

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

ОТЗЫВ

На магистерскую диссертацию магистранта Калымов К. Б.

Тема магистерской диссертации «Исследование биоэнергетических установок для электро- и теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей»

ТЕКСТ ОТЗЫВА

Магистерская диссертационная работа выполнена в соответствии с полученным заданием и оформлена согласно установленным требованиям, предъявляемым к положению о магистерской диссертации.

Магистерская диссертационная работа посвящена актуальной и значимой теме исследования биоэнергетических установок для обеспечения электро- и теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей в Казахстане. Автор диссертации подробно рассматривает вопросы использования биоэнергетических технологий, которые позволяют эффективно использовать биомассу для генерации электроэнергии и тепла. В работе представлены современные методы и технологии переработки биомассы, а также анализируется их применимость в условиях сельского хозяйства Казахстана.

Автор сумел отразить вышеназванную специфику, достаточно убедительно и аргументированно обосновал актуальность темы.

За период выполнения магистерской диссертационной работы Калымова К. Б. показал себя, как самостоятельный научный работник, способный решать сложные научные задачи.

По результатам проведенных исследований опубликована 2 печатной работы в изданиях, рекомендованных Комитетом по надзору и аттестации в сфере образования и науки КОКСНВО МНВО РК.

В целом, диссертация Калымова Калымжана Баглановича выполнена на высоком научном уровне и заслуживает высокой оценки. Результаты работы представляют значительный интерес для развития биоэнергетики в сельскохозяйственном секторе Казахстана и могут способствовать продвижению устойчивых энергетических решений в регионе. Магистерская диссертационная работа выполнена на должном научном уровне, содержит результаты решения поставленной научной проблемы, удовлетворяет квалификационным требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, работа оценивается на «отлично» (95%) и может быть

допущено к защите для присуждения квалификации и соискания академической степени магистра техники и технологии по специальности 7M07113 – Электротехника и энергетика.

Научный руководитель:
PhD, ассоц. профессор

 Онгар Б.

«24» 06 2024г.

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

РЕЦЕНЗИЯ

На магистерскую диссертацию магистранта Калымов К. Б.

Тема магистерской диссертации «Исследование биоэнергетических установок для электро- и теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей»

ТЕКСТ РЕЦЕНЗИИ

Актуальность исследования. Магистерская диссертация Калымова Калымжана Баглановича посвящена актуальной и важной теме исследования биоэнергетических установок, которые могут существенно повысить энергоэффективность и устойчивость сельскохозяйственных потребителей в Казахстане. Под руководством к.т.н., доцента Онгара Б. автор проделал значительный объем работы, что подтверждается высоким научным уровнем и качеством полученных результатов. Работа посвящена исследованию использования биомассы для генерации электроэнергии и тепла, что является особенно актуальным в контексте глобального перехода на возобновляемые источники энергии. В условиях Казахстана, обладающего значительными запасами биомассы, данное исследование представляет особую ценность. Научная новизна работы заключается в адаптации современных технологий переработки биомассы к условиям сельского хозяйства Казахстана.

Цель работы и задача исследования. Целью магистерской диссертации является комплексная оценка эффективности и перспектив использования биоэнергетических установок для электро- и теплоснабжения сельскохозяйственных районов Казахстана. Для достижения этой цели необходимо провести детальный анализ технологий биоэнергетических установок, их экономической и экологической целесообразности, а также разработать рекомендации по их внедрению и эксплуатации.

Задачами, подлежащими решению в рамках настоящей работы, являются:

- 1) Анализ текущего состояния биоэнергетических технологий;
- 2) Разработка и оптимизация модели биоэнергетической установки;
- 3) Исследование энергетического баланса установки;
- 4) Экономический анализ и оценка окупаемости проекта;
- 5) Разработка рекомендаций по использованию БЭУ.

Методика исследований. В диссертации использованы современные методы анализа и моделирования, что обеспечивает высокую достоверность

и обоснованность полученных результатов. Все выводы логично вытекают из проведенного исследования и подкреплены результатами экспериментальных и теоретических исследований.

Практическая ценность работы. Разработаны перспективные структурные схемы.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедре «Энергетики» в Satbayev University.

По теме диссертации Опубликовано статья в научный журнал «Вестник КазАТК» Том 130 № 1 (2024) на тему «Обзор перспективных технологических решений по использованию биогаза». Опубликовано статья в Научный журнал «Journal of Energy, Mechanical Engineering and Transport» №1(2) (2024) на тему «Перспективы биоэнергетики в Казахстане».

В целом магистерская диссертационная работа Калымова Калымжана Баглановича выполнена на высоком научном уровне и заслуживает высокой оценки. Результаты работы представляют значительный интерес для развития биоэнергетики в сельскохозяйственном секторе Казахстана и могут способствовать продвижению устойчивых энергетических решений в регионе.


Магистерская диссертационная работа выполнена на должном научном уровне, содержит результаты решения поставленной научной проблемы, удовлетворяет квалификационным требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, работа оценивается на «отлично» (95%) и может быть допущено к защите для присуждения квалификации и соискания академической степени магистра техники и технологии по специальности 7М07113 – Электротехника и энергетика.

Рецензент:

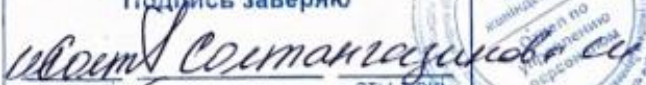
Алматинский университет энергетики

и связи им. Г. Даукеева.

к.т.н., доцент кафедра "ТЭУ"

 Туманов М.Е.

«24» 06 2024 г.

Қолтаңбаны растаймын	
Подпись заверяю	
	
Қызметі	аты-жөні
«24» 06	2024 ж.



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Калымов Калымжан Багланович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование биоэнергетических установок для электро- и теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей

Научный руководитель: Булбул Онгар

Коэффициент Подобия 1: 10.7

Коэффициент Подобия 2: 4.2

Микропробелы: 119

Знаки из других алфавитов: 90

Интервалы: 315

Белые Знаки: 7

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2024-06-14

Дата 13.06.2024г

Омсар В

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Калымов Калымжан Багланович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование биоэнергетических установок для электро- и теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей

Научный руководитель: Булбул Онгар

Коэффициент Подобия 1: 10.7

Коэффициент Подобия 2: 4.2

Микропробелы: 119

Знаки из других алфавитов: 90

Интервалы: 315

Белые Знаки: 7

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, являются законным и не являются плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2024-06-14

Дата

Заведующий кафедрой Энергетики

Сарсебайев Е.А.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра энергетики

Калымов Калымжан Багланович

Исследование биоэнергетических установок для электро- и теплоснабжения
сельскохозяйственных потребителей

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Специальность 7М07113 – Электротехника и энергетика

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Каззахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

УДК 681.5

На правах рукописи


Калымов Калымжан Багланович

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ


На соискание академической степени магистра

Название диссертации Исследование биоэнергетических установок для электро- и
теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей
Направление подготовки Специальность 7М07113 – Электротехника и энергетика

Научный руководитель
PhD, ассоциированный профессор

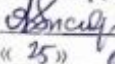
 Онгар Б.
« 24 » 06 2024 г.


Рецензент
Алматынский университет энергетики
и связи им. Г. Даукеева, к.т.н.,
доцент кафедры "ТЭУ"

 Туманов М.Е.
« » 2024 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНИТУ им.К.И.Сатпаева»
Институт энергетики
и машиностроения

Нормоконтроль
Магистр, старший преподаватель

 Бердибеков А.О.
« 25 » 06 2024 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедры, PhD,
ассоциированный профессор
кафедры «Энергетика»
 Сарсембаев Е.А.
« 25 » 06 2024 г.

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»


Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

7M07113 – Электротехника и энергетика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедры, PhD,
ассоциированный профессор
кафедры «Энергетика»

 Е. А. Сарсенбаев
« 25 » 01 2024 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту К. Б. Калымову.

Тема «Исследование биоэнергетических установок для электро- и теплоснабжения
сельскохозяйственных потребителей»

Утвержден приказом ректора Университета от «23» 11.2022 г. ^{408- А/Б}

Срок сдачи законченной работы: «25» 06 2024 г.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- описание интенсификации процесса анаэробной био конверсии ;
- расчеты технико-экономического обоснования эффективности биогазовой установки;
- создания модели биоэнергетической установки.

Рекомендуемая основная литература:

1 Kovalev, A.A. The synergistic effect of the thickened digestate treatment in the vortex layer apparatus prior to its recirculation into the reactor on the characteristics of anaerobic bioconversion of organic waste, *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020.

2 Appels L, Baeyens J, Degr'ève J, Dewil R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge/L. Appels, J. Baeyens, J. Degr'ève, R. Dewil // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2018. – 34. – p.755–81.





3 Li, K. Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations/K. Li, R.H. Liu, C. Sun // *Bioresource Technology*. – 2015. – 198. – p.133–140.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Анализ способов интенсификации процесса анаэробной био конверсии	20 мая 2023 г.	нет
Расчетные данные технико-экономического обоснования биогазовой установки	10 февраля 2024 г.	нет
Разработка модели биоэнергетической установки	20 мая 2024 г.	нет

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Анализ способов интенсификации процесса анаэробной био конверсии	Ph.D., ассоциированный профессор кафедры «Энергетика» Б. Онгар	24.06.2024	
Расчетные данные технико-экономического обоснования биогазовой установки	Ph.D., ассоциированный профессор кафедры «Энергетика» Б. Онгар	24.06.2024	
Разработка модели биоэнергетической установки	Ph.D., ассоциированный профессор кафедры «Энергетика» Б. Онгар	24.06.2024	
Нормоконтролер	Магистр, старший преподаватель А. О. Бердибеков	25.06.2024	

Научный руководитель


подпись

Б. Онгар

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

К. Б. Калымов

Дата

« 24 » 06. 2024 г.

АНДАТПА

Бұл диссертациялық жұмыс ірі қара малдың қиын пайдалана отырып биоэнергетикалық қондырғының тиімділігін кешенді зерттеуге арналған. Жұмыста электр энергиясының тұтынуы, жылулық шығындар және экономикалық тиімділік сияқты әртүрлі факторлар ескерілді. Энергетикалық теңгерімді оңтайландыру әдістері әзірленіп, артық электр энергиясы мен жылулық шығындарды есептеу арқылы жүйенің жалпы тиімділігін арттыруға мүмкіндік берді. Сондай-ақ, капиталдық және пайдалану шығындарын, артық электр энергиясын сатудан жылдық табысты және қондырғының өзін-өзі ақтау мерзімін есептеу арқылы техникалық-экономикалық талдау жүргізілді.

АННОТАЦИЯ

Данная диссертационная работа посвящена комплексному исследованию эффективности биоэнергетической установки, использующей навоз крупного рогатого скота (КРС). В работе учтены различные факторы, такие как потребление электрической энергии, тепловые потери и экономическая эффективность. Разработаны и предложены методики оптимизации энергетического баланса установки, включая расчет избыточной электроэнергии и тепловых потерь, что позволяет значительно повысить общую эффективность системы. Также был выполнен технико-экономический анализ, включающий расчет капитальных и эксплуатационных затрат, годовой выручки от продажи избытка электроэнергии и срока окупаемости установки.

ANNOTATION

This dissertation focuses on a comprehensive study of the efficiency of a bioenergy plant utilizing cattle manure and agro-industrial waste. Various factors such as electricity consumption, heat losses, and economic efficiency were taken into account. Methods for optimizing the energy balance of the plant were developed and proposed, including the calculation of excess electricity and heat losses, which significantly improves the overall efficiency of the system. Additionally, a detailed techno-economic analysis was conducted, including the calculation of capital and operating costs, annual revenue from the sale of excess electricity, and the payback period of the plant.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Теоретические основы и анализ современных биоэнергетических технологий	11
1.1 Потенциал анаэробного метаногенного сбраживания в Казахстане	11
1.2 Зарубежный потенциал анаэробного метаногенного сбраживания	13
1.3 Способы интенсификации процесса анаэробной биоконверсии путем предварительной обработки биомассы	18
1.4 Способы интенсификации процесса анаэробной биоконверсии путем применения микробной электролизной ячейки в биореакторах	20
2 Состояние биоэнергетики Казахстана	22
3 Энергетический баланс биоэнергетической установки	32
3.1 Применение термофильного температурного режима	43
3.2 Применение микробной электролизной ячейки	45
4 Экспериментальные исследования анаэробной биоконверсии	46
5 Моделирование биоэнергетической установки	51
5.1 Создание 3D модели	51
5.2 Создание сетки (Mesh)	52
5.3 Ввод данных в ПО Ansys	53
5.4 Результаты моделирования	54
6 Техничко-экономическое обоснование эффективности использования БЭУ	58
Заключение	60
Список использованной литературы	61
Приложение А	65
Приложение Б	66
Приложение В	67

ВВЕДЕНИЕ

Установка биоэнергетических установок в сельскохозяйственных районах Казахстана является важным шагом на пути к устойчивому развитию и экологической безопасности. Одним из ключевых преимуществ таких установок является значительное снижение выбросов парниковых газов, таких как CO₂, что играет важную роль в борьбе с глобальным изменением климата. Кроме того, биоэнергетические установки способствуют эффективной утилизации сельскохозяйственных отходов, что не только уменьшает объемы мусора, но и улучшает экологическую ситуацию в регионах.

Биоэнергетика основана на использовании возобновляемых ресурсов, таких как биомасса, в отличие от ископаемых видов топлива. Это делает биоэнергетику устойчивым и долговременным источником энергии. Экономические преимущества установки биоэнергетических систем включают снижение затрат на электро- и теплоснабжение для сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. Особенно это актуально для удаленных районов, где доступ к традиционным источникам энергии может быть ограничен и дорогостоящ.

Развитие биоэнергетики способствует созданию новых рабочих мест в сельской местности, что положительно влияет на социально-экономическое развитие регионов. Использование местных ресурсов биомассы снижает зависимость от импорта топлива, повышая энергетическую безопасность страны и ее экономическую независимость.

Актуальность темы научно-исследовательской работы. Внедрение биоэнергетических установок также улучшает качество жизни в сельских районах за счет надежного и устойчивого энерго- и теплоснабжения. Это способствует предотвращению миграции населения в города, сохраняя сельские сообщества и поддерживая их развитие. Местное производство энергии укрепляет локальную энергосистему и снижает зависимость от внешних поставок. Технологические преимущества биоэнергетики включают использование инновационных технологий переработки биомассы, что стимулирует научно-технический прогресс и повышает общую эффективность энергоустановок. Современные биоэнергетические системы обладают высокой надежностью и эффективностью, делая их привлекательными для широкого применения.

Объектом исследования являются биоэнергетические установки, предназначенные для выработки электро- и тепловой энергии из биомассы в сельскохозяйственных районах Казахстана. Основное внимание уделяется практическому применению этих установок в условиях Казахстана, с учетом специфики сельскохозяйственного производства и доступности ресурсов биомассы. Таким образом, исследование направлено на выявление и оценку

факторов, влияющих на эффективность и устойчивость биоэнергетических установок, а также на разработку стратегий их успешного внедрения и эксплуатации в сельскохозяйственных районах Казахстана.

Научная новизна научно-исследовательской работы. Заключается в комплексном исследовании эффективности биоэнергетической установки, использующей навоз крупного рогатого скота (КРС), с учетом различных факторов, таких как потребление электрической энергии, тепловые потери и экономическая эффективность. Впервые разработаны и предложены методики для оптимизации энергетического баланса установки, включая расчет избыточной электроэнергии и тепловых потерь, что позволяет значительно повысить общую эффективность системы. В работе представлена уникальная адаптация метантенка полного смешивания для работы в холодных климатических условиях, что является актуальным для сельскохозяйственных регионов Казахстана. Впервые выполнен детальный технико-экономический анализ с расчетом капитальных и эксплуатационных затрат, годовой выручки от продажи избытка электроэнергии и срока окупаемости установки, что позволяет дать рекомендации по внедрению и эксплуатации биоэнергетических установок в сельскохозяйственных хозяйствах. Также предложена эффективная система утилизации агропромышленных отходов, включая навоз и осадок сточных вод с мясоперерабатывающих предприятий, что способствует улучшению экологической обстановки и повышению экономической выгоды от использования биоэнергетических технологий.

Цель данной работы – комплексная оценка эффективности и перспектив использования биоэнергетических установок для электро- и теплоснабжения сельскохозяйственных районов Казахстана. Для достижения этой цели необходимо провести детальный анализ технологий биоэнергетических установок, их экономической и экологической целесообразности, а также разработать рекомендации по их внедрению и эксплуатации.

Задачи исследования:

- 1) Анализ текущего состояния биоэнергетических технологий;
- 2) Разработка и оптимизация модели биоэнергетической установки;
- 3) Исследование энергетического баланса установки;
- 4) Экономический анализ и оценка окупаемости проекта;
- 5) Разработка рекомендаций по использованию БЭУ.

Методика проведения исследования. Методы исследования установки биоэнергетических установок включают комплексный подход, сочетающий теоретические и экспериментальные методы для получения объективных и всесторонних данных. Первым этапом является анализ научной литературы и статистических данных, что позволяет изучить текущий уровень развития технологий биоэнергетики и существующий опыт их применения в различных

регионах мира и Казахстана. Этот методологический подход помогает определить наиболее перспективные технологии и адаптировать их к условиям сельскохозяйственных районов Казахстана. Исследование включает в себя несколько ключевых задач. Во-первых, необходимо провести анализ существующих технологий биоэнергетических установок с целью выявления их преимуществ и недостатков в контексте использования в сельскохозяйственных районах Казахстана. Во-вторых, требуется оценить потенциал использования биомассы, проанализировав доступные ресурсы биомассы, включая сельскохозяйственные отходы, древесные отходы и другие органические материалы, пригодные для использования в биоэнергетических установках.

В программном обеспечении «Ansys», создать модель и проанализировать характеристики биоэнергетической установки. Далее, следует провести экономический анализ, включающий оценку затрат на установку, эксплуатацию и техническое обслуживание биоэнергетических систем, а также анализ экономической целесообразности их внедрения в сравнении с традиционными источниками энергии, с расчетом срока окупаемости и потенциальной экономии средств.

Экспериментальные исследования являются ключевым компонентом методологии. Они включают в себя изучение биоэнергетических установок в программном обеспечении.

Для оценки экономической целесообразности используются методы экономического анализа, включающие расчет затрат на установку, эксплуатацию и техническое обслуживание биоэнергетических установок. Этот анализ также охватывает оценку экономических выгод, таких как снижение затрат на энергию и сокращение расходов на утилизацию отходов. Особое внимание уделяется расчету срока окупаемости инвестиций и потенциальной экономии средств.

Практическая ценность. Технологические преимущества биоэнергетики включают использование инновационных технологий переработки биомассы, что стимулирует научно-технический прогресс и повышает общую эффективность энергоустановок. Современные биоэнергетические системы обладают высокой надежностью и эффективностью, делая их привлекательными для широкого применения. Казахстан обладает значительными ресурсами биомассы, включая сельскохозяйственные отходы, которые могут быть эффективно использованы для производства энергии. Разработка государственной программы поддержки биоэнергетики может значительно ускорить развитие этого сектора, привлечь инвестиции и способствовать внедрению передовых технологий. Международное сотрудничество также играет важную роль, так как опыт и технологии других стран могут быть адаптированы для условий Казахстана, ускоряя процесс внедрения биоэнергетических установок.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедре «Энергетики» в Satbayev University.

Публикации. Опубликовано в научный журнал «Вестник КазАТК» Том 130 № 1 (2024) на тему «Обзор перспективных технологических решений по использованию биогаза». Опубликовано в Научный журнал «Journal of Energy, Mechanical Engineering and Transport» №1(2) (2024) на тему «Перспективы биоэнергетики в Казахстане».

Глава 1. Теоретические основы и анализ современных биоэнергетических технологий

В данной главе представлены потенциал биоэнергетики, способы метаногенного сбраживания и способы интенсификации.

1.1 Потенциал анаэробного метаногенного сбраживания в Казахстане

В Казахстане, подавляющая часть органических отходов, которые могли бы быть использованы для получения ценных продуктов, до сих пор не перерабатывается. Твердые коммунальные отходы (ТКО) и уплотненные осадки сточных вод (ОСВ) в основном захораниваются на полигонах. Навоз и помет часто бесконтрольно складываются на заброшенных полях и сливаются в гигантские искусственные котлованы — «навозохранилища». В Казахстане ежегодно образуется значительное количество органических отходов, значительная часть которых происходит из сельскохозяйственного сектора. Примерно 80% всех отходов сельского хозяйства составляют отходы животноводства и птицеводства.

Для городских ТКО в Казахстане характерно высокое содержание органических компонентов, до 50-60%, из которых не менее половины представлены легко биodeградируемыми пищевыми отходами, которые могут быть переработаны в удобрения и биогаз. Большая часть энергии кормов переходит в отходы животноводства и птицеводства и может быть возвращена путем переработки их в удобрения. При захоронении, вывозе и бесконтрольном складировании органических отходов происходит отчуждение больших территорий, которые, вследствие отсутствия изоляции, распространяют загрязнения на гораздо более обширные площади. Это приводит к долгосрочному негативному локальному влиянию на экологию, загрязнению поверхностных водоемов и грунтовых вод, и, соответственно, на здоровье населения. Также происходит потеря органического вещества, которое может быть использовано для улучшения качества почв, и глобально значимая эмиссия в атмосферу парникового газа — метана, который может быть использован как сырье для производства энергии.

В крупных городах Казахстана, таких как Алматы и Нур-Султан, существуют значительные проблемы с управлением ТКО и полигонов. Площади полей, загрязненных органическими отходами, включая отходы животноводства и птицеводства, в Казахстане значительны. Альтернативой утилизации органических отходов на полигонах, полях и в котлованах является переработка текучих органических отходов в анаэробных биореакторах, изолированных от

окружающей среды, и твердых отходов методом аэробного компостирования в горизонтальных буртах или вертикальных компостирующих установках.

В развитых странах большое внимание уделяется переработке органических отходов агропромышленного комплекса и оптимизации агротехники с целью замещения дорогостоящих и небезопасных химических удобрений возобновляемыми органическими. В большинстве случаев используются классические технологии анаэробной ферментации жидких и полужидких отходов и компостирования твердой фракции, которые постоянно совершенствуются. В Казахстане разработки новых технологий ведутся точечно и малыми силами. Задача ускоренной, ресурсосберегающей переработки органических отходов для получения высококачественных целевых продуктов (биогаз, биоудобрение) с использованием отечественной технологии и оборудования на сегодня в Казахстане является нерешенной проблемой.

Согласно данным Агентства по статистике Республики Казахстан, общее поголовье скота и птицы в стране составляет значительные цифры, с миллионами голов крупного рогатого скота, свиней, овец и коз, а также сотнями миллионов голов птицы. Производство электроэнергии и тепла из отходов животноводства экономически целесообразно на крупных фермах, где поголовье составляет более 500 голов крупного рогатого скота, от 1000 до 2000 голов свиней и коз и от 50 до 100 тысяч голов кур-несушек и бройлеров соответственно.

Энергетический потенциал отходов животноводства в Казахстане велик. Однако фактическое использование биоэнергетического потенциала животноводства в стране ранее не оценивалось. Сегодня биогазовые установки в Казахстане расположены в основном в южных и центральных регионах страны. В настоящее время общая мощность биогазовых установок в Казахстане невелика, что создает серьезные проблемы для сельского хозяйства и окружающей среды.

Многие сельскохозяйственные предприятия в Казахстане имеют небольшие емкости для хранения отходов животноводства и часто не имеют сельскохозяйственных земель, в результате чего количество отходов животноводства превышает их вместимость. В результате фермерские хозяйства вынуждены вывозить отходы животноводства на неподготовленные участки, где они загрязняют прилегающие воды и земли и вызывают конфликты с местными жителями и регулирующими органами. С ростом поголовья скота на сельскохозяйственных предприятиях будет производиться больше отходов животноводства.

По оценкам, общий технический биоэнергетический потенциал Казахстана значителен. Остатки сельскохозяйственных культур составляют основную часть биоэнергетического потенциала страны, в то время как меньшие доли составляют ТКО, отходы лесного хозяйства и отходы животноводства. Для полного использования ресурсов органических отходов в Казахстане необходима

стратегия, основанная на точной оценке технического потенциала органических отходов и их пространственного распределения.

Сегодня используется только небольшая часть биоэнергетического потенциала Казахстана. Больше всего используется потенциал лесных остатков. Потенциал ТКО и осадка сточных вод используется в меньшей степени. Использование сельскохозяйственных отходов относительно невелико, несмотря на наибольший потенциал, продемонстрированный этой отраслью.

Для того чтобы в полной мере использовать ресурсы органических отходов в Казахстане, необходима стратегия, основанная на наиболее точной оценке технического потенциала органических отходов и их пространственного распределения. Оценка потенциала органических отходов, пригодных для производства биогаза, ранее проводилась с использованием статистических данных. В настоящее время большинство ТКО в Казахстане хранится на полигонах, небольшая часть сжигается и компостируется.

Несмотря на наличие в Казахстане ряда программ развития и реконструкции полигонов ТКО, большинство из них не соответствуют современным стандартам. В Казахстане также существует несколько крупных предприятий по получению биогаза из осадка сточных вод, работающих на очистных сооружениях крупных городов.

Таким образом, в настоящее время фактическое использование органических отходов, потенциально пригодных для производства биогаза, в Казахстане на 2-3 порядка ниже, чем имеющийся потенциал. Сегодня одна из основных проблем казахстанских сельскохозяйственных и пищевых предприятий — это утилизация органических отходов. Ежегодно в Казахстане образуется значительное количество органических отходов, из которых большая часть — отходы животноводства. Эти отходы часто накапливаются возле хозяйств, что приводит к закислению почв, отчуждению сельскохозяйственных земель, загрязнению подземных вод и выбросам парниковых газов в атмосферу.

Из всего вышесказанного легко понять, что одним из самых перспективных направлений исследований в Казахстане сегодня являются проекты, связанные с использованием биогазовых технологий. Инвестиции в эти проекты становятся все более привлекательными по многим причинам, таким как производство чистой энергии, производство органических удобрений из сточных вод, образующихся в процессе сбраживания, и безопасное удаление органических отходов с очевидным экологическим преимуществом, таким как снижение загрязнения поверхностных и грунтовых вод, и выбросов парниковых газов.

1.2 Зарубежный потенциал анаэробного метаногенного сбраживания

Ископаемые виды топлива (уголь, нефть, газ) привели к промышленной революции, которая косвенно вызвала одновременный технологический, экономический и социальный прогресс, но отрицательно повлияла и продолжает влиять на окружающую среду, например, изменение климата [1]. Таким образом, в настоящее время для сокращения использования ископаемого топлива разработка и использование возобновляемых источников энергии стали основным компонентом устойчивых глобальных энергетических стратегий [2]. Возобновляемые технологии производят электроэнергию, тепло или механическую энергию с использованием биомассы (энергетические культуры, сельскохозяйственные или лесные отходы, биогенные бытовые отходы и т. д.), ветра, солнечной энергии (тепловая и фотоэлектрическая), гидроэнергии (речной поток, приливы, волны) и геотермальной энергии.

Во всем мире растет понимание того, что внедрение технологии так называемые «из отходов в энергию» является одним из лучших способов достижения устойчивого развития энергетики. Самый популярный подход - преобразование богатых органическими веществами соединений в чистые и возобновляемые продукты путем анаэробного метаногенного сбраживания (МС). Биогаз можно производить из сельскохозяйственных остатков, городских / промышленных биоотходов и устойчивой биомассы, особенно из материалов, доступных на местном уровне. Однако во многих случаях выходы метана, полученные с помощью обычного процесса МС, считаются имеющими ограниченную рентабельность [3].

Таким образом, существует потребность в унификации методов, применяемых для интенсификации и управления процессом анаэробной биоконверсии, режимов и параметров, используемых для преобразования энергии органических отходов (биомассы) в энергию, пригодную для использования в хозяйстве. Синхронизированная методология также необходима для понимания экологических преимуществ и недостатков выбранных способов использования при производстве энергии из органических отходов. В настоящее время недооцененный потенциал анаэробного метаногенного сбраживания (МС) вызывает растущий интерес, и предварительная обработка исходного субстрата (органических отходов) может напрямую повысить эффективность этой технологии и привести к ее оптимизации [3].

В Директиве о возобновляемых источниках энергии поставлена цель, чтобы в Европейском Союзе (ЕС) вышеупомянутые источники должны составить 20% от общего количества источников конечного потребления энергии к 2020 году [4,5].

Согласно данным Евростата, в 2019 году доля возобновляемых источников энергии в общем конечном потреблении энергии в ЕС составила 19,73% (в сравнении с 8,5% в 2004 году). При этом национальные цели по достижению уровня в 20% уже были достигнуты в 14 из 27 стран-членов ЕС, тогда как такие

страны, как Польша, Словения, Франция и Нидерланды, все еще далеки от их выполнения. Во всем мире доля возобновляемых источников энергии в общем конечном потреблении также выросла и составила 10,6%: тепловая энергия - 4%, гидроэнергетика - 3,6%, энергия ветра и солнца - 2%, биотопливо для транспорта - 1%. На ядерную энергию и ископаемое топливо пришлось 2,2% и 79,7% соответственно, а оставшиеся 7,5% приходились на биомассу, традиционно используемую для приготовления пищи и отопления в развивающихся странах. В 2018 году, в связи с ростом мировой экономики и увеличением потребности в охлаждении и отоплении, общий спрос на энергию увеличился на 2,3%, что стало самым значительным увеличением за последнее десятилетие. Основной рост спроса на энергию пришелся на Китай, США и Индию, которые вместе составили почти 70% от общего увеличения. В Европе же, несмотря на экономический рост, спрос вырос лишь на 0,2%, благодаря повышению энергоэффективности [6].

Международное энергетическое агентство (МЭА) отмечает, что на данный момент используется лишь малая часть потенциала энергии биомассы. В 2018 году в мире было произведено 35 миллионов тонн биогаза и биометана (в нефтяном эквиваленте), тогда как их полный потенциал составляет 570 и 730 миллионов тонн соответственно.

Стратегия ЕС «Зеленый курс» предусматривает ключевую роль возобновляемых газов в достижении климатически нейтральных целей к 2050 году. Для этого необходимы институциональная поддержка и благоприятные условия для увеличения доли возобновляемых газов. В 2018 году была принята Директива Европейского парламента и Совета по продвижению использования энергии из возобновляемых источников, устанавливающая обязательную цель ЕС по общей доле возобновляемых источников энергии в валовом конечном потреблении к 2030 году. В документе также прописаны правила финансовой поддержки использования энергии в транспортном секторе и регионального сотрудничества между государствами-членами и другими странами. Особое внимание уделено необходимости сокращения выбросов парниковых газов за счет использования биотоплива, биожидкостей и топлива из биомассы в рамках стратегии устойчивого развития [7].

В 2020 году МЭА опубликовало отчет, указывающий на значительный неиспользованный потенциал органических отходов и устойчивой биомассы для производства чистой энергии. Эти ресурсы, в сочетании с биоэнергетикой и технологиями улавливания и хранения углерода, играют важную роль в достижении климатической нейтральности ЕС наряду с ветровой и солнечной энергией.

Несмотря на богатое наследие и потенциал, многокомпонентные системы (МС) используются менее чем на 2,5% от своего потенциала, несмотря на поддерживающие законодательные положения и финансовые инструменты для

ЕС и других стран [8].

Было доказано, что биогазовая технология имеет некоторые преимущества для окружающей среды и может помочь в решении экологических проблем. Этот процесс позволяет обрабатывать и повторно использовать различные отходы жизнедеятельности человека, животных, сельского хозяйства, промышленности и быта, а также побочные потоки. МС, которое в значительной степени зависит от отходов и побочных потоков, обеспечивает низкую стоимость сырья и максимальное снижение эмиссии парниковых газов. В этой области очень важно увеличить поток пищевых остатков, которые могут быть переработаны через МС, в дополнение к производству метана, переносящего питательные вещества обратно в почву с эффлюентом. Обратите внимание, что по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), одна треть всех продуктов питания, производимых для потребления человеком, выбрасывается в отходы (примерно 1,3 миллиарда тонн пищевых отходов в год). МС пищевых и других органических отходов увеличивает доступность азота и фосфора, что может быть особенно полезно в органическом сельском хозяйстве и может ограничивать использование неорганических удобрений. МС может также уменьшить запахи и количество потенциальных патогенов [9]. Следовательно, эффлюент, вносимый в поле, более безопасен с точки зрения санитарии, чем, например, необработанная суспензия, используемая в качестве удобрения.

Отходы животноводства в основном состоит из органического вещества, которое можно использовать в качестве субстрата для производства биоэнергии. Авторами исследования был рассчитан потенциал рекуперации энергии [10].

Концентрация сухого вещества (СВ) была одним из основных факторов, влияющих на получение биогаза. Различные типы отходов животноводства имеют разные уровни СВ, и, следовательно, эффективность преобразования в биогаз для каждого типа отходов животноводстватакже различается [11].

Таким образом, потенциальное производство биогаза из отходов навоза крупного рогатого скота, свиней, овец и птицы составляло $59,4 \times 10^9$; 102×10^9 ; $36,0 \times 10^9$ и $49,6 \times 10^9$ м³ в 2017 году соответственно. Свиной навоз был самым крупным потенциальным источником биогаза, составляя 41,41% от общего количества.

Когда были объединены данные о растениеводстве и животноводстве, стало ясно, что производство биогаза связано со структурой сельскохозяйственной отрасли.

Тремя китайскими провинциями с наибольшим потенциалом производства биогаза были Шаньдун, Хэнань и Сычуань. Сычуань производит большое количество сельскохозяйственных культур, а также наибольшее поголовье свиней. Хэнань, расположенный в долине Хуанхэ, имел самый высокий уровень механизации сельского хозяйства в Китае. Кроме того, в провинции Хэнань было

70 основных животноводческих районов, больше всего в стране. Шаньдун был не только районом крупного свиноводства и птицеводства, но и крупным районом производства зерна. Производство сельскохозяйственной продукции было самым высоким в Шаньдуне, что дало этой провинции очевидное преимущество в отношении кормов. Кроме того, поддерживающая государственная политика Шаньдуна привлекла многие сельскохозяйственные компании, и, таким образом, потенциал рекуперации энергии в этой провинции был наибольшим [12].

Энергетический потенциал биогаза зависит от содержания в нем метана. В исследовании [13] авторы приняли температуру метанового сбраживания (МС) равной 35 °С. Предыдущие исследования показали, что содержание метана в биогазе, полученном из навоза крупного рогатого скота, свиней, овец и птицы, составляло $64 \pm 5\%$, $60 \pm 5\%$, $60 \pm 5\%$ и $70 \pm 5\%$ соответственно [14].

Основываясь на уравнении, энергетический потенциал отходов животноводства составлял 5740 – 6730 ПДж, что примерно эквивалентно 213×10^6 тонн стандартного угля, 149×10^6 тонн сырой нефти или 161×10^9 м³ природного газа. В 2017 году общее потребление энергии в Китае составило $4,49 \times 10^9$ тонн стандартного угля, из которых на уголь, нефть, природный газ и гидроэнергетику приходится 60,4%, 18,8%, 7% и 8% соответственно. Таким образом, биогаз из отходов животноводства в идеальном случае мог бы удовлетворить 4–5% годового спроса на энергию или 37% бытового потребления только в повседневной жизни, что указывает на то, что биогаз можно рассматривать как стабильный и надежный источник энергии для дома. В Германии тепловая энергия, вырабатываемая биогазом, составляет примерно 1,4% от общего потребления энергии [15].

По оценкам, Бразилия обладает огромным потенциалом в производстве электроэнергии из биогаза из различных органических отходов. Ежегодно в энергетическую матрицу может добавляться около 1 ГВт [16].

Это производство энергии может быть важной альтернативой для фермеров, но необходимо оценить техническую и экономическую осуществимость распределенного предприятия по производству микрогенераторов.

Электроэнергия, произведенная из биогаза в распределенной генерации или в качестве первичного источника энергии, была предметом многих исследований, в ходе которых анализировался ее потенциал и осуществимость из различных источников [17].

Согласно исследованиям в Бразилии нет согласованного определения того, что определяет распределенную генерацию и чем она отличается от традиционной генерации. Некоторые общие атрибуты: не планируются централизованно (коммунальным предприятием), не распределяются централизованно, обычно подключаются к системе распределения на стороне клиента.

ANEEL (Бразильское агентство по регулированию электроэнергетики)

рассматривает распределенную микрогенерацию как электростанцию, использующую гидро-, солнечную, ветровую, биомассу или квалифицированную когенерационную энергию, подключенную к распределительной сети через объекты потребителей с установленной мощностью до 100 кВт [18].

1.3 Способы интенсификации процесса анаэробной биоконверсии путем предварительной обработки биомассы

Интерес к МС органических отходов сельскохозяйственного производства в настоящее время значительно возрос почти во всех странах, в связи с дальнейшим ростом мировых цен на нефть и другие виды топлива. Отсюда следует, что в качестве первоочередных задач является создание технологических линий, работающих в интенсивном режиме с максимальной энергетической отдачей, и разработка универсального проекта биогазовой станции, которую при незначительных изменениях и дополнениях можно было бы осуществить в любом регионе, например, в условиях России, этого обязывает наличие широкого диапазона климатических поясов.

В настоящее время исследования, направленные на повышение эффективности процесса анаэробной переработки навозных стоков, сосредоточены на следующих ключевых направлениях:

- анализ процесса брожения органических отходов с высокой концентрацией твёрдых веществ, достигающей 30-50%;
- многоступенчатое анаэробное брожение органических отходов, базирующееся на активности кислотогенных и метанообразующих бактерий;
- разработка высокоактивных штаммов микроорганизмов, культивируемых в специализированных установках и добавляемых в метантенк в виде закваски;
- исследование метанового брожения с участием психрофильных бактерий;
- рециркуляция сброженного осадка и применение анаэробных биофильтров в камере метантенка [19].

Оптимизация процесса анаэробного сбраживания навозных стоков в первую очередь заключается в сокращении времени брожения или уменьшении периода нахождения органической биомассы в метантенке. Известно, что доза загрузки метантенка и периодичность брожения органического сырья зависят от следующих параметров:

- температуры технологического процесса брожения и влажности сбраживаемого сырья;
- концентрации органических веществ в сбраживаемом субстрате;
- концентрации ионов водорода (pH) и окислительного и

восстановительного потенциала (ОВП) сбрасываемого субстрата в метантенке;

- технологии загрузки и перемешивания сбрасываемого субстрата (непрерывная или периодическая) [20].

В связи с этим, методы совершенствования процесса анаэробного сбрасывания навозных стоков в метантенках можно условно разделить на следующие виды:

- механическое воздействие на сбрасываемый субстрат (измельчение исходной массы перед загрузкой в метантенк, перемешивание сбрасываемого сырья рециркулирующими газами брожения и рециркуляция осадка;

- биохимические методы воздействия на сбрасываемый субстрат (щелочными агентами, ферментами, добавкой порошкообразного активированного угля, поверхностно-активных веществ);

- термическая и электромагнитная обработка сбрасываемого субстрата;

- микробиологические методы, т.е. иммобилизация метанообразующих микроорганизмов на различных носителях, где бактерии фиксируются на специальных инертных-бактерионосителях, в результате которого достигается повышенная концентрация микроорганизмов в метантенке.

Механическое воздействие, повышающее интенсивность метанового брожения, заключается в предварительной обработке исходного сырья. Твердые материалы, особенно растительного происхождения, следует измельчать с помощью режущих, разрывающих или плющильных устройств. Это позволяет добиться более мелких частиц, что способствует эффективному механическому воздействию. Процесс измельчения исходного материала перед загрузкой и качество его подготовки, а также дозированная и контролируемая подача в реактор, существенно влияют на степень разложения органического вещества и скорость выделения газа. В результате измельчения, например, навоза, получается однородная масса, температура которой на выходе из измельчителя на 6-8°C выше, чем у исходного сырья. Затем измельчённую массу выдерживают при определённых температурных условиях и времени, в течение которых, благодаря активности микроорганизмов, удаляется кислород, снижается окислительно-восстановительный потенциал среды, образуются углеводы, спирты и летучие жирные кислоты. При сбрасывании подготовленного сырья выделение биогаза начинается уже через несколько часов после начала процесса [21].

1.4 Способы интенсификации процесса анаэробной биоконверсии путем применения микробной электролизной ячейки в биореакторах

В последнее время внимание ученых сосредоточено на электрофизическом

воздействии на процесс разложения органических субстратов, включая отходы, что приводит к образованию метана. Интересно, что скорость образования метана значительно возрастает, а его концентрация в биогазе достигает 80-90%. Научные исследования также включают использование электропроводящих материалов в качестве электродов наряду с электростимуляцией [22].

Электрический ток влияет на микроорганизмы, изменяя их метаболизм и воздействуя на среду обитания. Применение электрохимического подхода в различных биотехнологиях способствует увеличению скорости роста микроорганизмов, скорости переработки субстратов и синтеза продуктов, улучшению избирательности синтеза целевых веществ, а также контролю окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и pH. Системы, объединяющие принципы классической биотехнологии и электрохимии, называются биоэлектрохимическими системами. Они управляются с помощью электрического тока, подаваемого на электроды, установленные в биореакторе [23].

Биоэлектрохимические системы (БЭС) сочетают биологическое разложение с электрохимическим окислением на аноде и восстановлением на катоде, обеспечивая постоянное поступление электронов и рост определенных микроорганизмов для выполнения конкретных технологических задач. «Неживая» электрохимия перешла в область биоэлектрохимии. Биоэлектрохимические системы (БЭС) подразделяются на: (1) микробные топливные элементы (МТЭ), которые с помощью микроорганизмов преобразуют энергию химических связей органических веществ в электричество; и (2) микробные электролизные ячейки (МЭЯ), представляющие собой модификацию МТЭ, где с применением электрического напряжения происходит производство продуктов с добавленной стоимостью [25].

В однокамерной микробной электролизной ячейке, функционирующей при атмосферном давлении и pH 7,0, равновесное напряжение составляет 0,123 В. Использование ацетата в качестве субстрата позволяет получать газообразный водород при напряжении всего в 1/10 от равновесного напряжения 1,23 В для электролиза воды. Однако, с учетом перенапряжения и внутреннего сопротивления, для выделения водорода на катоде необходимо приложить небольшое напряжение (обычно в диапазоне от 0,2 В до 1,0 В). Энергозатраты для микробной электролизной ячейки (МЭЯ) составляют приблизительно 0,6 кВт·ч/м³, в то время как для электролиза воды требуется 4,5-5 кВт·ч/м³ [24].

Из-за слабых токов, генерируемых в МТЭ, исследователи чаще предпочитают МЭЯ, где можно получать ценные продукты или удалять загрязнители (например, метан) с помощью дополнительной энергии. Первая метан-продуцирующая микробная электролизная ячейка была задокументирована в 1999 году, когда микроорганизмы, использующие H₂, использовали электрически восстановленный диазиновый краситель

нейтральный красный в качестве единственного донора электронов для синтеза метана из CO₂. Для описания процесса получения метана из CO₂ с использованием биокатода, содержащего метаногены, был введён термин "электрометаногенез". Исследователи изучали влияние различных потенциалов катода (от -0,6 до -1,2 В) в однокамерной микробной электролизной ячейке (МЭЯ) на процесс получения метана из CO₂. Образование метана наблюдалось только при катодных потенциалах выше -0,9 В, при этом на биокатоде преобладала архея *Methanobacterium palustre* [26]. Эти значения катодного потенциала значительно превышали теоретический окислительно-восстановительный потенциал преобразования CO₂ в CH₄ (-0,24 В относительно стандартного водородного электрода (СВЭ)) или CO₂ в ацетат (-0,29 В относительно СВЭ). Эти различия объясняются перенапряжениями на катоде [24]. Ниже представлена блок-схема биоэнергетической установки (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Блок-схема биоэнергетической установки

Глава 2. Состояние биоэнергетики Казахстана

Биоэнергия представляет собой форму энергии, получаемую из биологических источников, таких как сельскохозяйственные культуры, органические отходы и биомасса. Она рассматривается как устойчивая альтернатива традиционным ископаемым топливам, поскольку является возобновляемой и может восстанавливаться за счет выращивания сельскохозяйственных культур или переработки органических отходов. Биоэнергия используется для производства тепла, электричества и транспортного топлива, и её получение осуществляется через такие процессы, как сжигание, анаэробное сбраживание и ферментация. Несмотря на свои преимущества, биоэнергетика сталкивается с такими проблемами, как конкуренция с продовольственными культурами за ресурсы, низкая эффективность преобразования и ограниченная доступность подходящего сырья.

В 2019 году Комитет по вопросам экологии Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан сообщил, что общий объем отходов в стране за 2018 год составил 5,5 миллиона тонн. Из этого объема приблизительно 70-80% отходов являются органическими, так как они включают в себя пищевые отходы, листья, газоны и другие растительные материалы. Однако, стоит отметить, что эти цифры могут меняться из года в год и могут зависеть от различных факторов, таких как население, уровень потребления, промышленное производство и другие.

Экономика Казахстана является одной из крупнейших агропромышленных экономик Центральной Азии с развитым сельскохозяйственным производством, которое генерирует значительные объемы отходов. Большая часть этих отходов используется для мульчирования почвы, в качестве удобрений, кормов для животных и подстилок для скота. Однако значительная часть отходов остается невостребованной. Перспективным направлением использования этих неиспользованных отходов является их преобразование в биоэнергию для отопления, приготовления пищи и выработки электроэнергии. В настоящее время рынок переработки сельскохозяйственных отходов в тепловую энергию в Казахстане практически отсутствует, за исключением нескольких котельных на биомассе, введенных в эксплуатацию в последние два года. Однако интеграция возобновляемых источников энергии в энергетический баланс является ключевым элементом стратегии "зеленой" экономики Казахстана. Преобразование неиспользованных сельскохозяйственных отходов в энергию может значительно увеличить долю возобновляемой энергии. Таким образом, будущее возобновляемой тепловой энергии из сельскохозяйственных отходов обладает значительным потенциалом.

Судя по статистике объемов образованных отходов по видам деятельности от «Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Республики

Казахстан», указанных на рисунках 1 и 2, можно увидеть количество тонн неопасных отходов сельского, лесного и рыбного хозяйства за 2020 и 2021 год. Наглядно видно, что отходов за 2020 год не превышало 25 тысяч тонн. А за 2021 год количество отходов уже превышает 2 миллионных тонн. Это говорит, что сельское и лесное хозяйство растёт, и параллельно растут и отходы. Эти отходы можем использовать для преобразования электроэнергии, с помощью биоэнергетических установок с использованием средств интенсификации анаэробной биоконверсии органических отходов, тем самым компенсировав их (Рисунок 2-3) [27].

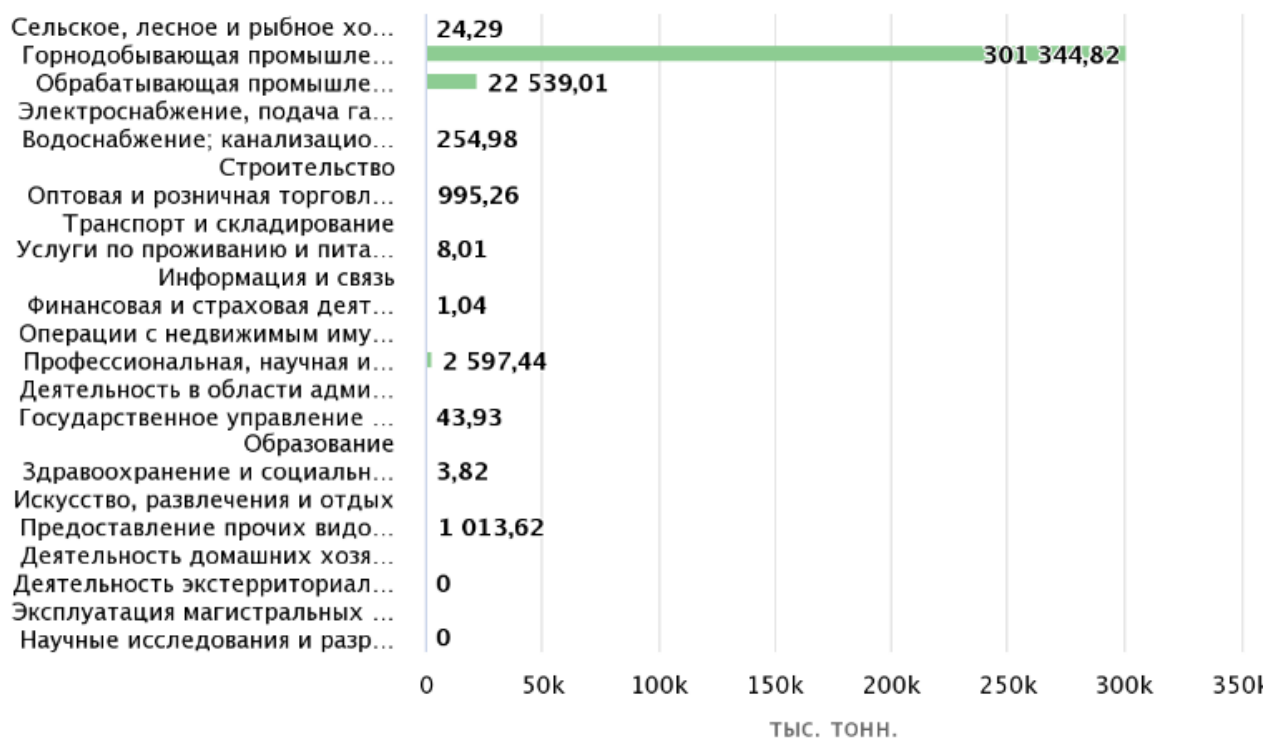


Рисунок 2 – Статистика неопасных отходов в Казахстане за 2020 год

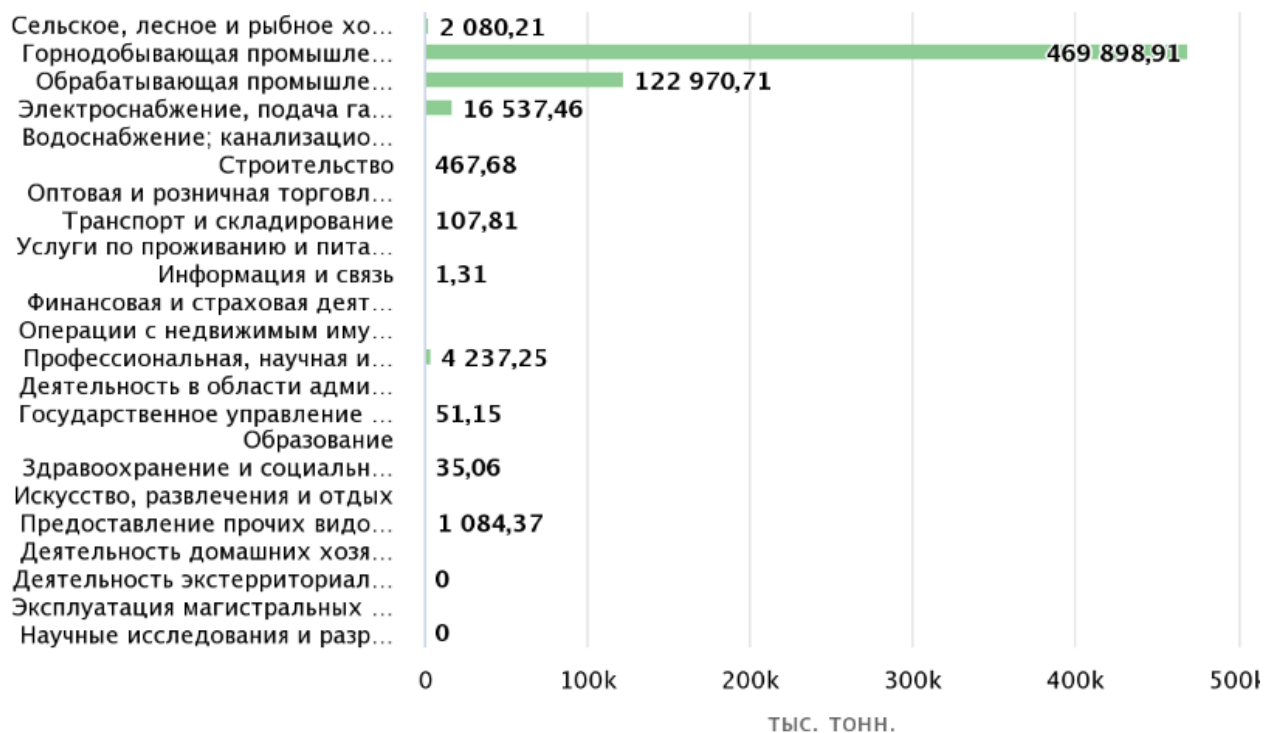


Рисунок 3 – Статистика опасных отходов в Казахстане за 2021 год

В 2019 году ООН ЭСКАТО выпустили отчет, посвященный переходу Казахстана к сценарию зеленой экономики посредством преобразования сельскохозяйственных отходов в биоэнергию.

Сельскохозяйственные отходы включают все органические вещества, остающиеся после сбора урожая и переработки сельскохозяйственных культур, а также органические отходы животноводства.

Основные виды сельскохозяйственных отходов в Казахстане включают:

- Отходы растениеводства, возникающие при сборе и переработке пшеницы, ячменя и сахарной свеклы. К ним относятся стебли, солома, листья, шелуха, жмых, корни и прочее.

- Отходы животноводства, связанные с разведением свиней, коров, лошадей, кур и других животных. В эту категорию входят навозная жижа, навоз, сточные воды животноводства, помет, силос, отходы убоя, остатки подстилок и прочее.

Недавнее исследование под названием «Биоэнергетический потенциал агропромышленного сектора Казахстана» оценило потенциал использования сельскохозяйственных отходов для получения энергии. В отчете рассматривались следующие аспекты:

- Общий объем доступных сельскохозяйственных отходов в Казахстане составляет 5,1 млн тонн сухого вещества. Наибольшая часть приходится на отходы пшеницы (54%) и сахарной свеклы (30%), с ячменем и другими культурами, составляющими по 8%.

- Общий объем доступного навоза в Казахстане составляет около 1,5 млн тонн сухого вещества в год. Доступная часть отходов составляет 17% от общего объема производства. Основная часть навоза поступает от крупного рогатого скота (74%) и птицы (23%), с незначительной долей отходов от свиней (3%).

Предварительная обработка сельскохозяйственных отходов в основном зависит от ресурсов страны, однако такие отходы, как навоз крупного рогатого скота, коров, свиней и птицы, обычно доступны для биогазовых установок. Эта биомасса преимущественно состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина (в различных пропорциях), что делает её устойчивой к микробной деградации и окислению. Поэтому она часто подвергается предварительной обработке, обычно с использованием термической и химической обработки, а также рассматриваются термические и другие механические методы предварительной обработки. Эффективность предварительной обработки лигноцеллюлозной биомассы в основном зависит от содержания лигнина в обрабатываемом материале. Известно, что навоз состоит из лигноцеллюлозных волокон, и его предварительная обработка аналогична обработке энергетических культур и растительных остатков. Негативные эффекты включают образование трудноразлагаемых соединений, особенно в результате высокотемпературной предварительной обработки. Существует также риск образования побочных продуктов разложения сахаров, таких как фурфурол, которые могут увеличить производство биогаза при низких концентрациях (около 1,4 г/л), но при высоких концентрациях (>2 г/л) могут снизить метаногенную активность. Предварительная кислотная обработка, особенно лигноцеллюлозы с высоким содержанием целлюлозы, также может привести к образованию ингибиторов, таких как фураны и фенольные соединения, которые могут подавлять микробную активность.

В Казахстане большая часть сельскохозяйственных отходов используется для мульчирования почвы, удобрения, корма для животных и подстилок для скота. Однако значительная часть этих отходов остаётся неиспользованной, особенно это касается отходов, образующихся при уборке и переработке пшеницы, ячменя и сахарной свеклы, от 30% до 50%. В животноводстве до 80% доступных отходов остаются невостребованными. Одним из перспективных вариантов использования этих оставшихся объемов отходов является их преобразование в биоэнергию для отопления, горячего водоснабжения и производства электроэнергии, а также для чистого приготовления пищи с использованием газа или биогаза. Политика, принятая в Казахстане, гарантирует, что правительство реализует программы развития сектора чистой энергетики и расширяет спектр мероприятий в рамках национальной энергетической политики, разрабатывая концепции чистой энергетики, направленные на переход к зелёной экономике, энергосбережению и повышению эффективности. Тем не менее, в отрасли по-прежнему существуют серьёзные политические,

экономические, технические и рыночные барьеры, препятствующие внедрению технологий преобразования отходов. В докладе приводятся ключевые рекомендации по улучшению состояния сектора:

1) Создание дополнительных инвестиций на государственном уровне для стимулирования национальных программ использования возобновляемых источников энергии, сосредоточив инвестиции на использовании биомассы и сельскохозяйственных отходов, биогазовых технологий, поскольку последние инвестиции в основном были направлены на использование энергии ветра, солнца и воды.

2) Разработка программ стимулирования, предоставляющих гранты и гарантии по кредитам для проектов в области биомассы и биогаза, а также программ по энергоэффективности, специально предназначенных для заинтересованных сторон сельскохозяйственного сектора.

3) Создание специализированных программ устойчивого сельского хозяйства с целью перехода на чистую энергию и минимизации отходов, чтобы мотивировать фермы переводить свои системы отопления и энергоснабжения на использование сельскохозяйственных отходов и биомассу вместо ископаемого топлива.

Крупные и средние фермы могут преобразовывать свои отходы с помощью проверенных технологических решений, например, сжигания биогаза, в полезную энергию, такую как возобновляемый газ, электричество и тепло. Типичная крупная или средняя ферма, которая имеет крупный рогатый скот и/или сельскохозяйственные угодья, обладает достаточным объёмом неиспользованных отходов, которые могут быть преобразованы в полезную энергию, покрывая 50-70% потребности в электричестве, а также большую часть потребности в отоплении технологической тепловой энергией. Фермы могут даже поставлять избыточную тепловую энергию близлежащим сельским зданиям для отопления и горячего водоснабжения при наличии сети централизованного теплоснабжения для распределения энергии, а также поставлять газ для приготовления пищи. Кроме того, дигестат из биогазовых установок может использоваться в качестве биоудобрения и полностью возвращаться в поля.

В рамках проекта Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) по укреплению данных по биоэнергетике для мониторинга ЦУР и ОНУВ в Казахстане с 12 по 25 апреля 2023 года Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан (далее - Бюро) провело выборочное обследование по общегосударственному статистическому наблюдению «Анкета обследования потребления энергии в домашних хозяйствах», которое проводится раз в пять лет. В обследовании приняли участие 11944 домашних хозяйств, из них 6520 в городской местности и 5424 в сельской.

Обследование проводилось во всех областях и городах Астана, Алматы и Шымкент методом опроса при посещении интервьюерами домашних хозяйств. Далее представлены графики, показывающие данные по использованию биоэнергии в городской и сельской местности (Рисунки 4-5) [28].

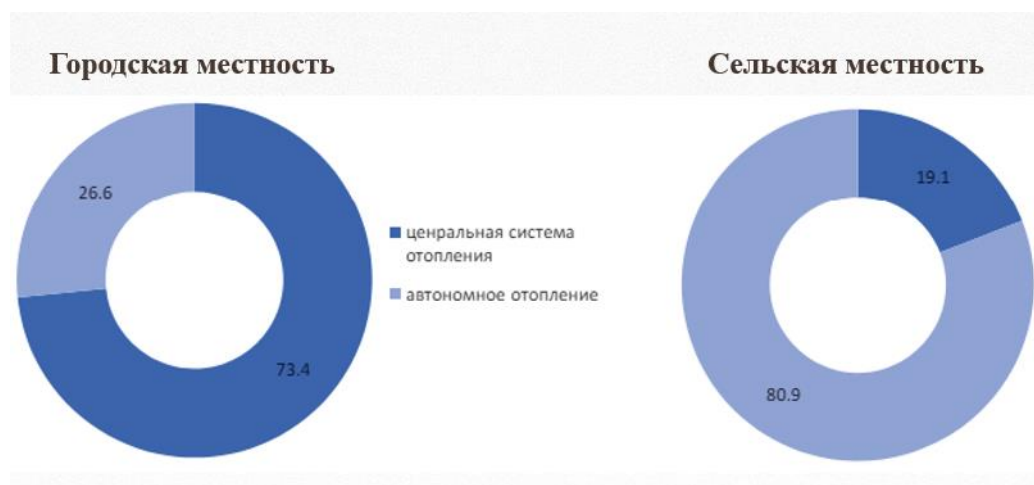


Рисунок 4 – Классификация домашних хозяйств в зависимости от типа установленной системы отопления и местности проживания

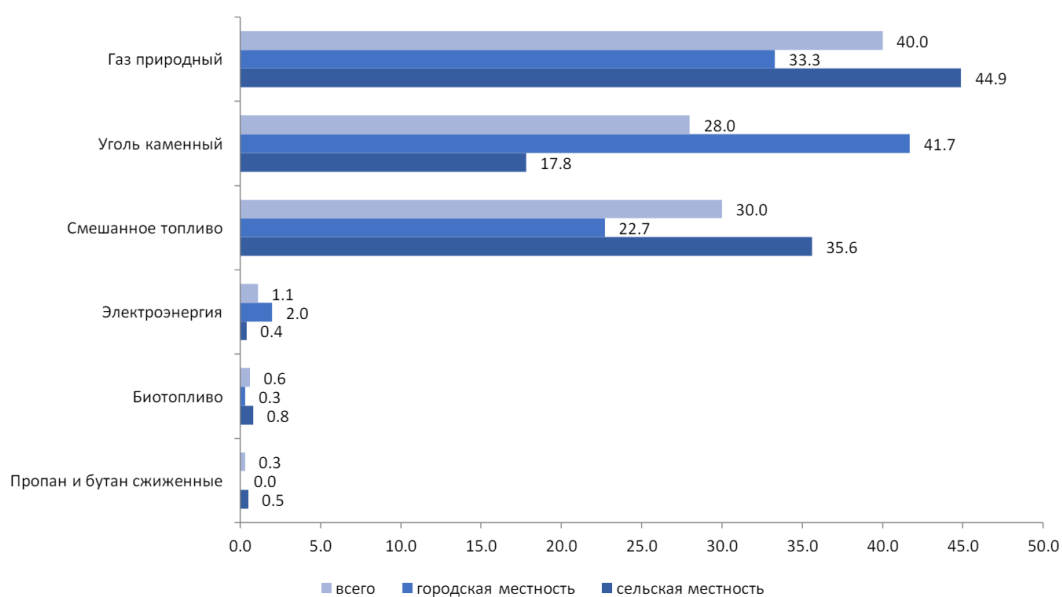


Рисунок 5 – Классификация домашних хозяйств по виду топлива, используемого для автономного отопления, в зависимости от типа местности

Ниже в Таблице 1 показана характеристика благоустройства жилья домашних хозяйств по видам топлива и энергии, потребляемых для нагрева воды за 2022 год.

Таблица 1 – Характеристика благоустройства жилья домашних хозяйств по видам топлива и энергии.

	Всего	В зависимости от типа местности	
		городские районы	сельские районы
Доля домохозяйств, использующих основное оборудование для нагрева воды	53,4	37,1	90,0
в том числе по виду топлива и энергии:			
Уголь каменный	4,4	3,0	5,7
Газ природный	25,3	16,3	33,7
Пропан и бутан сжиженные	1,2	0,9	1,6
Электроэнергия	63,9	74,6	53,9
Биотопливо	1,0	0,1	1,8
Смешанное	4,2	5,1	3,3
Доля домохозяйств, использующих дополнительное оборудование для нагрева воды	49,9	69,0	32,3
в том числе по видам топлива и энергии:			
Уголь каменный	0,5	0,1	1,3
Газ природный	11,1	11,1	11,3
Пропан и бутан сжиженные	6,1	8,7	0,9
Электроэнергия	79,8	76,6	86,2
Биотопливо	2,3	3,4	0,0
Смешанное	0,2	0,1	0,3

Заключение по второй главе. Исходя из данных, можем посмотреть что в Казахстане не популярен один из видов возобновляемых энергии как биотопливо. Использование биотоплива в Казахстане не является популярным по нескольким причинам. Во-первых, Казахстан обладает значительными запасами нефти, природного газа и угля, что обеспечивает страну дешевыми и доступными источниками энергии, снижая экономическую мотивацию для развития и использования биотоплива. Во-вторых, производство биотоплива требует значительных инвестиций в технологии и инфраструктуру, что может быть дорогостоящим. В условиях, когда традиционные виды топлива дешевле, экономически целесообразнее использовать их. Третьей причиной является отсутствие государственной поддержки: развитие биотоплива требует государственной поддержки и субсидий, а также соответствующего законодательства и регулятивной базы. В Казахстане пока недостаточно стимулирующих мер для поддержки этого сектора. Четвертая причина

заключается в технологических барьерах: производство биотоплива требует современных технологий и знаний, которые могут быть недостаточно развиты в Казахстане. Недостаток научных исследований и разработок в области биотоплива также играет свою роль. Пятая причина связана с недостатком осведомленности и образования: мало информированности населения и бизнеса о преимуществах и возможностях биотоплива также препятствует его распространению. Экологические и экономические преимущества биотоплива могут быть недостаточно разъяснены и популяризированы. Шестая причина – сельскохозяйственные приоритеты: сельское хозяйство Казахстана в основном ориентировано на производство продовольственных культур, что ограничивает использование земельных ресурсов для выращивания биомассы, необходимой для производства биотоплива. Эти факторы вместе создают ситуацию, в которой развитие и использование биотоплива в Казахстане сталкивается с существенными препятствиями.

Глава 3. Энергетический баланс биоэнергетической установки

Удельный выход органического вещества подготовленного к анаэробной обработке субстрата будет равен:

$$G_{inf} = (G_{init} + G_{awb} + G_{rec}) \cdot (1 - \varphi_H), \quad (1)$$

где φ_H – коэффициент, учитывающий потери с уходящими газами при разложении органического вещества в процессе подготовки исходного субстрата в емкости загрузки к анаэробной обработке.

Удельный выход уходящих газов из емкости загрузки после подготовки исходного субстрата к анаэробной обработке будет равен:

$$\rho_{abg} \cdot G_{abg} = (G_{init} + G_{awb} + G_{rec}) \cdot \varphi_H. \quad (2)$$

Общий вид материального баланса анаэробного биореактора (метантенка) выглядит следующим образом:

$$G_{inf} = G_{eff} + \rho_{bg} \cdot G_{bg}, \quad (3)$$

где G_{eff} – удельный выход органического вещества эффлюента после анаэробной обработки в анаэробном биореакторе, кг/(м³·сут);

ρ_{bg} – плотность биогаза из анаэробного биореактора, кг/м³;

G_{bg} – удельный выход биогаза из анаэробного биореактора, м³/(м³·сут).

Удельный выход эффлюента после анаэробной обработки в биореакторе сповышенным давлением в реакторном пространстве будет равен:

$$G_{eff} = G_{inf}(1 - \varphi_M), \quad (4)$$

где φ_M – степень разложения органического вещества при анаэробной обработке в биореакторе с повышенным давлением в реакторном пространстве.

Удельный выход биогаза при анаэробной обработке жидкой фракции в биореакторе с повышенным давлением в реакторном пространстве равен:

$$\rho_{bg} \cdot G_{bg} = G_{inf} \cdot \varphi_M. \quad (5)$$

Общий вид материального баланса устройства гравитационного разделения эффлюента на фракции выглядит следующим образом:

$$G_{eff} = G_{tef} + G_S, \quad (6)$$

где G_{tef} – удельное количество органического вещества сгущенной фракции эффлюента после гравитационного разделения, кг/(м³·сут);

G_S – удельное количество органического вещества надосадочной жидкости после гравитационного разделения эффлюента, кг/(м³·сут).

Удельный выход сгущенной фракции эффлюента после гравитационного разделения будет равен:

$$G_{tef} = G_{eff} * (100 - SE)/100, \quad (7)$$

где SE – эффективность устройства разделения эффлюента на фракции, %.

Удельный выход органического вещества осветленной жидкости после гравитационного разделения эффлюента будет равен:

$$G_S = G_{eff} * SE/100. \quad (8)$$

Исходя из вышеизложенного, материальный баланс всей системы будет выглядеть следующим образом:

$$G_{init} = \frac{\rho_{bg} \cdot G_{bg} + G_S + \rho_{abg} \cdot G_{abg} + G_{awb} \cdot (\varepsilon \cdot \beta - 1)}{(RR(2 - \varepsilon \cdot \beta) - 1)}, \quad (9)$$

где ε – коэффициент, учитывающий степень разложения органического вещества в процессе анаэробной биоконверсии;

β – коэффициент, учитывающий эффективность устройства разделения эффлюента на фракции.

Коэффициент, учитывающий степень разложения органического вещества в процессе анаэробной биоконверсии равен:

$$\varepsilon = (1 - \varphi_M) \cdot (1 - \varphi_H). \quad (10)$$

Коэффициент, учитывающий эффективность устройства разделения эффлюента на фракции равен:

$$\beta = (100 - SE)/100. \quad (11)$$

Исходя из того, что $G_{awb} \ll G_{init}$, в ходе математического преобразования, материальный баланс всей системы будет выглядеть следующим образом:

$$\rho_{bg} \cdot G_{bg} = \varphi_M \cdot G_{init} \cdot (1 - \varphi_H) \cdot (1 + (RR - 1) \cdot \varepsilon). \quad (12)$$

Удельный расход теплоты [(кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут)], необходимый для компенсации тепловых потерь через ограждающие поверхности аппарата аэробной предобработки при среднегодовой температуре наружного воздуха

$$Q_{K1} = k_1 \cdot F_1 \cdot (t_H - t_0) \cdot r_1, \quad (13)$$

где k_1 – коэффициент теплопередачи ограждающих поверхностей устройства предварительной подготовки, кВт/м²·К;

F_1 – удельная площадь ограждающих поверхностей устройства предварительной подготовки, м²/м³;

t_H – средняя температура субстрата в емкости загрузки, °С;

t_0 – температура наружного воздуха, °С;

r_1 – время подготовки исходного субстрата в емкости загрузки, ч/сут.

Площадь ограждающих поверхностей емкости загрузки зависит от его геометрии, а также от суточной дозы загрузки:

$$F_1 = f(G_{init}; RR). \quad (14)$$

Для подготовки исходного субстрата в емкости загрузки к анаэробному сбраживанию необходимо затратить тепловую энергию в удельном количестве, равном:

$$Q_P = Q_{PH} + Q_{K1} + Q_{abg} - \alpha_H \cdot k^Q \cdot E^{ABC}, \quad (15)$$

где Q_{PH} – удельный расход энергии на предварительный нагрев субстрата, (кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут);

Q_{abg} – удельное количество тепловой энергии, теряемой с уходящими газами, (кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут).

Удельный расход теплоты на предварительный нагрев субстрата [(кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут)] определяется как:

$$Q_{PH} = c_{init} \cdot G_{init} \cdot (t_{inf} - t_{init}) + c_{rec} \cdot G_{rec} \cdot (t_{inf} - t_{rec}), \quad (16)$$

где t_{inf} – конечная температура нагрева субстрата, °С.

Удельное количество тепловой энергии, теряемой с уходящими газами [(кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут)] определяется как:

$$Q_{abg} = c_{abg} \cdot \rho_{abg} \cdot G_{abg} \cdot (t_H - t_0), \quad (17)$$

где c_{abg} – теплоемкость уходящих газов, (кВт·ч)/(кг·°С).

Общий вид энергетического баланса метантенка выглядит следующим образом:

$$(Gct)_{inf} + Q_M + E_M = (Gct)_{eff} + (Gct)_{bg} + Q_{K2}, \quad (18)$$

где Q_M – удельный расход тепловой энергии на собственные нужды анаэробного биореактора, (кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут);

E_M – удельное количество энергии, затраченное на привод вспомогательных устройств метантенка, (кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут);

Q_{K2} – удельный расход энергии на компенсацию тепловых потерь от ограждающих конструкций и трубопроводов метантенка, (кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут).

Удельный расход теплоты [(кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут)], необходимый для компенсации тепловых потерь через ограждающие поверхности анаэробного биореактора (метантенка) при среднегодовой температуре наружного воздуха:

$$Q_{K2} = k_2 \cdot F_M \cdot (t_M - t_0) \cdot 24, \quad (19)$$

где k_2 – коэффициент теплопередачи, кВт/м²К;

F_M – удельная площадь ограждающих поверхностей анаэробного биореактора (метантенка), м²/м³;

t_M – температура субстрата в анаэробном биореакторе (метантенке), °С.

Удельная площадь ограждающих поверхностей анаэробного биореактора (метантенка) зависит от геометрии реактора, а также от суточной дозы загрузки:

$$F_M = f(G_{init}; RR). \quad (20)$$

Удельный расход тепловой энергии на собственные нужды анаэробного биореактора равен:

$$Q_M = Q_{K2} + Q_{bg}, \quad (21)$$

где Q_{bg} – удельное количество тепловой энергии, уходящей с выработанным биогазом, (кВт·ч)^{т.эп.}/(м³·сут).

Удельное количество тепловой энергии, уходящей с выработанным

биогазом $[(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{т.э.н.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})]$ определяется как

$$Q_{bg} = c_{bg} \cdot \rho_{bg} \cdot G_{bg} \cdot (t_M - t_0), \quad (22)$$

где c_{bg} – теплоемкость выработанного в анаэробном биореакторе (метантенке) биогаза, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

Общий вид энергетического баланса устройства гравитационного разделения эффлоента на фракции выглядит следующим образом:

$$(Gct)_{eff} = (Gct)_{tef} + (Gct)_S + Q_{K3}, \quad (23)$$

где Q_{K3} – удельные тепловые потери энергии через ограждающие конструкции устройства гравитационного разделения эффлоента на фракции, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{т.э.н.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$.

Удельные тепловые потери энергии $[(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{т.э.н.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})]$ через ограждающие конструкции устройства гравитационного разделения эффлоента на фракции при среднегодовой температуре наружного воздуха:

$$Q_{K3} = k_3 \cdot F_{ES} \cdot (t_{ES} - t_0) \cdot r_3, \quad (24)$$

где k_3 – коэффициент теплопередачи, $\text{кВт}/\text{м}^2\text{K}$;

F_{ES} – удельная площадь ограждающих поверхностей устройства гравитационного разделения эффлоента на фракции, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

t_{ES} – средняя температура субстрата в устройстве гравитационного разделения эффлоента на фракции, $^\circ\text{C}$;

r_3 – время пребывания эффлоента в устройстве гравитационного разделения эффлоента на фракции, $\text{ч}/\text{сут}$.

Удельная площадь ограждающих поверхностей емкости выгрузки зависит от ее геометрии, а также от суточной дозы загрузки:

$$F_{ES} = f(G_{init}; RR). \quad (25)$$

Исходя из вышеизложенного, энергетический баланс всей системы будет выглядеть следующим образом:

$$(Gct)_{init} + \sum E + Q_{ON} + (Gct)_{rec} = (Gct)_{tef} + \sum (Gct)_b + (Gct)_S + \sum Q_K + G_{bg} \cdot \lambda_{bg} \cdot \rho_{bg}, \quad (26)$$

где $\sum E$ – суммарное удельное количество энергии, затраченной на привод и функционирование электрооборудования системы, (кВт·ч)^{эл.эн.}/(м³·сут);
 Q_{ON} – удельный расход теплоты, необходимый для функционирования элементов системы, (кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут);
 $\sum(Gct)_b$ – удельное количество тепловой энергии, уходящей с выработанными биогазами, (кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут);
 $\sum Q_K$ – удельные тепловые потери энергии через ограждающие конструкции трубопроводы элементов системы, (кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут);
 λ_{bg} – низшая теплота сгорания биогаза, (кВт·ч)/кг.
Суммарное удельное количество энергии, затраченной на привод и функционирование электрооборудования системы, составляет:

$$\sum E = E_P + E_{VLA} + E_M. \quad (27)$$

Удельный расход теплоты, необходимый для функционирования элементов системы равен:

$$Q_{ON} = Q_P + Q_M + Q_{K3}. \quad (28)$$

Удельное количество тепловой энергии, уходящей с выработанными биогазами, составляет:

$$\sum(Gct)_b = (Gct)_{bg} + (Gct)_{abg}. \quad (29)$$

Удельные тепловые потери энергии через ограждающие конструкции и трубопроводы элементов системы равны:

$$\sum Q_K = Q_{K1} + Q_{K2} + Q_{K3}. \quad (30)$$

Общий вид материального баланса реактора подготовки выглядит следующим образом:

$$G_{init} = G_{inf} + G_{abg} \cdot \rho_{abg}, \quad (31)$$

где G_{init} – удельная суточная подача исходных органических отходов в реактора подготовки, кг/(м³·сут);
 G_{inf} – удельный выход подготовленных органических отходов, кг/(м³·сут);
 G_{abg} – удельный выход уходящих газов после подготовки исходного

субстрата к анаэробной обработке, $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$;

ρ_{abg} – плотность уходящих газов после подготовки исходного субстрата к анаэробной обработке, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Удельный выход подготовленных органических отходов будет равен:

$$G_{inf} = G_{init} \cdot (1 - \varphi_H), \quad (32)$$

где φ_H – степень разложения органического вещества при подготовке исходного субстрата в емкости загрузки к анаэробной обработке.

Удельный выход уходящих газов из реактора подготовки после подготовки исходного субстрата к анаэробной обработке будет равен:

$$G_{abg} \cdot \rho_{abg} = G_{init} \cdot \varphi_H. \quad (33)$$

Общий вид материального баланса метантенка:

$$G_{inf} + G_{cir} \cdot (1 - \varphi_{MEC}) + \rho^{MEC} \cdot G^{MEC} = G_{eff} + G_{cir} + \rho_{bg} \cdot G_{bg}, \quad (34)$$

где G_{cir} – удельный поток субстрата, поступающий в МЭЯ, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$;

φ_{MEC} – степень разложения органического вещества при анаэробной обработке в МЭЯ;

ρ^{MEC} – плотность биогаза из МЭЯ, $\text{кг}/\text{м}^3$;

G^{MEC} – удельный выход биогаза из МЭЯ, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$;

G_{eff} – удельный выход эффлюента из метантенка, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$;

ρ_{bg} – плотность биогаза из метантенка, $\text{кг}/\text{м}^3$;

G_{bg} – удельный выход биогаза из метантенка, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$.

Удельный поток субстрата, поступающий в МЭЯ зависит от кратности циркуляции субстрата в метантенке:

$$G_{cir} = n_{cir} \cdot V^D, \quad (35)$$

где n_{cir} – кратность циркуляции субстрата в метантенке, $\text{кг}/\text{м}^3$;

V^D – удельный объем метантенка, $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$.

При этом удельный объем метантенка определяется как:

$$V^D = G_{inf} \cdot HRT, \quad (36)$$

где HRT – удельное гидравлическое время удержания (ГВУ) в метантенке, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Удельный выход биогаза из МЭЯ пропорционально зависит от удельного потока субстрата, поступающего в МЭЯ, и от степени разложения органического вещества при анаэробной обработке в МЭЯ:

$$G^{MEC} = G_{cir} \cdot \varphi_{MEC}. \quad (37)$$

Удельный выход эффлюента из метантенка будет равен:

$$G_{eff} = G_{inf}(1 - \varphi_M) - G^{MEC}, \quad (38)$$

где φ_M – степень разложения органического вещества при анаэробной обработке в метантенке.

Удельный выход биогаза при анаэробной обработке жидкой фракции в метантенке является суммой удельных выходов биогаза из традиционного метантенка (без применения МЭЯ) и из МЭЯ:

$$G_{bg} \cdot \rho_{bg} = G^D \cdot \rho^D + G^{MEC} \cdot \rho^{MEC}. \quad (39)$$

При этом удельный выход биогаза из традиционного метантенка равен:

$$G^D \cdot \rho^D = G_{inf} * \varphi_M. \quad (40)$$

Общий вид материального баланса МЭЯ выглядит следующим образом:

$$G_{cir} = G_{cir} \cdot (1 - \varphi_{MEC}) + G^{MEC} \cdot \rho^{MEC}. \quad (41)$$

Исходя из вышеизложенного, материальный баланс всей системы будет выглядеть следующим образом:

$$G_{init} = G_{bg} \cdot \rho_{bg} + G_{abg} \cdot \rho_{abg} + G_{eff}. \quad (42)$$

При этом удельный выход биогаза из метантенка равен:

$$G_{bg} \cdot \rho_{bg} = G_{init} \cdot (1 - \varphi_H) \cdot (\varphi_M + \varphi_{MEC} \cdot HRT \cdot n_{cir}). \quad (43)$$

Общий вид энергетического баланса реактора подготовки:

$$(Gct)_{init} + Q_P + E_P = (Gct)_{inf} + (Gct)_{abg} + Q_{K1}, \quad (44)$$

где t – температура, °С;
 c – теплоемкость, (кВт·ч)/(кг·°С);
 Q_P – удельное количество тепловой энергии, необходимое для подготовки исходного субстрата в реакторе подготовки, (кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут);
 E_P – удельное количество энергии, затраченное на функционирование электрооборудования в реактора подготовки, (кВт·ч)^{эл.эн.}/(м³·сут);
 Q_{K1} – удельное количество энергии, теряемой через ограждающие конструкции и трубопроводы реактора подготовки, (кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут).
 Удельное количество энергии, затраченное на функционирование электрооборудования реактора подготовки, зависит от удельной суточной подачи исходных органических отходов:

$$E_P = f(G_{init}). \quad (45)$$

Удельный расход теплоты [(кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут)], необходимый для компенсации тепловых потерь через ограждающие поверхности реактора подготовки:

$$Q_{K1} = k_1 \cdot F_1 \cdot (t_H - t_0) \cdot 10^{-3} \cdot r_1, \quad (46)$$

где k_1 – коэффициент теплопередачи ограждающих поверхностей реактора подготовки, Вт/м²·К;
 F_1 – удельная площадь ограждающих поверхностей реактора подготовки, м²/м³;
 t_H – средняя температура субстрата в реакторе подготовки, °С;
 t_0 – температура наружного воздуха, °С;
 r_1 – гидравлическое время удержания отходов в реакторе подготовки, ч.
 Удельная площадь ограждающих поверхностей реактора подготовки зависит от удельной суточной подачи исходных органических отходов:

$$F_1 = f(G_{init}). \quad (47)$$

Для подготовки исходного субстрата в реакторе подготовки необходимо затратить тепловую энергию в удельном количестве, равном:

$$Q_P = Q_{PH} + Q_{K1} + Q_{abg}, \quad (48)$$

где Q_{PH} – удельный расход энергии на предварительный нагрев субстрата, (кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут);
 Q_{abg} – удельное количество тепловой энергии, теряемой с уходящими

газами, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{т.эн.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$.

Удельный расход теплоты на предварительный нагрев субстрата:

$$Q_{PH} = c_{init} \cdot G_{init} \cdot (t_{inf} - t_{init}), \quad (49)$$

где t_{inf} – конечная температура нагрева субстрата, °С.

Удельное количество тепловой энергии, теряемой с уходящими газами:

$$Q_{abg} = c_{abg} \cdot \rho_{abg} \cdot G_{abg} \cdot (t_H - t_0), \quad (50)$$

где c_{abg} – теплоемкость уходящих газов, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

Общий вид энергетического баланса метантенка:

$$\begin{aligned} (Gct)_{inf} + (Gct)_{cir} \cdot (1 - \varphi_{MEC}) + (Gct)^{MEC} + Q_D + E_D \\ = (Gct)_{eff} + (Gct)_{cir} + (Gct)_{bg} + Q_{K2}, \end{aligned} \quad (51)$$

где Q_D – удельный расход тепловой энергии на собственные нужды метантенка, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{т.эн.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$;

E_D – удельное количество энергии, затраченное на привод вспомогательных устройств метантенка, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{эл.эн.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$;

Q_{K2} – удельный расход энергии на компенсацию тепловых потерь от ограждающих конструкций и трубопроводов метантенка, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{т.эн.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$.

Удельный расход теплоты $[(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{т.эн.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})]$, необходимый для компенсации тепловых потерь через ограждающие поверхности метантенка:

$$Q_{K2} = k_2 \cdot F_D \cdot (t_D - t_0) \cdot 10^{-3} \cdot 24, \quad (52)$$

где k_2 – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$;

F_M – удельная площадь ограждающих поверхностей метантенка, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

t_M – температура субстрата в метантенке, °С.

Удельная площадь ограждающих поверхностей метантенка зависит от геометрии реактора, а также от удельной суточной подачи исходных органических отходов:

$$F_D = f(G_{init}). \quad (53)$$

Удельный расход тепловой энергии на собственные нужды метантенка:

$$Q_D = Q_{K2} + Q_{bg}, \quad (54)$$

где Q_{bg} – удельное количество тепловой энергии, уходящей с выработанным биогазом, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{т.ЭН.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$.

Удельное количество тепловой энергии, уходящей с биогазом:

$$Q_{bg} = c_{bg} \cdot \rho_{bg} \cdot G_{bg} \cdot (t_D - t_0), \quad (55)$$

где c_{bg} – теплоемкость выработанного биогаза, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

Общий вид энергетического баланса микробной электролизной ячейки выглядит следующим образом:

$$(Gct)_{cir} + E_{MEC} = (Gct)_{cir} \cdot (1 - \varphi_{MEC}) + (Gct)^{MEC} + Q_{K3}, \quad (56)$$

где E_{MEC} – удельное количество энергии, затрачиваемое на подачу разности потенциалов на электроды МЭЯ, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{эл.ЭН.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$;

Q_{K3} – удельные тепловые потери энергии через ограждающие конструкции микробной электролизной ячейки, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})^{\text{т.ЭН.}}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$.

Удельные тепловые потери энергии через ограждающие конструкции микробной электролизной ячейки:

$$Q_{K3} = k_3 \cdot F_{MEC} \cdot (t_{MEC} - t_0) \cdot 10^{-3} \cdot 24, \quad (57)$$

где k_3 – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$;

F_{MEC} – удельная площадь ограждающих поверхностей микробной электролизной ячейки, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

t_{MEC} – средняя температура субстрата в микробной электролизной ячейке, $^\circ\text{C}$.

Удельная площадь ограждающих поверхностей микробной электролизной ячейки зависит от удельной суточной подачи исходных органических отходов:

$$F_{MEC} = f(G_{cir}). \quad (58)$$

Исходя из вышеизложенного, энергетический баланс всей системы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} (Gct)_{init} + \sum E + Q_{ON} = \\ = (Gct)_{eff} + \sum (Gct)_{bg} + \sum Q_K + \rho_{bg} \cdot G_{bg} \cdot \lambda_{bg}, \end{aligned} \quad (59)$$

где $\sum E$ – суммарное удельное количество энергии, затраченной на привод и функционирование электрооборудования системы, (кВт·ч)^{эл.эн.}/(м³·сут);
 Q_{ON} – удельный расход теплоты, необходимый для функционирования элементов системы, (кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут);
 $\sum(Gct)_{bg}$ – удельное количество тепловой энергии, уходящей с биогазами, (кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут);
 $\sum Q_K$ – суммарные удельные тепловые потери энергии, (кВт·ч)^{т.эн.}/(м³·сут);
 λ_{bg} – низшая теплота сгорания биогаза, (кВт·ч)/кг.
Суммарное удельное количество энергии, затраченной на привод и функционирование электрооборудования системы, составляет:

$$\sum E = E_P + E_D + E_{MEC}. \quad (60)$$

Удельный расход теплоты, необходимый для функционирования элементов системы равен:

$$Q_{ON} = Q_P + Q_D + Q_{K3}. \quad (61)$$

Удельное количество тепловой энергии, уходящей с биогазами:

$$\sum(Gct)_{bg} = (Gct)_{bg} + (Gct)_{abg}. \quad (62)$$

Удельные тепловые потери энергии равны:

$$\sum Q_K = Q_{K1} + Q_{K2} + Q_{K3}. \quad (63)$$

3.1 Применение термофильного температурного режима

При изучении кинетики микробиологических процессов образования метана основное внимание уделяют на интенсивность переработки органической биомассы, которая зависит от скорости образования биогаза в метантенке. Несмотря на многолетние исследования и практическое применение анаэробного сбраживания, получен ряд общепризнанных математических описаний скорости образования биогаза, которые применяются при научно-исследовательских работах.

Из анализа работ Ножевниковой А.Н., Елютиной Н.Ю., Некрасовой В.К. следует, что при сбраживании навозных стоков в метантенке и увеличение активной биомассы в камере сбраживания может быть достигнуто путем

оптимизации дозы загрузки исходного субстрата, при которой вынос активной микрофлоры и неперебродившего субстрата становится наименьшим [29, 30].

Теоретической основой построения математической модели процесса иммобилизации метанообразующих микроорганизмов в биологических фильтрах является кинетическая модель Конто [31], которая может быть применена более широкому классу, начиная со слабонасыщенных органических отходов и в завершении высококонцентрированными (навоз, птичий помет):

$$V_{bg} = \frac{V_t \cdot S}{hrt} \left(1 - \frac{K_S}{\mu \cdot hrt - 1 + K_S} \right), \quad (64)$$

где V_{bg} – суточный выход биогаза из сбраживаемого сырья, м³/(м³·сут);
 V_t – максимальный выход биогаза из единицы органического вещества заданного состава при бесконечном времени гидравлического удержания, м³/кг;
 S – начальная концентрация органических веществ в субстрате, кг/м³;
 hrt – гидравлическое время удержания, сут;
 μ – темп роста микроорганизмов в данном процессе анаэробной ферментации, 1/сут;
 K_S – константа полунасыщения (кинетический параметр).

Общее уравнение, описывающее кинетику концентрации клеток в таком процессе, имеет вид:

$$\frac{dX}{dhrt} = X \cdot (\mu - d_m), \quad (65)$$

где X – содержание активной биомассы в биореакторе, кг/м³;
 d_m – скорость вымывания микроорганизмов без иммобилизации в метантенке, 1/сут.

Скорость размножения биомассы, по мнению Зуева В.А., Гриднева П.И., Панцхава Е.С. [32], может зависеть от концентрации клеток, уровня субстрата, температуры, рН среды и других факторов.

В микробиологических системах скорость роста микроорганизмов обычно ограничивается концентрацией субстрата (S), что описывается зависимостью, предложенной Ж. Моно. [33]:

$$\mu = \frac{\mu_S \cdot S}{K_S \cdot X + S}, \quad (66)$$

где μ_S – максимальный темп роста микроорганизмов при данных условиях, 1/сут.

Параметр K_S в биологической технологии выражает зависимость выхода биогаза от концентрации органического вещества в субстрате в интервале температур 30...60°C [34].

При $S = 30 \dots 100$ кг/м³, $K_S = 1,5 \dots 2,0$;

При $S = 100 \dots 150$ кг/м³, $K_S = 2,0 \dots 11,0$.

Максимальная удельная скорость роста микроорганизмов в метантенке описывается линейной функцией в диапазоне температур 30-60°C и определяется следующей формулой:

$$\mu_S = \sigma \cdot T_p - \omega, \quad (67)$$

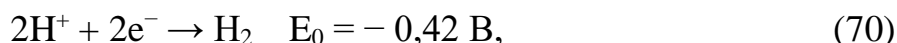
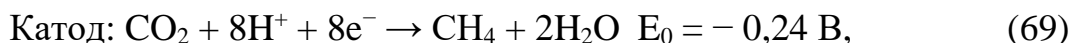
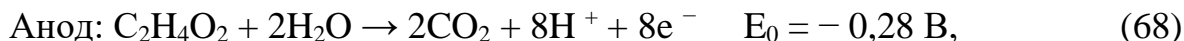
где σ – эмпирический коэффициент, 1/К, $\sigma = 0,013$, 1/К;

T_p – температура процесса, К;

ω – эмпирический коэффициент, 1/сут, $\omega = 0,129$, 1/сут.

3.2 Применение микробной электролизной ячейки

Подобно электрогенезу, в микробной электролизной ячейке (МЭЯ) анодные электроактивные бактерии окисляют простые органические кислоты и переносят электроны в электролит посредством внеклеточного электронного транспорта (ЕЕТ). Катодный электрометаногенез включает образование метана через: (1) прямое поглощение электронов от электрода (прямой электрометаногенез на основе DIET) и (2) опосредованное водородом или другими соединениями, такими как формиат, ацетат или другие медиаторы (опосредованный электрометаногенез по принципу PET) [35]. Процесс электрометаногенеза на катоде и аноде МЭЯ описывается рядом уравнений. [24].



где E_0 – катодный потенциал, В.

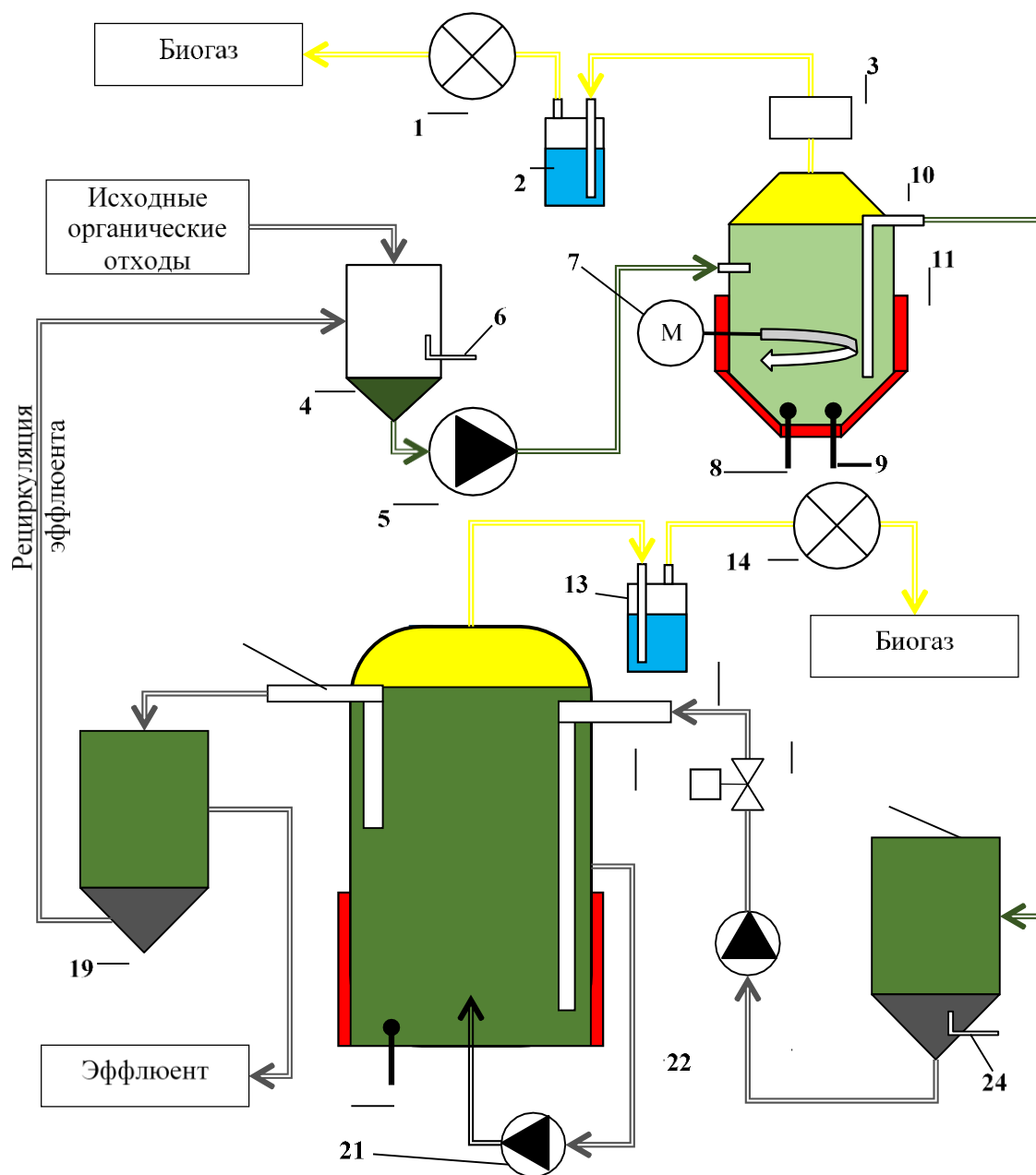
Таким образом, теоретически электрометаногенез может осуществляться с меньшими энергетическими затратами по сравнению с абиотическим производством H₂. Однако на практике требуется более отрицательный катодный потенциал для компенсации высокого перенапряжения электродов и внутреннего сопротивления системы, что в конечном итоге увеличивает энергозатраты на метаногенез. [36].

Глава 4. Экспериментальные исследования анаэробной биоконверсии

В данной главе будут разобраны экспериментальные исследования, результаты и выполнения хода работ российского ученого PhD, Ковалев А. А, а также, сравнение с моими результатами.

Он создал экспериментальную установку, которая предназначена для исследования влияния рециркуляции биомассы с одновременной предварительной обработкой смеси сброженного осадка с исходным субстратом на эффективность и стабильность процесса анаэробной биоконверсии органического вещества жидких органических отходов. Основными параметрами, которые определяются в ходе эксперимента, являются продолжительность предварительной обработки смеси сброженного осадка с исходным субстратом и соотношение объемов рециркулируемой биомассы и исходного субстрата, при которых процесс анаэробной биоконверсии протекает стабильно, а удельный выход биогаза с 1 кг исходного органического вещества будет максимальным при улучшении качества биогаза (повышении содержания метана, снижение содержания углекислого газа и сероводорода) [37].

Технологическая схема экспериментальной биогазовой установки приведена на Рисунке 5. Установка работает следующим образом. Исходный субстрат подается в лабораторный реактор подготовки (РП) субстрата к анаэробному сбраживанию -7 через устройство загрузки. Также в лабораторный реактор подготовки (РП) субстрата к анаэробному сбраживанию -7 насосом рециркуляции сброженного осадка -16 подается сброженный осадок из устройства разделения сброженного субстрата на фракции -13. В емкости - лабораторном РП смесь исходного субстрата и сброженного осадка при интенсивном перемешивании за счет перемешивающего устройства -10 нагревается до температуры процесса в лабораторном анаэробном биореакторе -3. Нагрев происходит за счет нагревателя лабораторного РП -9. Через патрубок отвода субстрата лабораторного РП -7 смесь исходного субстрата и сброженного осадка насосом циркуляции подготавливаемого субстрата -11 подается в рабочую камеру АВС -4, где происходит предварительная обработка в течение заданного времени, а предварительно обработанный субстрат вытесняется в лабораторный РП -7 через устройство загрузки. Далее предварительно обработанный и нагретый до температуры сбраживания субстрат через клапан загрузки подготовленного субстрата -19 самотеком поступает в лабораторный анаэробный биореактор -3 через устройство загрузки -12 [37].



1,14 – барабанный счетчик газа; 2,13 – гидрозатвор; 3 – блок газоанализаторов концентраций газа; 4 – усреднительная емкость; 5 – насос загрузки RH; 6,24 – поплавковый датчик уровня; 7 – перемешивающее устройство в RH; 8,20 – датчик температуры; 9 – pH-электрод; 10 – анаэробный биореактор RH; 11 – нагревательный элемент RH; 12 – устройство выгрузки с RM; 13 – метантенк(RM); 14 – метантенк(RM); 15 – метантенк(RM); 16 – устройство загрузки RM; 17 – клапан загрузки; 18 – промежуточная емкость; 19 – накопитель эфлюента; 21 – насос перемешивания RM; 22 – нагревательный элемент RM; 23 – насос загрузки RM

Рисунок 6 – Технологическая схема экспериментальной установки с разделением общего объема биореактора на реакторы стадий

Установка работала в двух режимах:

- К - режим без предварительной обработки в АВС и рециркуляции сгущенной фракции сброженного осадка (контроль);
- VLAR - режим с рециркуляцией сгущенной фракции сброженного осадка и обработкой смеси исходного субстрата с рециркулятом в АВС [37].

В режиме К (контроль) в течение 40 суток ежедневно производили загрузку исходного субстрата объемом 6 л, при этом гидравлическое время удержания (hrt) лабораторного анаэробного биореактора составляло 8 суток, а его нагрузка по исходному органическому веществу (olr) – 5 кг $ОВ_{исх}/м^3 \cdot сут.$ Ежедневно учитывалось количество выделяемого биогаза и измерялись концентрации газов в биогазе [37].

В режиме VLAR (с рециркуляцией сгущенной фракции сброженного осадка и обработкой смеси исходного субстрата с рециркулятом в АВС) в течение 40 суток ежедневно производили загрузку исходного субстрата объемом 4 л с добавлением 2 л сгущенной фракции сброженного осадка. При этом гидравлическое время удержания (hrt) лабораторного анаэробного биореактора составляло 8 суток, а его нагрузка по исходному органическому веществу (olr) – 3,33 кг $ОВ_{исх}/м^3 \cdot сут.$ Время обработки смеси в АВС составляло 6 мин (hrt в рабочей камере АВС составляло 30с [38]). Коэффициент рециркуляции составил 1,5. Ежедневно учитывалось количество выделяемого биогаза и измерялись концентрации газов в биогазе [37].

Результаты его эксперимента по анаэробному сбраживанию предобработанного в АВС субстрата (модели органической фракции ТКО) изображены на Рисунке 6. Из динамики образования метана и биогаза в расчете наобщее органическое вещество сбраживаемых смесей (Рисунок 6) видно, что в первые сутки проведения эксперимента во всех смесях, содержащих в качестве субстрата обработанный в АВС субстрат, наблюдалась более высокая скорость образования метана, чем в смесях, содержащих необработанный в АВС субстрат (Рисунок 7).

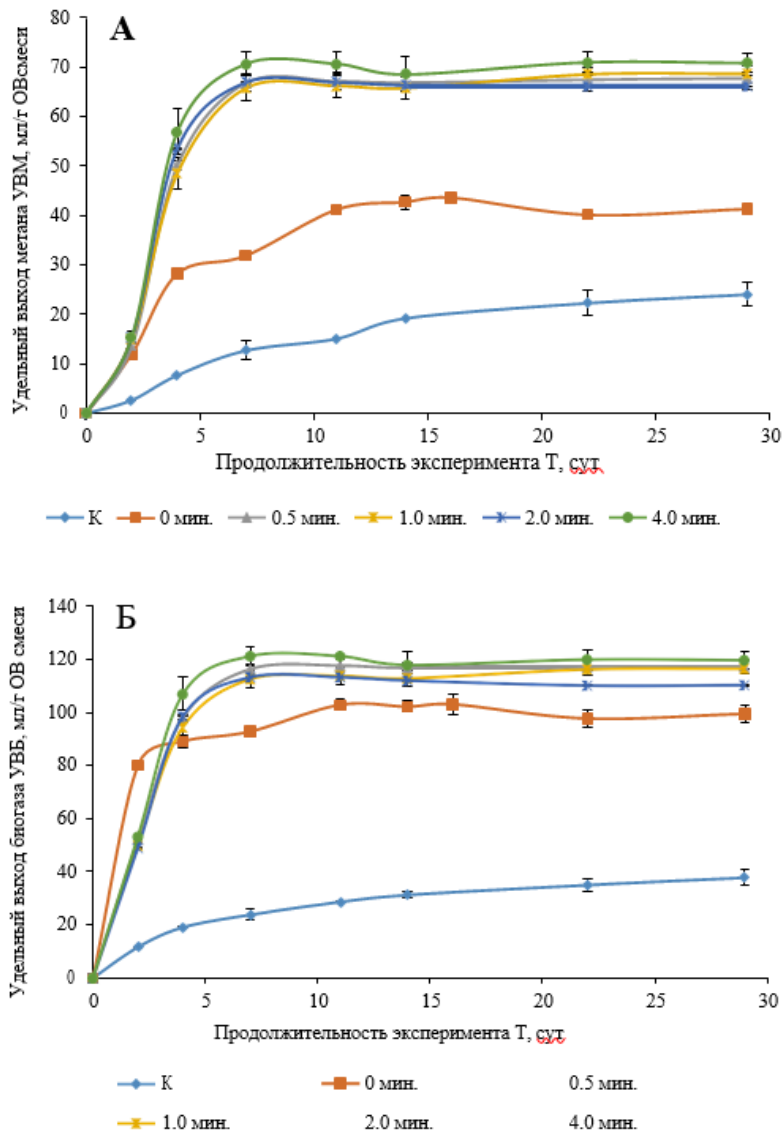


Рисунок 7 – Динамика образования метана (А) и биогаза (Б) в расчете на ОВ исходной смеси (субстрата и инокулята)

Из Рисунка 7 видно, что удельный выход метана с одного м³ анаэробного биореактора при применении рециркуляции сгущенной фракции сброженного осадка с обработкой смеси рециркулята с исходным субстратом выше удельного выхода метана с одного м³ анаэробного биореактора, работающего в режиме контроля, на протяжении всего эксперимента, за исключением первых 4 суток. При этом средняя концентрация метана в биогазе эквивалентна в обоих режимах, однако удельный выход метана с одного м³ анаэробного биореактора в режиме VLAR на 16,8% выше, чем в режиме К. В работе [39] расчетный удельный выход биогаза в режиме с обработкой в ABC на 18% выше, чем при традиционной анаэробной обработке. При этом в работе [39] значения удельных выходов

биогаза получены в периодическом режиме при термофильных условиях сбраживания субстрата с высокой степенью разложения.

В работе исследован эффект использования рециркуляции сгущенной фракции сброженного осадка совместно с обработкой в АВС в системе анаэробной биоконверсии органического отходов. Обработка субстрата в АВС обеспечивает измельчение компонентов субстрата при одновременном интенсивном перемешивании, что улучшает реологические свойства субстрата. Рециркуляция сгущенной фракции сброженного осадка обеспечивает увеличение времени пребывания по сухому веществу субстрата в реакторе, а также возврат значительной части анаэробных микроорганизмов, удаляемых при выгрузке анаэробно обработанного субстрата, в анаэробный биореактор, что, в конечном счете, способствует интенсификации процесса анаэробной биоконверсии ОВ как исходного субстрата, так и сгущенной фракции сброженного осадка. При этом обработка смеси рециркулята с исходным субстратом в АВС не нарушает жизнеспособность анаэробных микроорганизмов, возвращаемых со сгущенной фракцией сброженного осадка. Кроме того, обработка смеси рециркулята с исходным субстратом в АВС обеспечивает внесение в смесь частиц железа, которые способствуют как интенсификации процесса анаэробной биоконверсии в целом, так и улучшению качества биогаза в частности [37].

Заключение по 4 главе. Согласно полученным экспериментальным данным и проведенным расчетам термофильный режим является более выгодным в энергетическом отношении по сравнению с мезофильным. Согласно полученным экспериментальным данным комплексное применение двухстадийной анаэробной биоконверсии и микробной электролизной ячейки позволяет значительно повысить эффективность электрометаногенеза, включая выход метана за счет улучшенного прикрепления биомассы к поверхности биокатода. При этом скорость биоконверсии органического вещества увеличивается на 55%. Результаты выполненных исследований позволили экспериментально обосновать разработанную энерго-технологическую модель биоэнергетических установок, способных обеспечить снижение гидравлического времени удержания при получении энергии в виде биогаза для последующей его утилизации.

Глава 5. Моделирование биоэнергетической установки

Моделирование биоэнергетической установки в ANSYS позволяет проводить анализ различных аспектов её работы, включая механическую часть. В этом руководстве будет рассмотрен общий процесс создания модели биоэнергетической установки в ANSYS.

5.1 Создание 3D модели

Характеристика модели: размеры модели высота – 5 метров, диаметром 5 метров. Также были созданы впадины шириной 1 метр для улучшения качества перемешивания субстрата. Перемешивающее устройство расположено посередине не достигая дна на 10 сантиметров. Лопасть перемешивающего устройства имеет размеры 1,5 метра в длину и 0,4 метра в высоту. Также края выполнены изогнутыми и гладкими. Сам ствол перемешивающего устройства выполнен диаметром 0,3 метра.

Что бы создать 3D модель Биоэнергетической установки я использовал две чертежной среды, такие как Space Claim и Design Modeler. В Design Modeler проще всего было нарисовать сложную деталь как перемешивающее устройство, который указан на рисунке ниже.

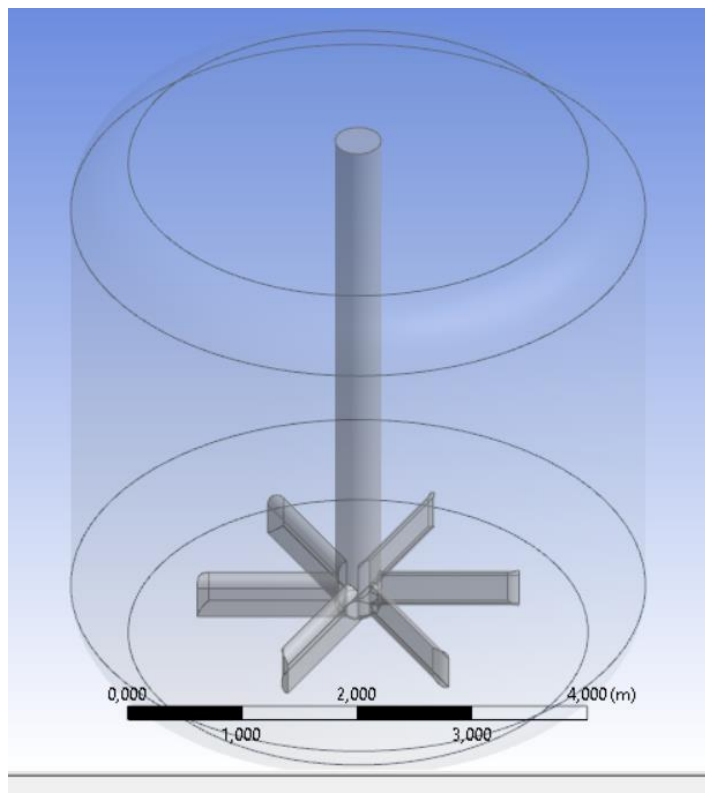


Рисунок 10 – 3D модель метантенка

Далее мы создаем области в котором наше перемешивающее устройство будет вращаться (Рисунок 10).

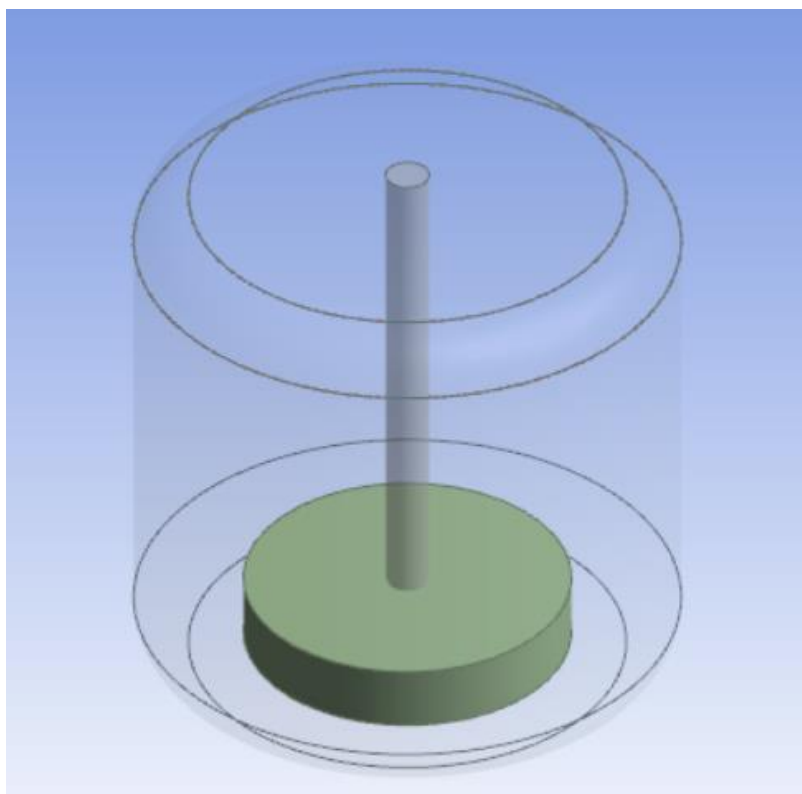


Рисунок 11 – Добавление движения пространства

5.2 Создание сетки (Mesh)

Выбираем подходящий тип сетки (тетраэдрическая, гексагональная и т.д.) в зависимости от сложности геометрии. Определяем размеры элементов сетки. Более мелкая сетка обеспечивает большую точность, но увеличивает время расчета. Проверяем качество сетки, чтобы избежать искажения элементов и улучшить точность моделирования (Рисунок 11).



Рисунок 12 – Создание сетки (Mesh) метантенка

5.3 Ввод данных в ПО Ansys

После создания сетки, мы вводим данные, добавляя вид материала (в нашем случае жидкости) для последующего анализа. В типе материала указываем что у нас жидкость, и изменяем параметры жидкости, такие как плотность и вязкость. В нашем случае, берем плотность жидкости 1200 кг/м^3 , а вязкость 5 кг/мс (Рисунки 12 и 13).

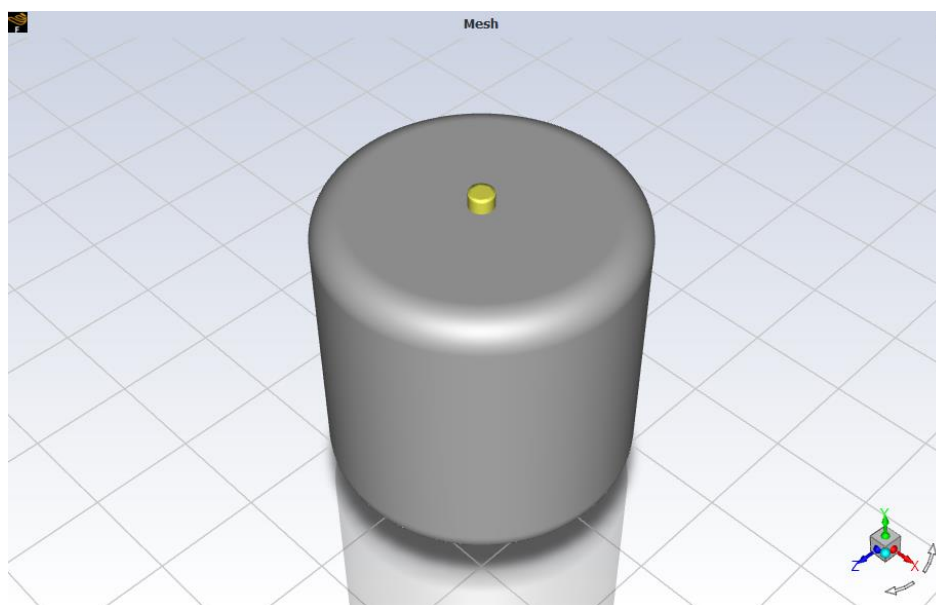


Рисунок 13 – Готовая конструкция метантенка

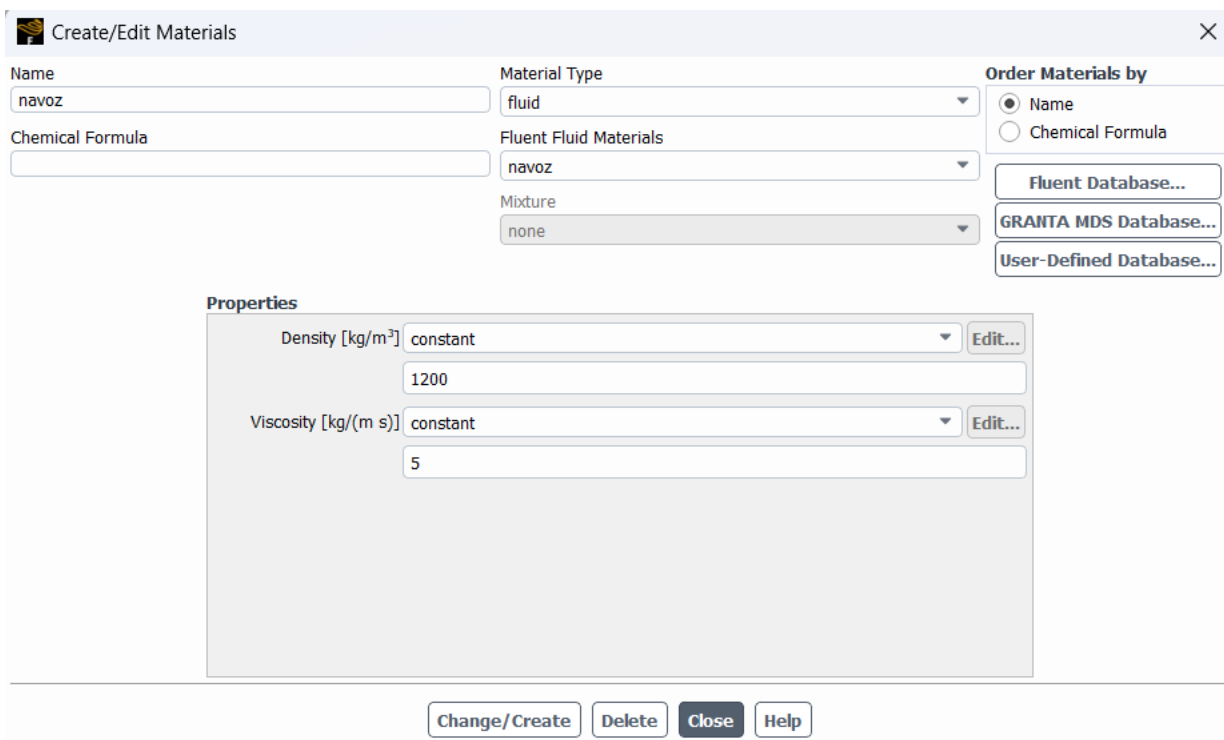
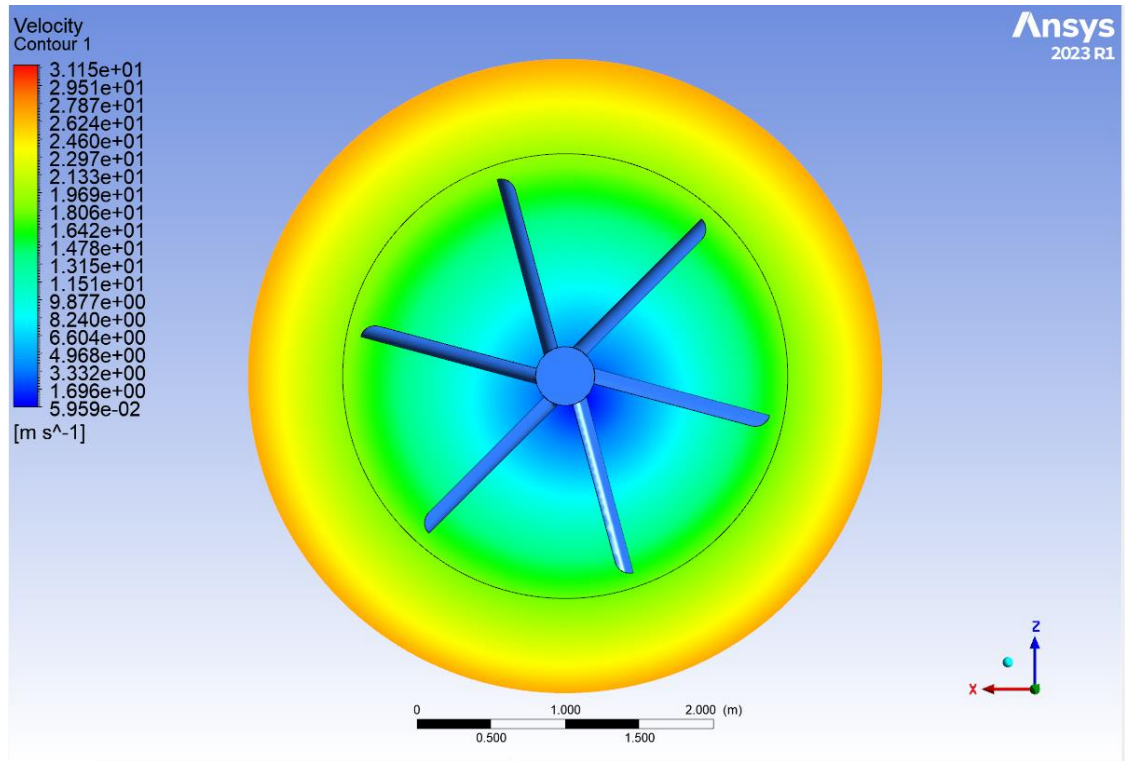


Рисунок 14 – Изменение параметров жидкости

5.4 Результаты моделирования

После мы загружаем данные в Results, и создаем плоскости на которых наглядно показан результат. На рисунках ниже представлены такие данные как скорость вращения жидкости, кинетическая энергия турбулентности, вихревая вязкость, а также зависимости скорости к кинетической энергии турбулентности и по шагам (Рисунки 14-16).

a)



b)

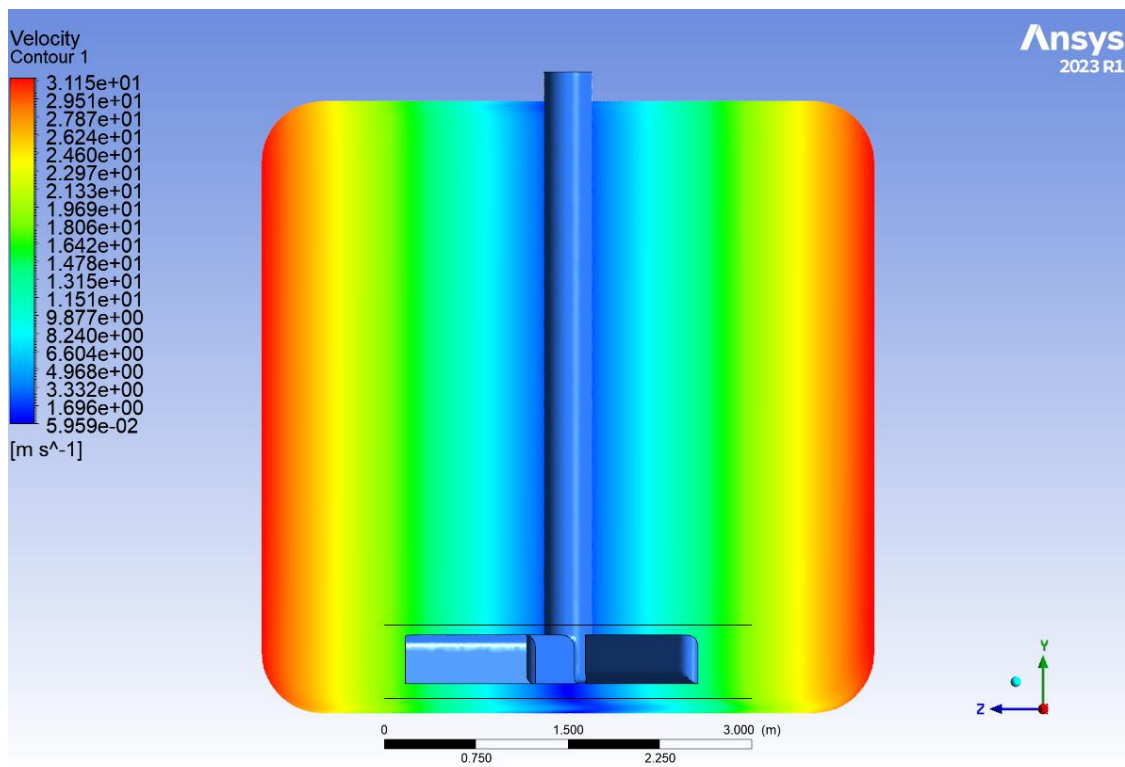


Рисунок 15 – Скорость вращения жидкости (а - вид сверху, b – вид сбоку)

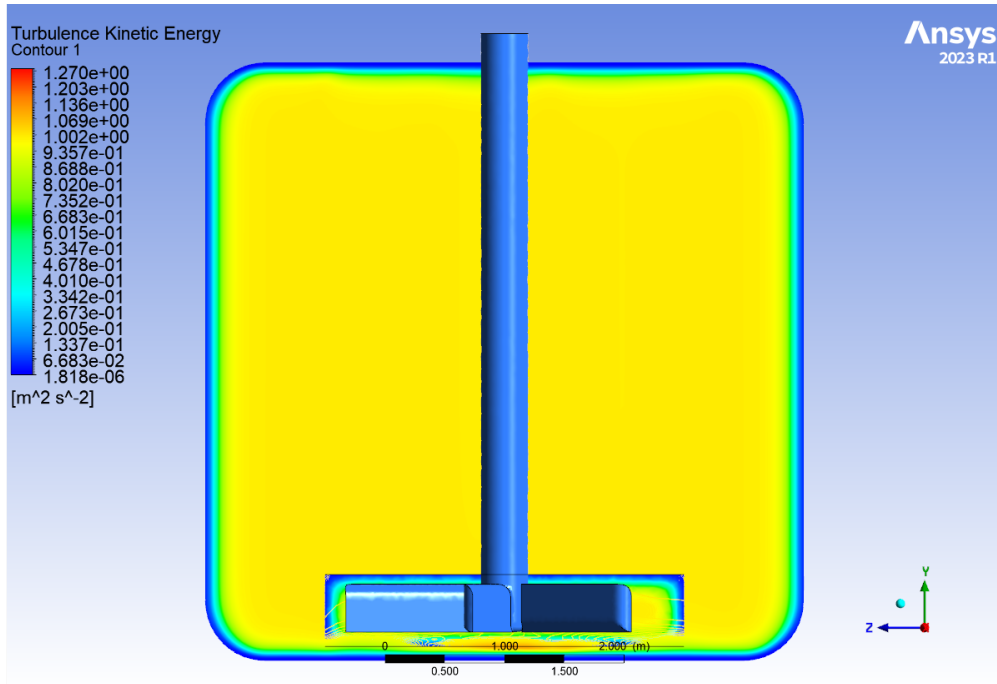


Рисунок 16 – Кинетическая энергия турбулентности

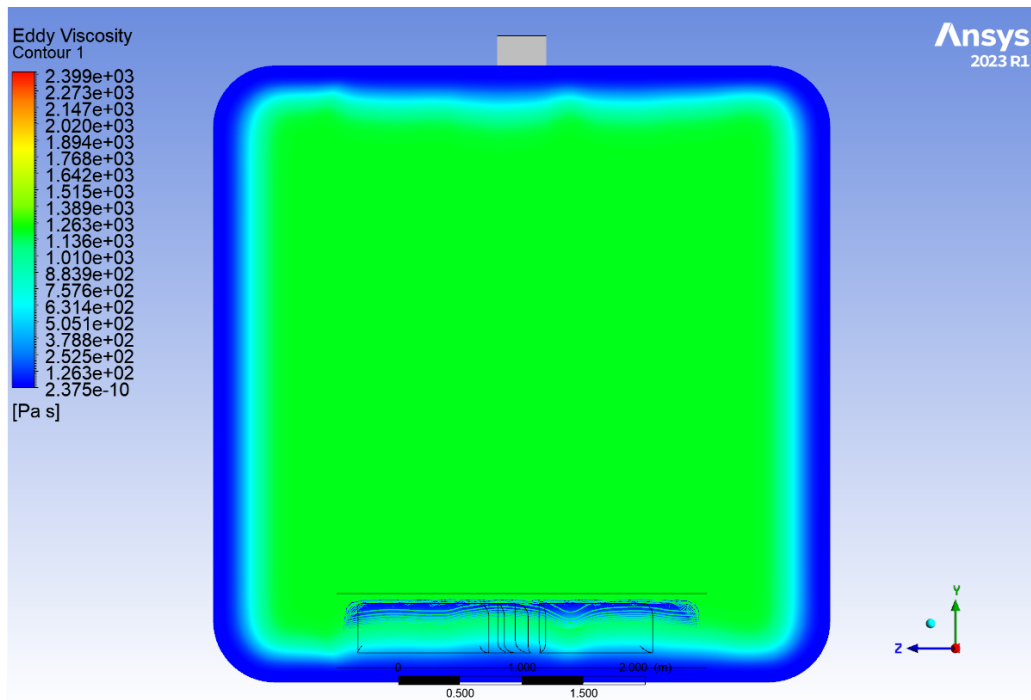


Рисунок 17 – Вихревая вязкость

В результате представлены графики зависимости скорости к кинетической энергии турбулентности и зависимости скорости по шагам. По графику можем

определить, что при увеличении скорости повышается и кинетическая энергия турбулентности(Рисунок 18,19).

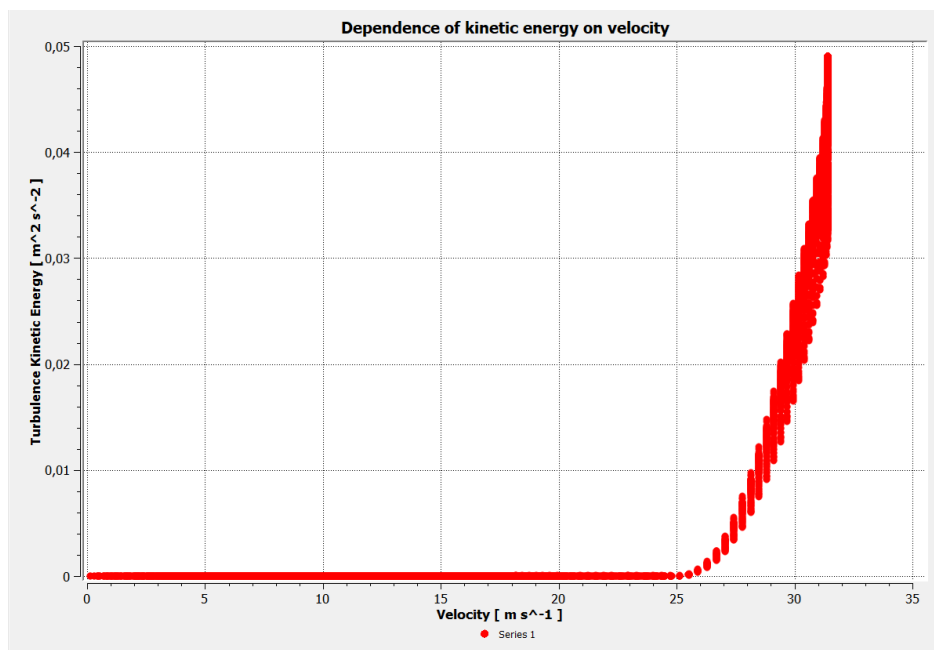


Рисунок 18 – График зависимости скорости к кинетической энергии турбулентности

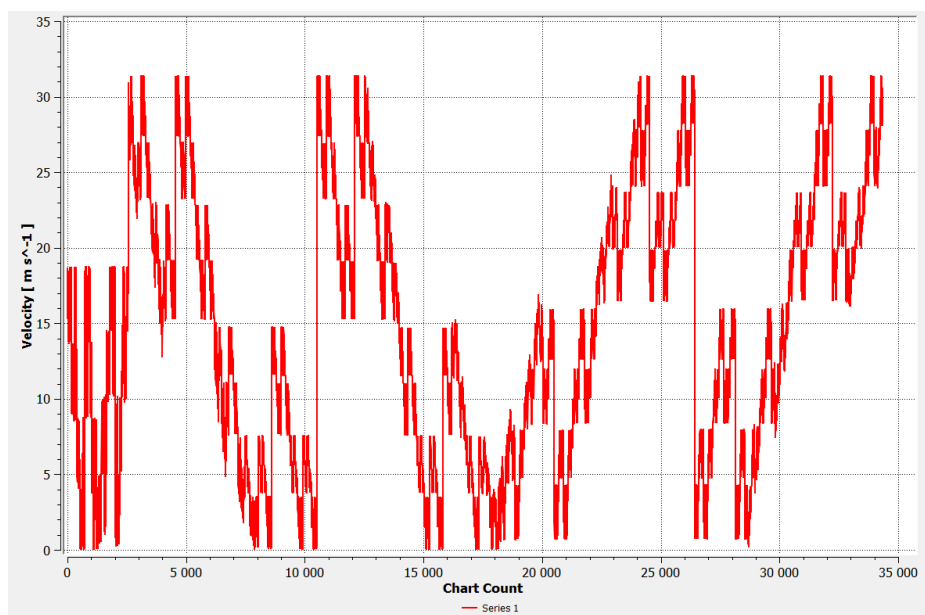


Рисунок 19 – График зависимости скорости по шагам

Глава 6. Технико-экономическое обоснование эффективности использования БЭУ

При рассмотрении количества источников органических отходов, было принято во внимание фермы, молочные фермы и мясокомбинат, а также их удаленность от предлагаемой биогазовой установки. Наилучшим решением оказался централизованный завод, который планируется построить вблизи самого крупного хозяйства выбранного кластера. Также предполагалось, что помимо органических отходов с ферм, данная биогазовая установка будет получать навоз и осадок сточных вод с мясоперерабатывающего завода, являющегося частью агропромышленного комплекса. Мой выбор остался на ферме.

Существуют четыре типа конфигурации анаэробного метантенка: закрытые лагуны, полная смесь, поршневой поток и фиксированная пленка. Большинство коммерчески доступных метантенков функционируют при мезофильных температурах, за исключением закрытых лагун, которые работают при температуре окружающей среды. Для данного исследования был выбран метантенк полного смешивания. Это единственная система, способная эффективно перерабатывать органический материал как от коров, так и от свиней в условиях холодного климата.

Расчетный общий объем биогаза возьмем к примеру 4000 м³/сутки, или 1460000 м³/год. Расчет технико-экономических показателей носит ориентировочный характер.

Биоэнергетическая установка состоит из четырех метантенков, у которых 4 насоса резервуаров хранения, 8 насосов метантенков, 4 мешалки метантенков, компрессор для удаления H₂S и компрессор двигателя указаны в Таблице 4.

Таблица 4 – Агрегаты, задействованные в биогазовой установке

Агрегат	Кол-во агрегатов, шт.	Мощность, кВт	Суммарная мощность, кВт	Время работы, ч / сутки	Энергия, кВтч / год
Электрическая энергия					
Насосы резервуаров хранения	4	4	16	4,0	23360
Насосы метантенков	8	11	88	2,0	64240
Мешалки метантенков	4	25,0	100,0	12,0	438000
Компрессор для удаления H ₂ S	1	3	3	24,0	26280
Компрессор двигателя	1	3	3	24,0	26280
Общая требуемая энергия					578160

Агрегат	Кол-во агрегатов, шт.	Мощность, кВт	Суммарная мощность, кВт	Время работы, ч / сутки	Энергия, кВтч / год
Электроэнергия от генератора			300	24	2628000
Избыток электроэнергии					2049840
Теплота					
Теплота на нагрев суточной дозы загрузки			400	24	3504000
Тепловые потери			195	24	1708200
Теплота на собственные нужды установки					5212200
Теплота от двигателя			600	24	5256000
Избыток теплоты					43800

Далее мы рассчитываем общую годовую выручку. Результаты указаны в Таблице 5.

Таблица 5 – Список годовых доходов

	(тонна/год)	тенге/тонна	тенге/год
Твердое удобрение	7000	20000	14000000
	кВтч/год	€/кВтч	
Чистая электрическая энергия	2049840	32,89	67419237
Общая годовая выручка			53419237

В итоге, с учетом годовых эксплуатационных расходов, и капитальных вложений вычисляем срок окупаемости. Результаты указаны в таблице 6.

Таблица 6 – Экономическая оценка биогазовой установки

Параметр	Значение
Капитальные затраты	400 000 000 тенге
Доходы	53 419 237 тенге
Годовые эксплуатационные расходы	15 000 000 тенге
Срок окупаемости	10,4 лет

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя текущие результаты, можно сделать вывод, что биоэнергетика в Казахстане находится на начальном этапе своего развития. Тем не менее, внедрение биоэнергетических установок в сельскохозяйственных районах страны имеет значительный потенциал для улучшения качества жизни сельских жителей. Такие установки могут обеспечивать население не только теплом и электричеством, но и создавать новые рабочие места, что особенно важно для сельских районов, где уровень занятости часто низок.

Более того, использование биоэнергетических ресурсов способствует устойчивому развитию и снижению зависимости от традиционных источников энергии, таких как уголь и нефть, которые имеют отрицательное воздействие на окружающую среду. Переход на биоэнергетику может способствовать снижению выбросов парниковых газов и улучшению экологической ситуации в сельских районах.

Таким образом, развитие биоэнергетики в Казахстане является важным шагом к устойчивому развитию сельских территорий, улучшению качества жизни населения и защите окружающей среды.

Практическая значимость полученных результатов

В результате проведенных работ был изучен потенциал биоэнергетики в Казахстане, методы интенсификации анаэробного сбраживания путем термического и электрического воздействия на субстрат. Также была смоделирована 3D-модель метантенка и проведена технико-экономическое обоснование эффективности биоэнергетической установки.

Данная работа проведена с целью поиска и применения новейших подходов, и следующим этапом необходимо продолжить исследования для нахождения путей решения задач через интеграцию новых методов.

В результате технико-экономического обоснования, срок окупаемости выходит 10,4 лет. Не смотря на свою долгую окупаемость, биоэнергетические установки не только преобразуют электро- тепловую энергию с помощью когенерационных установок, но и является экологически чистым, а также утилизатором отходов.

Получен опыт и видение в следующих шагах к продолжению работ над улучшением эффективности биогазовых установок, так и над популяризацией, также продолжение изучения альтернативных методов улучшения эффективности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Montt G. The future of work in a changing natural environment: climate change, degradation and sustainability / G. Montt, F. Fraga, M. Harsdorff. – Geneva: ILO, 2018.– 48 p
- 2 Chen, Y. Household biogas use in rural China: a study of opportunities and constraints/Y. Chen, G. Yang, S. Sweeney, Y. Feng // Renewable & Sustainable Energy Reviews. – 2014. – 14. – p.545–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.019.o>.
- 3 European legislative and financial framework for the implementation of smallscale biogas plants in agro-food & beverage companies / Begona Ruiz. – Paterna: AINIA, 2016.– 44p.
- 4 Renewable energy in the EU in 2018 [Электронный ресурс]. – Eurostat: Newsrelease, 2020.
- 5 A European strategy for smart, sustainable and inclusive growth. – Paris: European Commission, 2020. – 37p.
- 6 Share of energy consumption from renewable sources in Europe. – Paris: EEA, 2019.– 13p.
- 7 EU biodiversity strategy for 2030. – Brussels: COM,2020. – 23 p
- 8 Global potential of biogas / Sarika J. – London: World Biogas Association, 2019. – 56 p.
- 9 Appels L, Baeyens J. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- 10 Li, K. Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations/K. Li, R.H. Liu, C. Sun // Bioresource Technology. – 2015. – 198. – p.133–140
- 11 Abdesahian, P. Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia/P. Abdesahian, J.S. Lim, W.S. Ho, H. Hashim, C.T. Lee // Renewable & Sustainable Energy Reviews. – 2016. – 60. – p.714–723
- 12 HENAN STATISTICS YEARBOOK. – Beijing: ChinaStatistics Press, 2018. – 353 p.
- 13 Wang, Y. Biogas energy generated from livestock manure in China: Current situation and future trends/Y. Wang, Y. Zhang, J. Li, J. Lin, N. Zhang, W. Cao// Journal of Environmental Management. – 2021. – 297. – p.113324, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113324>
- 14 Chae KJ, Jang A, Yim SK, Kim IS. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. Bioresource Technology. 2018.– 99.
- 15 Daniel-Gromke, J. Current developments in production and utilization of biogas and biomethane in Germany/J. Daniel-Gromke, N. Rensberg, V. Denysenko, W. Stinner, T. Schmalfluss, M. Scheftelowitz, M. Nelles, J. Liebetrau // Chem. Ing. Tech.

– 2018. – 90. – p. 17–35

16 Salomon KR, Silva Lora EE. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass Bioenergy*. 2009;33:1101–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>

17 Riva C, Schievano A, D'Imporzano G, Adani F. Production costs and operative margins in electric energy generation from biogas. Full-scale case studies in Italy. *WasteManag*.2014;34:1429–35.<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.018>

18 Badmaev Yu.Ts. High-intensity technology of anaerobic processing of organic livestock waste in the conditions of the Republic of Buryatia: Scientific and methodological recommendations / Yu.Ts. Badmaev. – Ulan-Ude: Publishing house of the B.S.A. named after V.R. Filippov, 2014. – 104 p

19 Badmaev, Yu.Ts. The results of laboratory studies of the immobilization of methane-forming microorganisms on solid media / Yu.Ts. Badmaev, Yu.A. Sergeev // *Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov*. - 2017. - № 3(43). p. 70-77.

20 Badmaev Yu.Ts. Improving the technology of anaerobic processing of pig manure in the conditions of the Republic of Buryatia: diss. ... candidate of Technical Sciences: 05.20.01/ Yuri Tsyrendorzhievich Badmaev. – Ulan-Ude, 2018. – 151c

21 Patinvoh, R.J. Innovative pretreatment strategies for biogas production/R.J. Patinvoh, O.A. Osadolor, K. Chandolias, I. S'arv'ari Horv'ath, M.J. Taherzadeh // *Bioresource Technology*. – 2017. – 224. – p.13–24. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.083> .

22 Kadier, A., Jain, P., Lai, B., Kalil, M. S., Kondaveeti, S., Alabbosh, K. F. S., Abu-Reesh, I. M., & Mohanakrishna, G. (2020). Biorefinery perspectives of microbial electrolysis cells (MECs) for hydrogen and valuable chemicals production through wastewater treatment. **Biofuel Research Journal**, 25, 1128-1142.

23 Nozhevnikova, A.N. Syntrophy and interspecific electron transfer in methanogenic microbial communities/A.N. Kozhevnikova, Yu.I. Russkova, Yu.V. Litti, S.N. Parshina, E.A. Zhuravleva, A.A. Nikitina // *Microbiology*. – 2020. – vol.89.No. 2. – pp.131-151

24 Kazarinov, I. A. Conversion of organic waste into electrical energy using microbial electrochemical technologies/ I.A. Kazarinov, M.O. Meshcheryakova, L.V. Karamysheva // *Electrochemical energy*. – 2016. – Vol.16 (4).– pp. 207-225

25 Rousseau, R., Etcheverry, L., Roubaud, E., Basséguy, R., Délia, M-L., & Bergel, A. (2020). Microbial electrolysis cell (MEC): Strengths, weaknesses and research needs from electrochemical engineering standpoint. **Applied Energy**, 257.

26 Bo, T., Zhu, X., Zhang, L., Tao, Y., He, X., Li, D., & Yan, Z. (2014). A new upgraded biogas production process: Coupling microbial electrolysis cell and anaerobic digestion in single-chamber, barrel-shape stainless steel reactor. **Electrochemistry Communications**, 45, 67–70.

27 Kovalev, A., Kovalev, D., Panchenko, V., Kharchenko, V., & Vasant, P.

(2021). Way for intensifying the process of an-aerobic bioconversion by preliminary hydrolysis and in-creasing solid retention time. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (pp. 1195–1203). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68154-8_101

28 Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan - Fuel and energy consumption in households in the Republic of Kazakhstan (2022)

29 Li, Y. Enhanced nitrogen distribution and biomethanation of kitchen waste by thermal pre-treatment/Y. Li, Y. Jin, J. Li, Y. Nie // *Renewable Energy*. – 2016. – 89. – p. 380–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.029> .

30 Choi, O., & Sang, B. I. Extracellular electron transfer from cathode to microbes: Application for biofuel production. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 9, 1-14. (2016)

31 Доумчариева, Ж.Е. Расчёт скорости выхода технологического процесса сбраживания органического субстрата / Ж.Е. Доумчариева, Ж.Н. Нуржигитова, М.А. Байжарикова, Е.М. Бейшен // *Молодой учёный*. 2017.- №4.1.- С.39-41

32 Wołosiewicz-Głąb, M. Design of the electromagnetic mill and the air stream ratio model/M. Wołosiewicz-Głąb, D. Foszcz, S. Ogonowski // *IFAC-PapersOnLine*. – 2017. – 50. – p.14964-14969. 10.1016/j.ifacol.2017.08.2554

33 Мищенко, М.В. Активация технологических процессов обработки материалов в аппаратах с вращающимся электромагнитным полем/М.В. Мищенко, М.М. Боков, М.Е. Гришаев // *Фундаментальные исследования*. – 2015. - №2 (часть 16) – С.3508-3512.

34 Нгуен В. М. Разработка эффективных способов получения нанопорошков триады железа восстановлением из оксидных соединений в вихревом поле и тонких слоях: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.16.08/ Ван Минь Нгуен. – М., 2018. – 24с.

35 Blasco-Gomez, R., Batlle-Vilanova, P., Villano, M., Balaguer, M. D., Colprim, J., & Puig, S. On the edge of research and technological application: a critical review of electromethanogenesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 18, 874. (2017).

36 Geppert, F., Liu, D., van Eerten-Jansen, M., Weidner, E., Buisman, C., & Ter Heijne, A. Bioelectrochemical power-to-gas: state of the art and future perspectives. *Trends in Biotechnology*, 34, 879–894. (2016)..

37 Kovalev, A.A. The synergistic effect of the thickened digestate treatment in the vortex layer apparatus prior to its recirculation into the reactor on the characteristics of anaerobic bioconversion of organic waste / A.A. Kovalev, D.A. Kovalev, Y.V. Litti, I.V. Katraeva // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1652/1/012014>

38 Litti, Yu. Increasing the efficiency of organic waste conversion into biogas by mechanical pretreatment in an electromagnetic mill/Yu. Litti, D. Kovalev, A.

Kovalev, I. Katraeva, Yu. Russkova, A. Nozhevnikova // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012013>

39 Ковалев, А. А. Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя / А. А. Ковалев, Д. А. Ковалев, В. С. Григорьев // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 92–110. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.092-110>

40 СТ КазНИТУ-09-2023. Общее требование к построению, изложениям, оформлению и содержанию текстового и графического материала. Работы учебные. Алматы: КазНИТУ имени К. И. Сатпаева, 2023.-47с.

Приложение А

Статья в научный журнал «Вестник КазАТК» Том 130 № 1 (2024) на тему «Обзор перспективных технологических решений по использованию биогаза»

ҚазККА Хабаршысы № 1 (130), 2024
Вестник КазАТК № 1 (130), 2024
vestnik.alt.edu.kz

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802 (Online)

The Bulletin of KazATC
DOI 10.52167/1609-1817

УДК 62-611

DOI 10.52167/1609-1817-2024-130-1-449-458

Б. Онгар¹, Е.А. Сарсенбаев¹, А.Т. Егзекова², К.Б. Калымов¹, Е.Е. Сентбек²

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Логистика және көлік академиясы, Алматы, Казахстан

E-mail: b.ongar@satbayev.university

ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ БИОГАЗА

Аннотация. С точки зрения постоянного роста цен на основные энергопотребители и истощения мировых запасов углеводородов, все больше и больше государств разрабатывают альтернативные источники энергии. Одним из таких видов является биогаз. Несмотря на известные трудности, в Республике Казахстан проводятся подробные исследования в этой области. Основными недостатками биогазовой энергетики являются достаточный вес удельных капитальных затрат, низкая рентабельность проекта, энергия по централизованной сети. Однако спрос на биогазовые установки (БГ) в Казахстане велик как для мелких потребителей (емкость резервуара для метана 3-21 м³), так и для потребителей среднего размера (емкость резервуара для метана 30-100 м³). Когда отходы, включая органические вещества, тепло, воду, газ и воздух, перерабатываются в технологической производственной цепочке, комплексный подход к производственной деятельности оказывает минимальное влияние на качество воздуха, продуктивность региональных энергосистем. Такой подход не является новшеством. В основном, изменения эволюционные и революционные, а также в энергетическом секторе, взаимосвязаны, дополняют и часто заменяют друг друга. Не исключены случаи возврата к старому техническому решению, основанному на качественно новой технической базе.

Ключевые слова. Биогаз, альтернативная энергетика, анаэробная ферментация, удобрение.

Приложение Б

Статья в Научный журнал «Journal of Energy, Mechanical Engineering and Transport» №1(2) (2024) на тему «Перспективы биоэнергетики в Казахстане»



**Journal of Energy,
Mechanical
Engineering and
Transport**

ISSN 2576-7856 (ONLINE)
ISSN 2576-7857 (PRINT)

Настоящим подтверждаю, что статья автора К. Калымов «**Перспективы биоэнергетики в Казахстане**» принята для опубликования в № 1(2) 2024 года.

Ответственный секретарь редколлегии
Шаленов Е.О.
e.shalenov@satbayev.university

Приложение В

Сертификат об участии в научно-практической конференции 2023 г.

