 0,16$$

$$b_4 = \frac{5 \cdot 6852,5 - 137,5 \cdot 249,4}{5 \cdot 3921,875 - (137,5)^2} = -0,04$$

$$b_5 = \frac{5 \cdot 2020140 - 40500 \cdot 249,4}{5 \cdot 450550000 - (40500)^2} = 0$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n}$$

$$a_1 = \frac{249,4 - 0,008 \cdot 200}{5} = 49,56$$

$$a_2 = \frac{249,4 + 0,015 \cdot 350}{5} = 50,93$$

$$a_3 = \frac{249,4 - 0,16 \cdot 37,5}{5} = 48,68$$

$$a_4 = \frac{249,4 + 0,04 \cdot 137,5}{5} = 50,98$$

$$a_5 = \frac{249,4 - 0 \cdot 40500}{5} = 49,88$$

Таблица 6 – Теоретическое значение частных функций

Формула	Расчетное содержание метана в биогазе
$Y_{n1} = a + b \cdot X_{n1}$	49,92
$Y_{n2} = a + b \cdot X_{n2}$	49,97
$Y_{n3} = a + b \cdot X_{n3}$	50,04
$Y_{n4} = a + b \cdot X_{n4}$	50,18
$Y_{n5} = a + b \cdot X_{n5}$	49,88

$$Y_{n1} = 49,56 + 0,008 \cdot 35 = 49,84$$

$$Y_{n1} = 49,56 + 0,008 \cdot 37,5 = 49,86$$

$$Y_{n1} = 49,56 + 0,008 \cdot 40 = 49,88$$

$$Y_{n1} = 49,56 + 0,008 \cdot 42,5 = 49,9$$

$$Y_{n1} = 49,56 + 0,008 \cdot 45 = 49,92$$

$$Y_{n2} = 50,93 - 0,016 \cdot 60 = 49,97$$

$$Y_{n2} = 50,93 - 0,016 \cdot 65 = 49,89$$

$$Y_{n2} = 50,93 - 0,016 \cdot 70 = 49,81$$

$$Y_{n2} = 50,93 - 0,016 \cdot 75 = 49,73$$

$$Y_{n2} = 50,93 - 0,016 \cdot 80 = 49,65$$

$$Y_{n3} = 48,68 + 0,16 \cdot 6,5 = 49,72$$

$$Y_{n3} = 48,68 + 0,16 \cdot 7 = 49,8$$

$$Y_{n3} = 48,68 + 0,16 \cdot 7,5 = 49,88$$

$$Y_{n3} = 48,68 + 0,16 \cdot 8 = 49,96$$

$$Y_{n3} = 48,68 + 0,16 \cdot 8,5 = 50,04$$

$$Y_{n4} = 50,98 - 0,04 \cdot 20 = 50,18$$

$$Y_{n4} = 50,98 - 0,04 \cdot 23,75 = 50,03$$

$$Y_{n4} = 50,98 - 0,04 \cdot 27,5 = 49,88$$

$$Y_{n4} = 50,98 - 0,04 \cdot 31,25 = 49,73$$

$$Y_{n4} = 50,98 - 0,04 \cdot 35 = 49,58$$

$$Y_{n5} = 49,88 + 0 \cdot 1100 = 49,88$$

$$Y_{n5} = 49,88 + 0 \cdot 4600 = 49,88$$

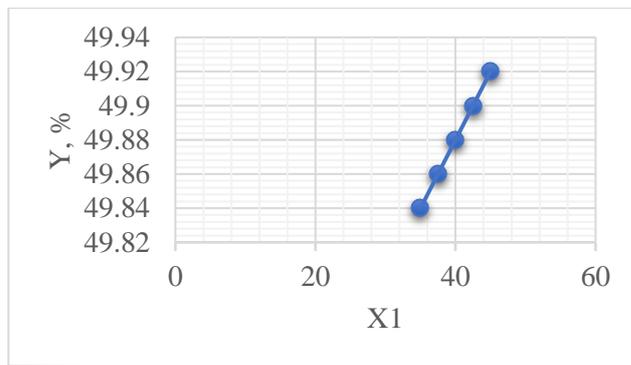
$$Y_{n5} = 49,88 + 0 \cdot 8100 = 49,88$$

$$Y_{n5} = 49,88 + 0 \cdot 11600 = 49,88$$

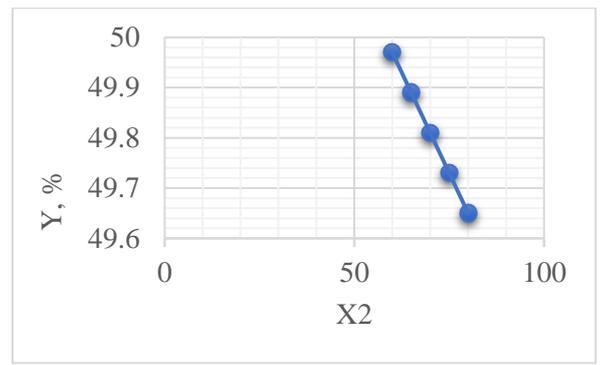
$$Y_{n5} = 49,88 + 0 \cdot 15100 = 49,88$$

На рисунке 5 показаны закономерности протекания метаногенеза в процессе анаэробной деградации ТБО.

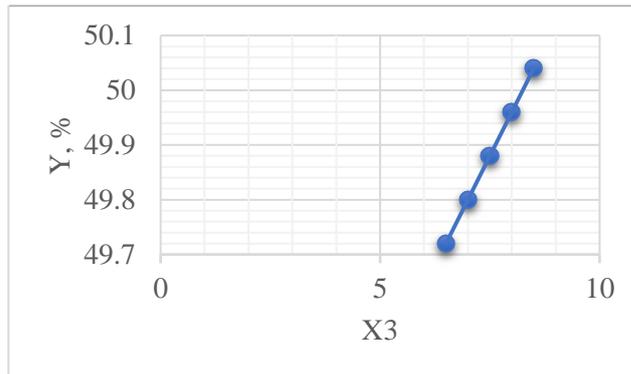
Определяем выборку на точечные графики. Изучаем влияние рассматриваемых в эксперименте факторов  $X_1 - X_5$ :



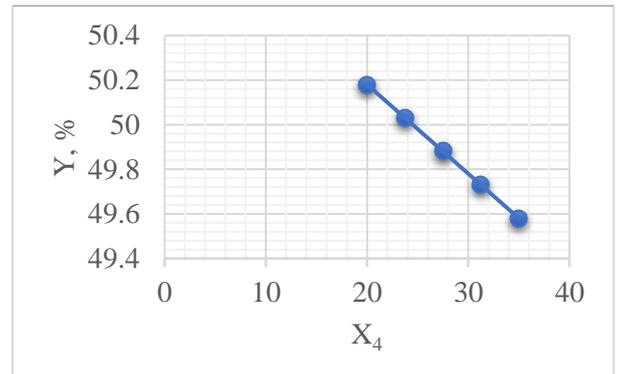
а



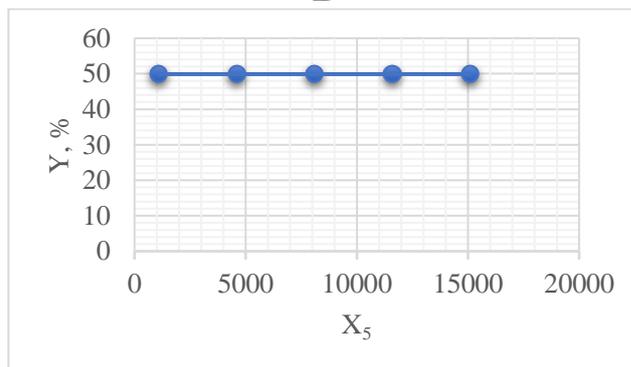
б



в



г



д

Рисунок 5 - Выборка на точечные графики: влияние (а) температуры ( $X_1$ ), (б) влажности ( $X_2$ ), (в) pH, (г) C:N ( $X_4$ ) и (д) ХПК ( $X_5$ ) на образование метана в составе биогаза

Как видим из графиков, представленных на рисунке 5, изучено влияние таких независимых факторов, как температура (фактор  $X_1$ ), влажность среды (фактор  $X_2$ ), уровень pH (фактор  $X_3$ ), соотношение C: N (фактор  $X_4$ ), ХПК (фактор  $X_5$ ) на метаногенез при анаэробной деградации органических компонентов ТБО в свалочном теле полигона.

В результате моделирования метаногенеза на полигонах получены закономерности, которые описываются линейной зависимостью частными уравнениями.

Анализ функций показал, что влияние температуры ( $X_1$ ) и pH ( $X_3$ ) значительно, т.к. значение  $Y_1$  и  $Y_3$  увеличиваются в достаточно заметном интервале.

Расчеты теоретических значений показали, что функции  $Y_1$  и  $Y_3$ , описывающие влияние фактора  $X_1$  и  $X_3$  хорошо выраженные (рисунок 5), т.е. сильнодействующие, т.к. характеризуются высокой крутизной при изменении в

интервале 35-45 °С и 6,5-8,5 соответственно. Восприимчивость изменения степени генерации  $\text{CH}_4$  находится в интервале сотых долей, что указывает о высокой восприимчивости эксперимента к температуре и рН при метаногенезе.

Следует отметить, что построение точечных графиков по экспериментальным данным выявляет естественный разброс с учетом экспериментальной ошибки, т.е. присущую эксперименту, описывающему сложное взаимодействие в процессе разложения ТБО в динамически изменчивых условиях. Коэффициент корреляции в пределах 0,7 ( $t_R = 2,4 > 2$ ) свидетельствует об адекватности уравнения функциональному.

Анализ функций  $Y_2$  и  $Y_4$ , описывающие влияние влажности среды (W, %) и С:N на метаногенез выявил, что в процессе увеличения влажности и показателей соотношений С:N, сопровождается снижением содержания метана в биогазе, т.к. происходит ускорение диффузионных процессов, в результате процессы метаногенеза уменьшаются (рисунок 5).

Влияние ХПК, мгО/л ( $X_5$ ) незначительно, так как график по содержанию метана в биогазе стабилен и находится в пределах 50 % (рисунок 5).

Частные функции, на следующем этапе, были объединены в уравнение (6):

$$Y_{\text{общ.}} = \frac{Y_1 * Y_2 * \dots * Y_n}{\gamma^{n-1}} = \frac{49,92 * 49,97 * 50,04 * 50,18 * 49,88}{49,9^4} = 50,40 \%$$

Анализ обобщенного уравнения показал, что метаногенез в свалочном теле полигона ТБО при заданных технологических параметрах (температура (фактор  $X_1$ ; 45 °С), влажность среды (фактор  $X_2$ ; 60 %), уровень рН (фактор  $X_3$ ; 8,5), соотношение С: N (фактор  $X_4$ ; 20), ХПК (фактор  $X_5$ )) способствует выделению метана в составе биогаза в максимальном интервале 50,40 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что на производство биогаза, в частности, на метаногенез, влияют многие факторы, такие как питательные вещества, температура, влажность, рН сырья и др. Эти факторы, как показали расчеты, могут замедлить или остановить процесс производства биогаза на свалочном теле полигона ТБО, если значения факторов не находятся в пределах необходимого диапазона.

Выводы:

1 Методом моделирования изучено влияние независимых переменных на степень генерирования метана в составе биогаза при биоразложении органических отходов в свалочном теле полигона ТБО.

2 Установлено, что наиболее существенными факторами для метаногенеза являются температура (фактор  $X_1$ ; 45 °С), влажность среды (фактор  $X_2$ ; 60 %), уровень рН (фактор  $X_3$ ; 8,5) и соотношение С: N (фактор  $X_4$ ; 20). Наибольшее содержание метана в составе биогаза 50,40 % планируется получить при изменении факторов  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  и  $X_4$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Голубин А.К. Концепция управления твердыми бытовыми отходами: учебник / А.К. Голубин, В.В. Девяткин, С.В. Погадаев, Л.Я. Шубов. – Москва: Государственное учреждение Научно-исследовательский центр по проблемам управления ресурсосбережением и отходами, 2000.- 72 с.
- 2 Подлипский И. И. Геоэкологическая оценка прилегающих территорий полигона бытовых отходов (г. Питкяранта, Республика Карелия)/ И.И. Подлипский// Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. - 2013.-№2.-С.48-56.
- 3 Подлипский И.И. Характеристика полигонов бытовых отходов как объектов геологического исследования/И.И. Подлипский // Вестник СПбГУ. – 2010. – № 7. – С. 15-31.
- 4 Абрамов Н.Ф. Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации полигонов захоронения твердых бытовых отходов разработаны в соответствии с нормативными материалами по охране окружающей среды / Н.Ф. Абрамов, Я.И. Вайсман, С.В. Максимова [и др.].- Москва, 2003.-28 с.
- 5 Экологический кодекс Республики Казахстан: Кодекс Республики Казахстан № 212-III от 9 января 2007 г.
- 6 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.
- 7 Экологическое обоснование места размещения полигона твердых бытовых отходов/Е.В. Левин, Р.Ф. Сагитов, Т.А. Гамм [и др.]// Известия Оренбургского государственного аграрного университета. -2016.- С.182-184.
- 8 Дружакина О.П. Проектирование полигонов твердых бытовых отходов: учебное пособие/ О.П. Дружакина. - Ижевск: Издательство «Удмуртский университет», 2016. – 28 с.
- 9 Цеханский-Сергеев Г.Л. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация: свод правил / Г.Л. Цеханский-Сергеев, В.Г. Быков, С.А. Деревянко [и др.]. - Москва: Центр методологии нормирования и стандартизации в строительстве, 2016.- 16 с.
- 10 A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency/A. Anukam, A. Mohammadi, M. Naqvi, K. Granström // Environmental and Energy Systems. – 2019. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/8/504> (дата обращения: 01.05.2020).
- 11 Verma S. Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. // S.Verma.- Columbia University; New York, NY, USA, 2002.- 56 p.
- 12 Li Y. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste/ Y. Li, S.Y. Park, J. Zhu. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. -2012.- №15.-p.821-826.

- 13 Verma S. Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. // S.Verma.- Columbia University; New York, NY, USA, 2002.- 56 p.
- 14 Okonkwo P.C. Factors Affecting Biogas Production during Anaerobic Decomposition of Brewery effluent- wastewater in a Fluidized Bed Digester. // P.C. Okonkwo, B.O. Aderemi, C.S. Okoli // Journal of Environment and Earth Science. - 2013.-№8.-p.32-40.
- 15 Ziemiński K. Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms/K. Ziemiński, M. Fraç.// African Journal of Biotechnology.-2012.-№11.- p.4127-4139.
- 16 Verma S. Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. // S.Verma.- Columbia University; New York, NY, USA, 2002.- 56 p.
- 17 Chen L. Anaerobic digestion basics/ L. Chen, H. Neibling. //University by Idaho.- 2014. P.321-327.
- 18 Ferry J. G. The chemical biology of methanogenesis. / J. G. Ferry. //Planetary and Space Science. -2010.-p. 1775-1783.
- 19 Chae K.J. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure/ K.J. Chae, Am. Jang, S.K. Yim, In S. Kim.// Bioresource Technology.-2008. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17306978> (дата обращения: 01.05.2020).
- 20 Moset V. Mesophilic versus thermophilic anaerobic digestion of cattle manure: methane productivity and microbial ecology/V. Moset, M. Poulsen, R. Wahid, O. Højberg, HB. Møller // Microb Biotechnol. - 2015.-p.787-800.
- 21 Bioenergy and biofuel from biowastes and biomass: book/K.K. Samir, Y. S Rao, C.Z. Tian [and other].-NY: American Society of Civil Engineers.-2010.- 505 p.
- 22 Moset V. Mesophilic versus thermophilic anaerobic digestion of cattle manure: methane productivity and microbial ecology/V. Moset, M. Poulsen, R. Wahid, O. Højberg, HB. Møller // Microb Biotechnol. - 2015.-p.787-800.
- 23 Romano RT. Anaerobic digestion of onion residuals using a mesophilic AnaerobicPhased Solids Digester./ RT. Romano, R. Zhang// Biomass Bioenerg.- 2011.-№10.-p. 4174–4179.
- 24 Kumar S. Performance study for anaerobic digestion of municipal solid waste in a single phase reactor./ S. Kumar, S. Mukherjee, S. Devotta// International Journal of Environment and Pollution.-2010.-p.16 – 31.
- 25 Cioabla A. Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues/ A. Cioabla, I.Ionel, G. Dumitrel, F. Popescu// Biotechnol Biofuels.-2012. URL: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/1754-6834-5-39> (дата обращения: 01.05.2020).
- 26 Lee D.H. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab-scale study/ DH. Lee, SK. Behera, JW. Kim, HS. Park// Waste Manag. - 2009.-№ 29(2). -p.876-882
- 27 Biogas production from locally available aquatic weeds of Santiniketan through anaerobic digestion. / A.K. Mathew, I.Bhui, S.N. Banerjee[other]// Clean Technologies and Environmental Policy.-2015.-p. 1681–1688.

28 Anaerobic co-digestion of biosolids and organic fraction of municipal solid waste by sequencing batch process. / P.Zhang, G. Zeng, G.Zhang [other]// Fuel Process Technol.-2008.- 485–489.

29 Abbasi T. Biogas Energy: book// T. Abbasi, S.M. Tauseef, S.A. Abbasi. -NY: Springer,2012.-169 p.

30 Van Lier J.B. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. / J.B. Van Lier, N. Mahmoud, G. Zeeman// International Water Association.-2008.- pp. 401–442.

31 Abbasi T. Biogas Energy: book// T. Abbasi, S.M. Tauseef, S.A. Abbasi. -NY: Springer,2012.-169 p.

32 Jørgensen P.J. Biogas – green energy// P.J. Jørgensen.- 2nd edition.- Aarhus: Faculty of Agricultural Sciences,2009.-36 p.

33 Гумарова Ж.Ж. О санитарно-эпидемиологической опасности твердых бытовых отходов/Гумарова Ж.Ж., Русаков Н.В.//Гигиена и санитария. - 2006.- №1.-С.64-65.

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

35 Смирнов Ю.Д. Переработка органических отходов с помощью биогазвермитехнологии/ Ю.Д. Смирнов, С.В Ковшов, А.Н. Никулин// Записки Горного института.-2013.-Т.203.С.104-107.

36 Вандышева М. С. Биогаз альтернативный источник энергии/ М. С.Вандышева// Вестник НГИЭИ.-2014.-С.22-26.

37 Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов: учебное пособие/А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. Г. Однолько [и др]. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 188 с.

38 Балахчина Т. К. Оценка воздействия свалочного газа с полигонов твердых бытовых отходов на человека/Т. К. Балахчина//Научный диалог.-2012.- С.41-57.

39 Mohammad A. Environmental Impact of Municipal Solid Waste Landfills in Semi-Arid Climates - Case Study – Jordan/ A. Mohammad, M. P. Kenneth//The Open Waste Management Journal.- 2012.-№5.- p. 28-39.

40 Любинская Т. В. Снижение эмиссии биогаза ТБО как важнейший элемент сокращения "парникового эффекта"/Т. В. Любинская//Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности.-2010.- С.76-80.

41 Физико-химические исследования для оценки химической безопасности и эффективности применения новой системы очистки свалочного газа на полигоне твердых бытовых отходов/ А. Г. Малышева, Н.Ю. Козлова, Е.Г. Растянников [ и др.]// Гигиена и санитария.-2017.- № 96(11).- С.1103-1108,

42 Кайзр О. Как обезопасить свалки бытовых отходов/ О. Кайзр// Научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий». -2013.- С. 165-166.

43 Щербаков В.И. Утилизация органических отходов на основе производства биогаза/ В.И. Щербаков, Е.С. Гогина, Т.В. Щукина, Н.В. Кузнецова//Известия Московского государственного технического университета МАМИ.-2013.-№ 3 (17).- С.192-196.

44 Довженко М. Ю. Оценка масштабов образования твердых бытовых отходов и их энергетического потенциала/ М.Ю.Довженко // Молодёжь и наука: Сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 50-летию первого полета человека в космос - Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011. - URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2011/section01.html> (дата обращения: 06.04.2020).

45 Fagerström A. The role of Anaerobic Digestion and Biogas in the Circular Economy/ A. Fagerström, T. Al Seadi, S. Rasi, T. Briseid// IEA Bioenergy.-2018.- 24 p.

46 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).

47 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).

48 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).

49 Казова Р.А. Моделирование обезвреживания техногенных материалов // Материалы XI международной научно-технической конференции «Новое в безопасности жизнедеятельности. Экология». Алматы: КазНТУ имени К.И. Сатпаева. 2008. – С.56 – 59.

50 Малышев В.П. Математическое планирование металлургического и химического эксперимента. Алма-Ата: Наука, 1977. – 35 с.

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

52 Утилизация твердых отходов. Под ред. Д.Вилсона. В 2-х т. Т.1. Сокращенный перевод с англ. Э.Г.Тетерина, А.С.Скотников. Под ред. А.П. Цыганкова. – М.: Стройиздат, 1985 – 336 с.

53 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.

54 Sawyerr N. An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research/ N. Sawyerr, Cr. Trois, T. Workneh, V. Okudoh// International Journal of Energy Economics and Policy.-2019.-№9.-p. 105-116.