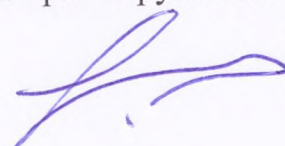


Федеральное государственное бюджетное образовательное
Учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Манигомба Жан Альберт

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА ПИРО-
И БИОГАЗОМ ДЛЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ В
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РЕСПУБЛИКИ БУРУНДИ**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор химических наук,
профессор Чичирова Наталия
Дмитревна

Казань – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО АЛЬТЕРНАТИВНЫМ ВИДАМ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА	19
1.1. Состояние исследований по производству биогазов	19
1.2. Состояние исследований по производству пиролизных газов	30
1.3. Постановка задач исследований	42
Выводы по главе 1	44
ГЛАВА 2. СРЕДСТВА И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИСХОДНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОВОГО ТОПЛИВА И ЛЕТУЧИХ ГАЗОВ	46
2.1. Средства и методика определения характеристик сырья для получения горючих газов	46
2.2. Средства и методика определения состава летучих горючих компонентов .	57
2.3. Средства и методика определения энергетических характеристик сырья для получения горючих газов	62
2.4. Оценка погрешностей измерений	65
Выводы по главе 2	74
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .	75
3.1. Описание экспериментальной установки и принципа ее действия	75
3.2. Экспериментальное определение характеристик исходного сырья и анализ результата	79

3.3. Экспериментальные исследования выхода летучих компонентов от различных условий протекания процесса пиролиза и анализ результатов ..	85
3.4. Выводы по главе 3	95
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА НА ПРОМЫШЛЕННОЙ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ	97
4.1. Описание технологического процесса получения биогаза на опытно-промышленной биогазовой установке	97
4.2. Экспериментальное исследование состава характеристик субстраты и биогаза, получаемого от них	99
4.3. Анализ экспериментальных исследований и практические выводы	105
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ БИОМЕТАНА НА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В РЕСПУБЛИКЕ БУРУНДИ ...	109
5.1. Рекомендации по модернизации дизель-генераторов для работы на биогазе и оценка технико-экономической эффективности	109
5.2. Рекомендации по модернизации карбюраторных двигателей для их перевода на биогаз и оценка технико-экономической эффективности	126
5.3. Расчет технико-экономических показателей и оценка экологической эффективности	129
Выводы по главе 5	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Проблема надежного обеспечения как промышленных, так и бытовых потребителей электрической энергией является актуальной и важной задачей для энергетической безопасности республики Бурунди. Установленная электрическая мощность электростанций республики составляет менее 100 МВт [132]. Электростанции связаны между собою линиями электропередач (ЛЭП) 110/70/35/10 кВ, но самым распространенным напряжением являются ЛЭП-30/35 кВ, которые составляют более 75% электрической сети, что положительно сказывается на ее стабильности в энергообеспечении потребителей.

Как следует из перспективных планов развития экономики Бурунди, потребность в электроэнергии из года в год будет возрастать и пропускной способности ЛЭП-110 кВ может не хватить, в связи с этим необходимо повышать или класс напряжения до 220/330кВ, или вводить в строй новые участки ЛЭП-110кВ, что и выполняется электроэнергетиками республики. Например, к 2023 году будет введена в эксплуатацию новая ЛЭП-110/70кВ от центральной подстанции «Gitega» до южной подстанции «Makamba» протяженностью более 50км и тем самым появится стабильная электрическая связь с соседними республиками – Руанда и Танзания, и Бурунди войдет в единое энергетическое кольцо Центральной Африки.

Динамика изменения выработки электроэнергии в Бурунди, начиная с 2008 г. и, согласно прогнозу до 2019 г, (рис. 1) [134], из года в год изменяется с частым верным отключением потребителей. Например, максимальная выработка электроэнергии была в 2018 г. и составила 316млн. кВт/ч, или около 7% необходимого количества [133].

Имеющиеся в Бурунди дизельные электростанции работают на привозном нефтяном топливе, из-за нехватки которого дизельные электростанции установленной мощностью 20,5 МВт вынуждены работать только 8 часов в сутки. В связи с тем, что ежегодные затраты на дизельное топливо составляют более 50 млн. дол., основным энергетическим топливом (более 94%) для населения республики является древесина и торф [164].

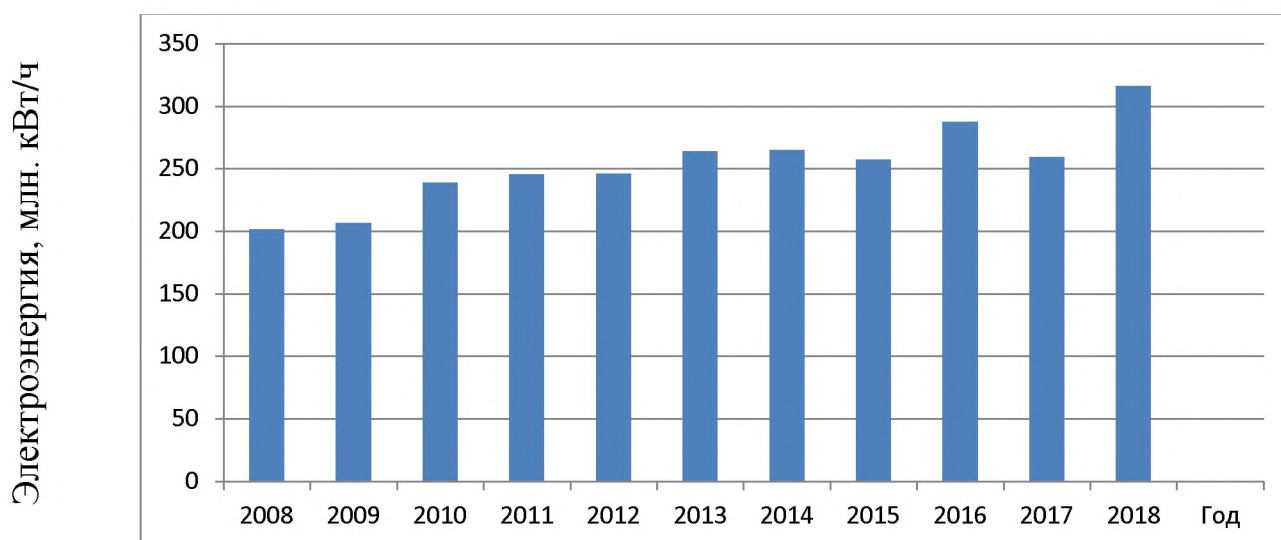


Рис. 1. Динамика изменения производства электроэнергии электростанциями республики Бурунди

Как следует из динамики изменения производства электроэнергии электростанциями республики Бурунди (рис. 1), суммарное годовое производство электроэнергии в республике сравнительно стабильно, без резких провалов и скачков, с максимальной выработкой в 316 млн. кВт/час, достигнутой в 2018 году. По прогнозам министерства энергетики эта тенденция может сохраниться и после 2023 года, когда республика Бурунди войдет в энергетическое кольцо Центральной Африки. Постоянный импорт электроэнергии из объединенной энергосистемы не позволит республике повысить свою энергетическую безопасность, в связи с этим необходимо иметь

свои местные и стабильные энергоресурсы, не связанные с импортом ни топлива, ни электроэнергии.

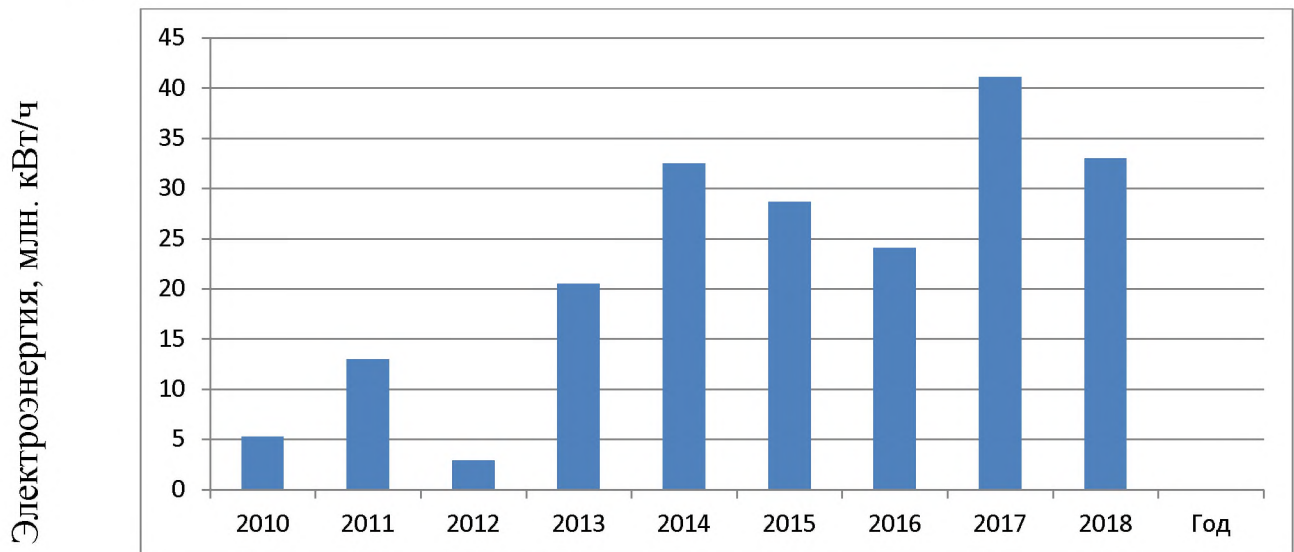


Рис. 2. Динамика выработки электроэнергии дизель-электрогенераторами на электростанциях республики Бурунди

На рис. 2. приведена динамика годовой выработки электроэнергии стационарными дизель-электрогенераторными электростанциями, работающими на импортируемом дизельном топливе. До 2010 года в республике не было дизель-электрогенераторных электростанций. В 2010 году после наладки были введены в эксплуатацию два дизель-электрогенератора, и в 2011 еще два - на электростанции «Вија-1». В 2012 году произошел «провал» в выработке, который был связан с отсутствием дизельного топлива и остановом одного из дизель-электрогенераторов, а также со снижением электрической нагрузки на втором генераторе.

При получении необходимого количества дизельного топлива энергетики республики смогли увеличить в 2013 году выработку электроэнергии почти в 10 раз, по сравнению с 2012 годом, и за счет ввода в эксплуатацию еще двух дизель-электрогенераторных электростанций - «Вија-2,3», был достигнут максимум выработки в 2017 году - более 40 млн. кВт/час. Снижение выработки в 2018 году было

связано с не допоставкой дизельного топлива в республику по вине поставщиков, которые без согласования с министерством энергетики Бурунди увеличили цены на топливо и его доставку.

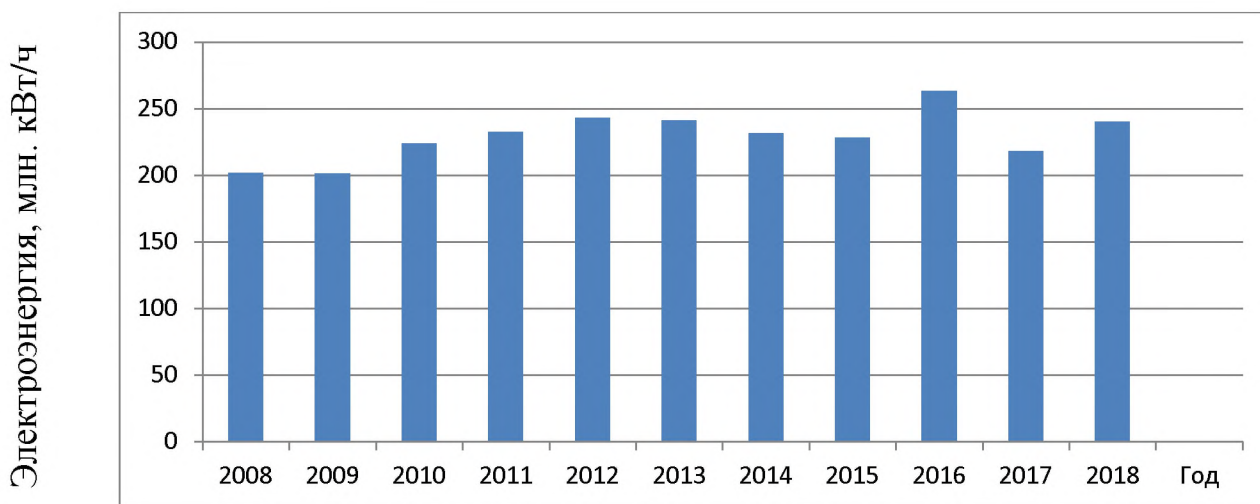


Рис. 3. Динамика выработки электроэнергии гидроэлектростанциями республики Бурунди

Из динамики, представленной на рис. 3, следует, что основную долю в республике Бурунди в выработке электроэнергии занимают 11 гидравлических электростанций (ГЭС), в основном работающих в режиме базовой электрической нагрузки. В 2017 году произошло снижение выработки электроэнергии в связи с аварийным остановом одной гидротурбины на ГЭС «Rwegura». В 2016 году был достигнут максимум выработки электроэнергии на ГЭС - почти в 260 млн. кВт/час. Это было вызвано повышенным уровнем в водохранилищах электростанций и увеличенным поступлением атмосферных осадков сверх среднегодовой нормы.

Как следует из карты электрических связей между электростанциями (рис. 4), электроэнергетический район из дизель-электрогенераторов, который сосредоточен в районе столицы республики Бужумбура и районах торфоразработок городов Нго-

зи, Гитега и Кирундо, имеющих электростанции, связаны между собою линиями электропередач (ЛЭП) 110/70/35/10 кВ.



Рис. 4. Карта электрических связей между электростанциями

Самыми распространенными являются ЛЭП-30/35 кВ, которые составляют более 75% электрической сети, что положительно сказывается на ее стабильности в

энергообеспечении потребителей. Также эти разнородные и разнотипные электростанции имеют электрическую связь с помощью системного автотрансформатора 110/35 кВ и через понижающие силовые трансформаторы, снабжающие электроэнергией потребителей.

К сожалению, электрический «небаланс» между потребителем и электрогенерирующими источниками может достигать 30-35%. Для контроля надежности электроснабжения потребителей энергосистема должна иметь сведения об основных показателях надёжности всех элементов электросети. Известно, что основными показателями надёжности ЛЭП является параметр потока отказов и среднее время восстановления, а также время вынужденного простоя, необходимое для восстановления и устранения одного отказа.

В связи с этим необходимо повышать электрическую надёжность работы энергосистемы республики Бурунди за счёт увеличения, как электрической её мощности, так и класса напряжения. Увеличение электрической установленной мощности энергосистемы республики напрямую зависит от энергетического топлива, которого в виде торфа и промышленных отходов вполне достаточно. В связи с этим в диссертации рассмотрена возможность его максимального применения на электростанциях и в быту как источника энергии.

В настоящее время планируется строительство шести новых гидроэлектростанций и трёх солнечных электростанций, общей электрической мощностью 167 МВт.

Но основной задачей, стоящей перед электроэнергетикой Бурунди и ее народным хозяйством, является поиск альтернативных источников энергии взамен дефицитному в республике углеводородному топливу. Как известно, бытовые промышленные отходы, а также растительная биомасса являются перспективными, экологически безопасными и альтернативными источниками возобновляемой энергии. Так, по оценкам специалистов, возможный годовой объем органических отходов в 2019-20 гг. составит около 145-150 тысяч тонн только в столице Бурунди.

Утилизация этих отходов в целях получения электроэнергии позволит решить и экологические проблемы. Полное и рациональное использование бытовых, а также сельскохозяйственных отходов, в результате которых образуется до 70% биомассы, могут успешно служить сырьем для получения как пиролизного газа, так и биогазов.

Перспективными способами переработки биомассы и превращения ее в различные виды энергии являются: термохимическая газификация, конверсия, «этанольная» ферментация и анаэробная переработка. Данные способы имеют низкие инвестиционные затраты и высокую энергетическую эффективность по сравнению с другими процессами переработки отходов, особенно при производстве в малых масштабах.

В процессе термохимической конверсии (пиролиза) биомассы доминирующими продуктами являются пиролизная жидкость и пиролизный газ, обладающие существенными преимуществами по сравнению с твердой биомассой, такими как высокая энергетическая плотность, стабильность состава при хранении, удобство использования и транспортировки. Метан, получаемый в виде пиролизного и биогаза при переработке биомассы, по своим физико-химическим и энергетическим свойствам вполне может заменить жидкое топливо для дизель-электрогенераторов энергосистемы, и тем самым улучшить экологичность республики Бурунди.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в развитие технологии термохимической конверсии (пиролиза) твердой биомассы с получением жидкого и газообразного топлива внесли ученые: Т.Г. Шендрик, М.Л. Щипко, С.А. Кузнецова, В.Е. Тарабанько, Т.В. Бухаркина, Н.Г. Дигуров, В.Е. Раковский, Н.И. Богданович, А.Н. Грачев, В.Н. Пиялкин, Н.И. Никитина, Р.Г. Сафин, А.В. Жидков, Ю.Л. Юрьев, Ю.Д. Юдкевич, В.Н. Козлов, С. Briens, F. Berruti, R. Graham, M. Gronli, M.J. Antal, A.V. Bridgwater, M.G. Rasul, M.I. Jahirul, Yoda S., Nitta Y. и др. Экспериментальные исследования анаэробных

процессов твердой растительной биомассы и получения из неё биогаза проводились учеными Н.Ф. Тимербаевым, Д.А. Пономаревым, Д.В. Ермолаевым, Г.Р. Мингалеевой, Б.В. Канторовичем, Г.Ф. Кузнецовым, В.В. Сергеевым, Ю.Л. Любиной, А.А. Гроо, А. Jafari, G. VanRossum, W.P.M. VanSwaai, M. Asadullah, M.A. Rahman, D. Mohan, Ch. Pittman, P.H. Jr. Steele, N. Prakash, T. Karunanithi, S.A. Raja, Z.R. Kennedy, B.C. Pillai и др. Однако комплексное исследование переработки растительной твердой биомассы методом термохимической конверсии и анаэробной переработки в условиях республики Бурунди практически не проводились, а имеющиеся исследования не позволяют оценить эффективность совокупности данных процессов, что подтверждает актуальность работы.

Объектом исследования являются энерготехнологические комплексы на основе дизель-электрогенераторов в энергетической системе республики Бурунди, включающие в себя пиролизную и биогазовую установки.

Предметом исследования является способ замещения жидкого топлива на пиро- и биогаз для производства электроэнергии дизель-электрогенераторами энергетической системы в республике Бурунди.

Цель диссертационной работы заключается в оценке эффективного применения пиролизного газа и биогаза в качестве топлива для дизель-электрогенераторов с целью снижения расходов жидкого топлива; в повышении надежности, экологичности и экономичности их работы по выработке электроэнергии в республике Бурунди.

Задачи исследования:

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Проведение анализа снижения экологичности, надежности и экономической работы электростанций республики Бурунди по выработке электроэнергии.
2. Разработка экологически чистого способа получения пиролизного и биогазов из отходов биомассы сельскохозяйственного и промышленного производства.
3. Исследование физико-химического состава полученного пиро- и биогаза из отходов сельскохозяйственного и промышленного происхождения.
4. Создание модели экологически чистых пиролизной и биогазовой установок для промышленного применения в условиях республики Бурунди.
5. Внедрение пиролизной и биогазовой установок для получения экологически чистого газообразного топлива и замещения им жидкого топлива в дизель-электродвигателях энергосистемы республики Бурунди.

Научная новизна:

1. Впервые экспериментально определены физико-химические характеристики как сельскохозяйственных, так и промышленных отходов в качестве энергетического топлива для дизель-электродвигателей энергосистемы республики Бурунди.
2. Впервые выполнено теоретическое обоснование экспериментальных исследований пиролиза различных проб биомассы в условиях преимущественного образования газовых и твердых продуктов.
3. Разработана методика проведения экспериментов для изучения пиролизного газа из твердой биомассы в зависимости от изменения температуры процесса конверсии.
4. Впервые проведены промышленные испытания полученного экологически чистого биогаза из жидких отходов производства пальмового масла на частном предприятии в городе Бужумбура республики Бурунди.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований в дальнейшем могут быть использованы для разработки способов промышленного применения пиролизного и биогазов в качестве экологически чистого топлива, как в промышленности, так и в быту.

Практическая значимость работы: результаты диссертации целесообразно использовать при проектировании энерготехнологических комплексов в энергосистеме республики Бурунди, заменяя дефицитное жидкое топливо на газообразное, что позволит улучшить финансово-экономические показатели электростанций, повысить их инвестиционную привлекательность при проведении работ по модернизации, реконструкции и техническому перевооружению, что в дальнейшем позволит повысить экологичность и технико-экономические показатели энергетической системы республики.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментальных исследований термохимической конверсии биомассы твердых отходов сельскохозяйственного происхождения.
2. Результаты экспериментальных исследований анаэробного процесса получения биогаза из биомассы жидких отходов промышленного производства пальмового масла.
3. Результаты оценки эффективности применения пиролизного и биогазов в качестве топлива в дизель-электрогенераторах энергосистемы республики Бурунди.
4. Результаты технико-экономической оценки и рекомендации по реконструкции топливной аппаратуры в дизель-электрогенераторах энергосистемы республики Бурунди.

Достоверность и обоснованность результатов работы обусловлены применением аттестованных методик и государственных стандартов, методик расчетов физико-химических процессов и применение в исследованиях достоверных справочных данных, а также сравнением полученных результатов с данными других авторов.

Личный вклад автора

Автор лично участвовал во всех этапах получения результатов, представленных в диссертации и публикациях: в анализе и сравнении теоретических и экспериментальных результатов; в подготовке докладов, выступлений на конференциях и написании статей.

Апробация работы

Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XII, XIII Международных молодежных научных конференциях «Тинчуринские чтения», 2017, 2018 гг., Казань, КГЭУ; XII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 2017 г., Иваново, ИГЭУ; VII МНТК «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике и промышленности» 2017 г., Ульяновск, УГТУ; XIX, XX аспирантско-магистерских научных семинарах, посвященных дню энергетика, 2015, 2016 гг. Казань, КГЭУ; Conférence au Ministère de l'Énergie et des mines de la République du Burundi du 2017 г.

Публикации

Основное содержание работы изложено в 11 научных публикациях.

В том числе: три статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, одна статья в журнале, индексируемом в международной базе Scopus, и пять публикаций в материалах всероссийских и международных научных конференций.

Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы» и охватывает следующие направления:

П.1 «Разработка научных основ исследования общих свойств, создания и принципов функционирования энергетических систем и комплексов, фундаментальные и прикладные системные исследования проблем развития энергетики городов, регионов и государства, топливно-энергетического комплекса страны»;

П.2 «Исследование и разработка нетрадиционных источников энергии и новых технологий преобразования энергии в энергетических системах и комплексах»;

П.4 «Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, программ и технологий по снижению вредного воздействия энергетических систем и комплексов на окружающую среду»;

П.6 «Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем и комплексов, на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы и приложения. Объем работы 152 страницы, работа иллюстрирована 37 таблицами и 31 рисунками. Библиографический список состоит из 167 наименований.

Содержание работы

Во Введении приведена общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, научная новизна, цель и основные задачи диссертационного исследования, описывается теоретическая и практическая значимость работы и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ научно-технической литературы по получению альтернативных видов горючих газов; анализируются способы получения пиролизного и биогазов из биомасс; показана технология производства биогаза из жидких отходов. Представлена постановка задач исследования.

Во второй главе выполнены теоретические обоснования экспериментальных исследований пиролиза различных проб твердой биомассы в условиях преимущественного образования газовых продуктов. Разработана методика проведения экспериментов для изучения пиролиза по выходу пирогазов в зависимости от температуры процесса конверсии. Представлены как теоретические, так и практические методы определения влажности, зольности и теплотворной способности изучаемого топлива. Экспериментально установлено, что для получения максимального выхода жидких и твердых продуктов пиролиза надлежащего качества из биомассы, температура процесса не должна превышать 600°C , а для выхода газообразной фракции не должна быть меньше 900°C . Показан метод определения влажности, летучих веществ, взвешенных твердых частиц в биомассе, ХПК и ХПБ.

В третьей главе приведена методика проведения экспериментальных исследований и обработка результатов процесса пиролиза биомассы из сельскохозяйственных и растительных (торф) отходов. Подробно изучен процесс пиролиза проб биомассы в подвижном слое, который проводился в пиролизе со шнековой подачей измельченного топлива, с внешним электрообогревом со скоростью нагрева $6-9^{\circ}\text{C}$ в мин. и в диапазоне температур от 450 до 1150°C .

Изученные виды биомассы имеют практически одинаковый элементный состав по углероду (С), водороду (H₂) и кислороду (O₂). Изучение закономерностей термохимических превращений: рисовой соломки, кофейной соломки и шелухи, торфа и древесины, которые наблюдаются при пиролизе и горении, проводилось также методом термического анализа - различные образцы сжигали в печи при различных (количеством восемь) значениях температур – 450, 550, 650, 750, 850, 950, 1050, 1150°C.

Результаты измерений были сведены в таблицы, на основании которых были построены графики (количеством пять).

Было применено два способа исследования образцов на выход летучих газов:

1. Способ для сырых образцов, при котором все образцы без высушивания помещали одновременно в холодную печь, нагревали до 450°C, выдерживали определенное время (в эксперименте t = пяти минутам), выключали печь, вынимали из нее все образцы, охлаждали в эксикаторе, взвешивали на аналитических весах, а затем опять помещали в печь, устанавливали нужную (из 8 значений) температуру, включали печь в работу. Но так как температура в печи уже понизилась, то в этом случае время сжигания могло увеличиться, поэтому засекалось время (t) от времени достижения печью нужной температуры.

2. Способ для отожженных образцов, когда высушенный образец, после определения его начальной влажности при первом способе, двумя параллельными навесками помещали отдельно от других в печь, предварительно нагретую до необходимой температуры, делали выдержку (t), вынимали образец из печи, охлаждали в эксикаторе и взвешивали на аналитических весах. Результаты замеров были сведены в таблицу, на основании которой были построены графики. Далее были проведены эксперименты по определению выхода синтез-газа при пиролизе твердой биомассы и определению его теплотворной способности.

В четвертой главе разработана технология производства биогаза и перспективы его применения в республике Бурунди. В настоящее время в городе Бужумбура

действует частный биогазовый мини-завод «Kirekura-Muzazi», производительностью около 0,65 м³ биогаза в час, использующий смесь коровьего, свиного навоза, отходов скотобойни, а также жмых от производства пальмового масла. Блок генерации биогаза, установленный на этом мини-заводе, состоит из четырех метантенков. Были проведены исследования физико-химических параметров жидких отходов мини-завода «Kirekura-Muzazi».

Исследуемые субстраты:

Эксперимент № 1: жидкие отходы от производства пальмового масла;

Эксперимент № 2: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и коровьего навоза;

Эксперимент № 3: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и свиного навоза;

Эксперимент № 4: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и отходов скотобойни (содержание рубца);

Эксперимент № 5: смесь жидких отходов от производства пальмового масла, коровьего навоза, свиного навоза и отходов скотобойни. Состав биогаза также был изучен и оценен лабораторным взятием проб на химический анализ непосредственно из метантенков. Установлено, что в полученном биогазе содержание метана составило около 70%.

В пятой главе представлено практическое применение продуктов пиролиза и биогаза в энергетике республики Бурунди.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО АЛЬТЕРНАТИВНЫМ ВИДАМ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

1.1. Состояние исследований по получению биогазов

В настоящее время имеет место развитие возобновляемых источников энергии в мире, что связано с ограниченными энергетическими запасами, включая невозобновляемые ресурсы, такие как: нефть, газ и уголь. С другой стороны, это связано с ростом негативного воздействия на жизнь человека выбросов парниковых газов. Это привело к неизбежному росту цен на нефть, газ и уголь.

Биоэнергетика может быть достигнута путем преобразования многих видов биотоплива, используемого для заправки двигателей автомобилей и древесных отходов, используемых при работе целлюлозно-бумажных комбинатов и в различных промышленных операциях.

Современная биоэнергия может быть получена из различных видов биотоплива и производится экологически чистым и эффективным образом из биологических и возобновляемых источников.

Биоэнергетика в настоящее время является одним из крупнейших источников возобновляемой энергии, способным обеспечить тепло, электроэнергию и топливо для транспорта.

Биоэнергия является формой энергии, получаемой из биологических возобновляемых ресурсов, таких как биомасса.

Биомасса - это растительный материал, который может превращаться в топливо (также известное как биотопливо, когда оно производится из биологического материала) для производства тепла или электричества.

Использование биомассы восходит к тому времени, когда человек открыл огонь и все еще использовал древесину для разогрева и приготовления пищи - это энергия, содержащаяся в растениях и органических веществах.

Существует несколько видов биотоплива:

1. Жидкое - биоэтанол, биодизель.
2. Твердое - дрова, брикеты, топливные паллеты, щепа, солома.
3. Газообразное - биогаз, биоводород.

Однако, из-за ориентации современной экономики на развитие энергоэффективных технологий, производство биогаза является наиболее перспективным направлением для производства биотоплива.

Внедрение биогазовых технологий для решения энергетических, агрохимических и экологических задач имеет наибольшую экономическую эффективность. В этом случае основным сырьем для производства биогаза являются отходы сельского и городского хозяйства.

Производство и использование биогаза относится к инновационным технологиям в области энергетики, энергосбережения и охраны окружающей среды. Известно, что биогаз является продуктом разложения органических веществ животного или растительного происхождения микроорганизмами в так называемых «анаэробных» условиях, т.е. в отсутствие кислорода. Этот процесс, также известный, как анаэробное сбраживание, происходит самопроизвольно на свалках, где, например, хранятся органические отходы, или искусственно - в метантенках (биореакторы).

В них могут быть переработаны сельскохозяйственные отходы или шлам от очистных сооружений. Биогаз, в основном, содержит в себе метан (CH_4) от 45 до 70% и диоксид углерода (CO_2), от 20 до 50%. Но он также содержит и агрессивные примеси, например, сероводород (H_2S), иногда достигающий по своей концентрации до 1,5-2,0%, который необходимо удалять из биогаза. Низшая теплотворная способность биогаза, содержащего около 60% метана, равна 22 МДж/м³. Горючей частью биогаза является метан, температура воспламенения которого составляет около 645°C, что равноценно природному газу.

В зависимости от биомассы, используемой для производства биогаза, можно выделить следующие виды биогаза:

1. Биогаз из метантенков, получаемый на городских очистных сооружениях (БГОС).

2. Биогаз, производимый в биогазовых установках при сбраживании сельскохозяйственных отходов (БПУССО);

3. Биогаз, получаемый при биоферментации из отходов содержащих органические компоненты (БПБОК).

Состав и количество биогаза не постоянны и зависят от типа обрабатываемого субстрата и технологии получения биогаза.

Средний состав биогаза в соответствии с приведенной выше классификацией показан в таблице 1.1. [149].

Таблица 1.1. Состав биогаза в зависимости от вида биомассы

Биогазовые компоненты	Содержание компонентов, в % к объему		
	БГОС	БПУССО	БПБОК
CH ₄	60-65	55-75	35-80
CO ₂	16-34	27-44	0-30
H ₂	-	0.01-0.02	От 0 до 3,6
H ₂ S	-	до 1,0	0-70

Содержание основного компонента топлива - метана в различных очистных сооружениях варьируется от 60 до 65% по объему. Высокая концентрация метана, в основном, наблюдается при обработке сельскохозяйственных отходов. При анаэробной ферментации из 1,0 тонны биомассы можно получить 500 м³ биогаза, что эквивалентно 350 л нефти [36].

Таблица 1.2. Влияние вида сырья на производство биогаза

Биомасса	Производство биогаза из 1,0 т сухого вещества, м ³	Содержание СН ₄ в биогазе, %
Трава	630	70
Ботва картофельная	420	60
Солома пшеничная	340	58
Животный навоз	200-300	60
Бытовой мусор	600	50
Фекальные отложения	250-310	60
Твёрдый осадок сточных вод	570	70

Теплотворная способность биогаза составляет 22-24 МДж/м³ (5500 ккал/м³). Отсюда, 1,0 м³ биогаза эквивалентен 0,6 м³ природного газа, 0,7 л мазута, 0,4 л бензина, 3,5 кг дров.

1.1.1. Мировой опыт по производству и использованию биогаза

В настоящее время во всем мире биогазовые технологии получили весьма широкое распространение, особенно в США, в странах Европейского союза, в Китае, Индия, в Бразилии.

Например, Германия является одним из лидеров по производству биогаза. Существует более 400 биогазовых установок, которые перерабатывают сельскохозяйственные отходы с варочными котлами от 600 до 800 м³.

В конце 1990-х годов в Германии было построено восемь биогазовых установок. По прогнозам, в этой стране 11% от общего потребления газа будет составлять биогаз.

Его потенциал для производства энергии из биогаза к 2020 году оценивается в 112 миллионов тонн биомассы, используемой для выработки 39,8 кВтч/год [149].

В Китае первые биогазовые установки появились на крупных фермах в 1940-х годах. С 1970-х годов при государственной поддержке ведутся серьезные исследования в области биогазовых установок. Сегодня Китай является мировым лидером по внедрению технологий производства биогаза в сельской местности. Более 31 млн. семей используют биогаз, и эта цифра продолжает расти. Типичная китайская установка имеет объем от 6 до 8 м³, производит 300 м³ газа в год, который стоит от 200 до 250 долларов. С 2002 г. правительство вкладывает около 200 миллионов долларов в год в развитие биогазовых установок. Около 50% стоимости установки компенсируется государством.

В конце 2006 года, в Китае 17 млн. биогазовых заводов с годовой производительностью 6,5 млрд. м³, что может заменить около 10 миллионов тонн условного топлива и накормить 50 миллионов жителей.

В настоящее время поставлена цель - достичь уровня 25 млрд. м³ биогаза к 2020 году, для обслуживания трехсот миллионов человек [149].

С 1940-х гг. в СССР проводились интенсивные исследования по производству биогаза. В 1948-1954 гг. была разработана и построена первая лабораторная установка для биометризации навоза коров (количеством десять), обеспечивающая выход 1 м³ газа в метантенке. Однако технология не получила широкого распространения.

Из-за энергетического кризиса в середине 1970-х годов интерес к энергосберегающим технологиям возрос, и в 1981 году Государственный комитет по науке и технике СССР создал специальный раздел по программе развития энергетики в биогазовой промышленности. Однако, из-за отсутствия материальной поддержки многие меры по контролю технологии обработки анаэробной биомассы не были реализованы. Тем не менее, несколько экспериментальных установок было создано. Крупнейшим центром развития объектов был Запорожский институт проектирования и технологии сельскохозяйственного машиностроения. Завод построил 10 биогазовых установок, но после распада СССР из 10 объектов - три установки нахо-

дятся на Украине и в Белоруссии, пять - в Центральной Азии и две - в России [11, 150, 36].

В настоящее время в Российской Федерации действуют 20 малых биогазовых установок. Например, в 2002 году на сельскохозяйственном предприятии Луховицкого района Московской области была установлена биогазовая установка объемом 65 м^3 . Также есть отдельные биогазовые установки, рассчитанные на 50- 200 кг органических отходов в день, которые производят от 2,5 до 12 м^3 биогаза в сутки.

Также известно, что в настоящее время в Бурундийском животноводстве и птицеводстве образовалось около 15 млн. тонн органических отходов, из которых можно получить около 6,0 млрд. м^3 метана (по расчетам Бурундийского университета, г. Бужумбура), при сжигании которого можно выработать более 19 млрд. кВт*ч электроэнергии, что, более, чем в 60 раз превышает современное производство электроэнергии в республике Бурунди [105].

При интенсивном подъеме сельскохозяйственного производства республики Бурунди через несколько лет общий объем производимых органических отходов может достигнуть 67,5 млн. т (по сухому веществу), при этом потенциальное производство биогаза может составить $22,5 \text{ млрд. м}^3/\text{год}$ [36, 11, 105].

1.1.2. Технология производства биогаза

Производство биогаза - один из лучших способов борьбы с глобальным потеплением, поскольку происходит захват метана в изолированных от атмосферы емкостях.

Ферментация метана происходит в температурном диапазоне от 0 до 70°C (оптимально $25-60^\circ\text{C}$). Поэтому, в странах с жарким климатом нет необходимости создавать специальные сооружения, достаточно накапливать навоз в ямах под колпаком, осуществлять газоотвод, сбор и накопление биогаза в соответствующих емко-

стях (газгольдерах). Например, такая технология широко применяется в Индии, Индокитае, на юге Китая. Среднесуточная выработка биогаза на таких «примитивных» установках составляет в сутки $0,15\text{--}0,3\text{ м}^3$ биогаза в биореакторе объемом 1 м^3 . Общая схема производства биогаза представлена на рисунках 1.1, 1.2.

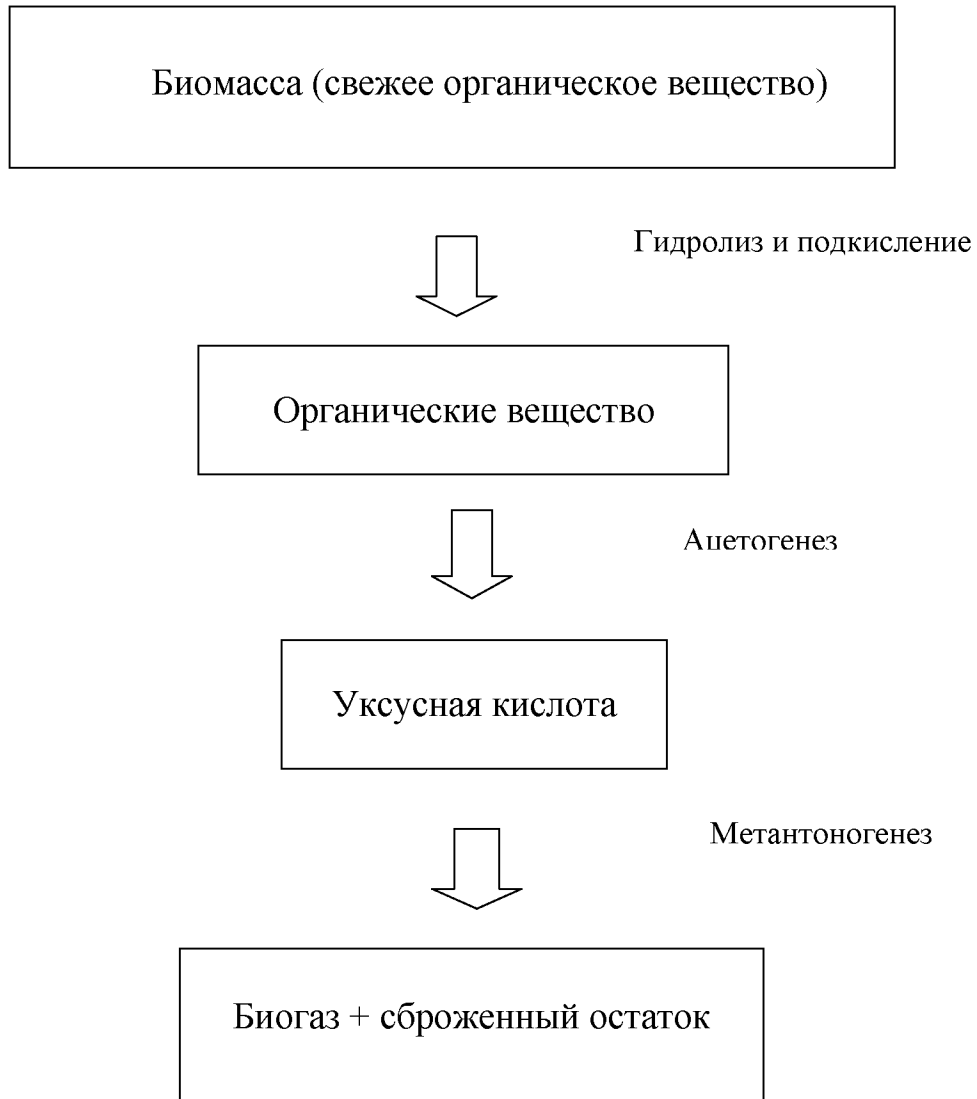


Рис. 1.1. Процесс производства биогаза

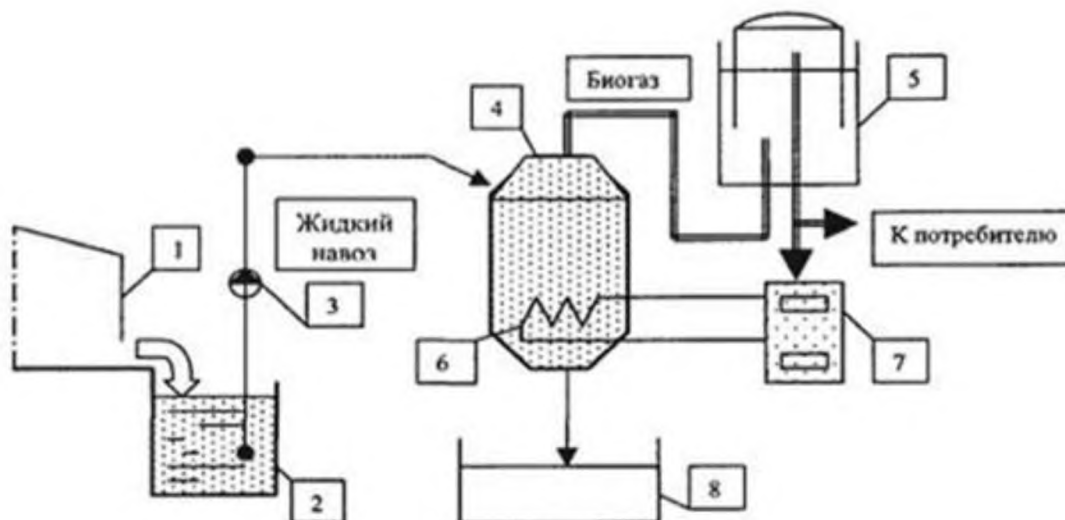


Рис. 1. 2. Биогазовая установка

На рисунке 1.2 представлена биогазовая установка состоящая из: 1 - ферма; 2 - приемный резервуар; 3 - насос; 4 - биореактор (метановая цистерна, ферментатор); 5 - газгольдер; 6 - теплообменник; 7 - котел; 8 – резервуар для хранения удобрения.

Принцип работы биогазовой установки (рис. 1.2) следующий. Вначале сырье поступает в биогазовую установку из фермы (1), смешивается и измельчается до получения полужидкой гомогенной массы в приемнике (2). Далее масса нагревается до 70°C не менее одного часа с целью уничтожения вредоносных бактерий. После охлаждения сырье перекачивается насосом (3) в биореактор (метантенк, ферментатор) (4), где оно подвергается анаэробному брожению при температуре 38°C . Процесс получения биогаза длится примерно один месяц.

Существуют два режима брожения: мезофильный (при $25-38^{\circ}\text{C}$, оптимальная температура, при которой работают мезофильные бактерии - 37°C) и термофильный (при $45-60^{\circ}\text{C}$, оптимальная температура, при которой работают термофильные бактерии - 56°C). Для улучшения брожения добавляют катализаторы. Для интенсификации процесса брожения установлен паровой котел, подающий греющий, насыщенный пар с температурой $100-104^{\circ}\text{C}$ и давлением насыщения $1,2$ атм. В результате та-

кого подогрева температура биомассы в метантенке (4) повышается от 0 до 70°C, в зависимости от ее состава. Рекомендуется перемешивание субстрата в ферментаторе с целью предупреждения образования в верхней части слоя всплывающего вещества и корки. Биогаз под собственным давлением (не более 0,5 атм) через газовый штуцер и конденсатор подается в газгольдер (5), затем используется либо для сжигания в бытовых приборах, либо для производства электрической и тепловой энергии в когенерационной энергоустановке (рис. 1.2) [36].

Полностью автономный, энергонезависимый биореактор потребляет 10–25% вырабатываемого газа для своих нужд. Это требуется для осуществления термостатирования и перемешивания. Сброженная масса через штуцер удаления эвакуируется и накапливается в бункере-отстойнике.

Все известные биогазовые установки сходны по своему строению. Основными элементами установки являются: реактор для биомассы (метантенк), газгольдер, нагревательное устройство, устройство для перемешивания субстрата, система загрузки сырья (биомассы).

Биогазовые установки различаются по: форме метантенков, способам перемешивания и подогрева биомассы.

Биогазовые установки, использующие методы смешивания и нагревания биомассы, делятся на четыре основных типа:

- без подвода тепла и без перемешивания;
- без подвода тепла, но с перемешиванием сброженной биомассы;
- с подводом тепла и перемешиванием биомассы;
- с теплоснабжением, с перемешиванием биомассы, применением контроля и управления процессом ферментации.

Варочные котлы могут иметь различную форму. Существуют овальные цилиндрические резервуары с конической верхней и нижней частями, резервуары в форме параллелепипеда и резервуары в форме траншеи, врезанные в землю. Каждый

из этих типов имеет свои преимущества и недостатки. Наиболее распространенными являются цилиндрические метантенки.

В зависимости от технических характеристик биогазовые установки также подразделяются на несколько типов систем: накопительные, периодические и непрерывные.

1.1.3. Производство биогаза

В процессе анаэробной ферментации важной характеристикой отходов являются: влажность, рН и температура субстрата. Большинство действующих биогазовых установок работают не на моносбраживании, а на смеси субстратов, состоящей из множества компонентов.

Содержание метана в получаемом биогазе, в первую очередь, зависит от следующих условий:

1. От ведения технологического процесса с соблюдением условий метаногенеза, компенсации потерь активной биомассы путем увеличения времени обработки;
2. От поддержания для хорошего массообмена требуемой концентрации субстрата (6-12%) и своевременного выведения продуктов жизнедеятельности микроорганизмов;
3. От размеров частиц – чем меньше частицы, тем больше общая поверхность твердой массы. Это повышает скорость биохимических реакций метаногенерации, так как увеличивается доступность бактерий субстрата, благодаря облегчению диффузионных процессов;
4. От присутствия в субстрате вредных соединений, подавляющих жизнедеятельность метанобразующих микроорганизмов, состава питательных веществ субстрата и их количества. Должно обеспечиваться оптимальное содержание биогенных веществ углерода, кислорода, водорода, азота, серы и фосфора для функционирования существующих и появления новых бактерий. Кроме того, при длительном культивиро-

вании в биореакторах происходит наращивание биомассы микрофлоры и ее специализация по данному субстрату и конкретным физико-химическим условиям среды, поэтому метаногенное сообщество очень чувствительно к колебаниям состава субстрата;

5. От продолжительности сбраживания, время которой должно быть больше времени удвоения микробной ассоциации. Выход биогаза зависит от численности и сбалансированности метаногенного биоценоза. Недостаточно долгое пребывание субстрата в анаэробных условиях приводит к его неполной переработке, излишне долгая переработка уменьшает массу утилизированного сырья и ведет к экономическим потерям;

6. От температурного режима – психрофильного (до 25°C), мезофильного (2-39°C), термофильного (51-56°C) и его постоянства [149].

Вместе с тем, существующие технологии и оборудование еще не обеспечивают получение биогаза из выбранного субстрата с максимально возможным выходом, т.к. превращению в биогаз подвергаются только 30-60% органических соединений при уменьшении содержания общего углерода на 15- 30%, а количество метана в биогазе достигает лишь 60-70% [36].

Для увеличения этих показателей анаэробная ферментация нуждается в термофильных условиях его проведения, что требует затрат значительной части получаемой энергии. Кроме того, при более высокой температуре выход метана уменьшается из-за различий в растворимости и образования газообразного диоксида углерода. Чем большее количество CO_2 перейдет в газообразную форму, тем меньше будет процентная доля CH_4 в биогазе. Повышению выхода биогаза способствует также применение энзимов, ускоряющих разложение органических веществ.

В биореакторе должно обеспечиваться оптимальное содержание летучих жирных кислот (50–500 мг/л), необходимое для активной сбалансированной жизнедеятельности микробного сообщества в биореакторе, кроме того, необходимо периодическое перемешивание.

В настоящее время разработано и применяется достаточно много технологий получения биогаза, основанных на использовании различных вариаций температурного режима, влажности, концентраций бактериальной массы, длительности протекания биореакций и т.д.

Для практической работы важную роль математическое моделирование режимов метаногенерации и работы биогазовых установок, которое успешно проводится зарубежными и отечественными исследователями.

Принципиальные различия в методах работы различных установок в основном состоят: в консистенции субстрата (твердое сырье или жидкое), в способе подачи сырья (порционно или проточным методом), в типах смешивания субстратов (полное смешивание или пробочное проталкивание), в количестве реакторов [149].

1.2. Состояние исследований по производству пиролизного газа

С учетом постоянного роста цен на нефть, возникает проблема получения более дешевого топлива, в качестве которого могут быть использованы отходы производства [75]. Немаловажное значение имеет тот факт, что отходы производства являются единственным видом топлива, возобновляемым в больших объемах, в то время, как запасы горючих ископаемых ограничены. В большинстве случаев они либо сжигаются, либо складываются, что приводит к загрязнению окружающей среды. Следует также отметить, что переработка биомассы и ее отходов не ведет к увеличению в атмосфере диоксида углерода и не вызывает ее загрязнение оксидами серы. Таким образом, атмосфера в меньшей степени загрязняется различными вредными веществами, чем при сжигании мазута, угля и природного газа. Это благоприятно повлияет на экологическую обстановку страны [3, 12].

На протяжении многих тысячелетий человечество использовало биомассу как источник пищи, энергии и как строительный материал.

Биомасса может обеспечить большие объемы полезной энергии, менее воздействуя при этом на окружающую среду, по сравнению с ископаемым топливом.

Именно поэтому многие годы ведутся многочисленные исследования по созданию систем для переработки и конвертации биомассы в тепловую и электрическую энергию, твердое, жидкое и газообразное топливо, а также другие химические продукты [67, 50, 100, 57, 37, 20, 28, 15, 19, 37].

Масштабное использование биомассы также вызвано необходимостью уменьшения вредных воздействий на окружающую среду, как на местном уровне, так и глобально [67].

Пиролиз и другие процессы термохимической конверсии представляют собой эффективные способы утилизации биомассы, что особенно актуально для энергетически дефицитной республики Бурунди. Растущая зависимость многих стран, и в частности, республики Бурунди, от импорта нефти, природного газа, а также потребность в улучшении экологической обстановки, определяют направление новой энергетической политики правительства Бурунди, ориентированной на использование возобновляемых источников энергии [67, 50, 100].

Известны многочисленные проекты использования биомассы [67, 50, 100, 57, 37, 20, 28, 15, 19, 37, 6], однако, темпы развития коммерческого ее применения невысоки. Чтобы максимально развить преимущества технологии термической конверсии и минимизировать ее недостатки, необходимо проводить масштабные экспериментальные исследования.

Растущий интерес к оптимизации существующих реакторов для реализации различных технологий термического разложения биомассы в контролируемых условиях требует создания различных технических устройств и разработки технологий переработки биомассы как сырья, с тем, чтобы создать условия для эффективной реализации соответствующих термохимических процессов.

В этом контексте необходимо более глубокое понимание основных закономерностей термического разложения лигноцеллюлозных материалов [67, 50, 100, 57,

37, 20]. Особенно важна возможность использования промышленных и бытовых отходов как продуктов биомассы и заменителя природного газа, жидких моторных топлив и угля, а также возможность интенсивного воспроизводства растительного сырья во многих странах с благоприятным климатом для роста различных видов сельскохозяйственных культур, особенно в Восточной Африке, в частности, в республике Бурунди. Но в настоящее время нет оснований утверждать, что эти перспективные, по общему мнению, технологии обеспечат замену хотя бы 5% традиционных энергоносителей даже в нескольких наиболее продвинутых в этом направлении странах [50, 100, 57, 37, 20, 28, 15, 19, 37, 6, 18].

Такое, парадоксальное, на первый взгляд, положение является, по мнению автора диссертации, объективным. Проблемы внедрения биотехнологий в промышленное производство обусловлены тем, что до настоящего времени не разработаны научные основы высокотемпературной конверсии биологического сырья для целей его дальнейшего использования как в энергетике, так и в других отраслях промышленности.

Многочисленные частные экспериментальные данные по условиям и режимам пиролиза биосырья являются, очевидно, недостаточными для разработки технологий, обеспечивающих высокое качество конечных продуктов и экономическую эффективность технологических процессов термической конверсии биомассы (торфа, сельскохозяйственных и древесных отходов), а также промышленных и бытовых отходов, объемы возможного использования которых достаточно велики [57, 37, 20, 28, 15, 19, 37, 6].

Отсюда очевидна целесообразность и необходимость фундаментальных исследований превращений, протекающих при нагреве биомассы до температур интенсивных физико-химических процессов, происходящих в ней. Также, установление закономерностей этих превращений при регулируемом термическом разложении биомассы может стать базой для создания экономически эффективных технологий её конверсии.

1.2.1. Разработка технологии пиролиза

Пиролиз был использован при производстве огня, примерно 7000 лет назад для плавки меди, но первое использование пиролиза для производства древесного угля было зафиксировано более 5500 лет назад в южной Европе и на Ближнем Востоке [19].

С началом бронзового века, примерно 4000 лет назад, использование пиролиза для производства древесного угля уже было распространено [37].

Выход энергии при пиролизе определяется содержанием воды в исходном начальном составе твердой биомассы.

Кроме того, значительная доля углерода в биотопливе не выделяется в виде диоксида углерода [19, 37]. Пиролиз происходит при относительно низких температурах (обычно в диапазоне от 300 до 550°C) [6].

В конце процесса пиролиза остается углерод в качестве твердого остатка.

Высокие температуры пиролиза могут вызывать полимеризацию, что приводит к образованию крупных молекул, включая ароматические и алифатические соединения, а также, к дополнительному термическому разложению некоторых компонентов биотоплива.

Однако большинство технологий пиролиза используются для производства древесного угля из биомассы, которая затем используется в качестве восстановителя в металлургии, в качестве активированного угля при абсорбции шлака после химической обработки, а также в процессе приготовления пищи [18].

Теплотворная способность пиролизных газов сопоставима с теплотворной способностью угля.

Биомасса может быть использована в качестве источника пиролизного жидкого топлива, которое после незначительной очистки может быть успешно использовано в качестве топлива для ДВС, карбюратора и дизельного цикла.

Уголь от пиролиза биомассы можно использовать не только в качестве топлива, но и для улучшения фертильности [103, 59].

Основные потоки углерода, связанные с пиролизом биомассы, представлены на рисунке 1.3 [102]. Следует отметить, что использование энергии биомассы или продуктов ее пиролиза в качестве замены энергии ископаемого топлива приводит к снижению выбросов углекислого газа по сравнению с использованием ископаемого топлива.

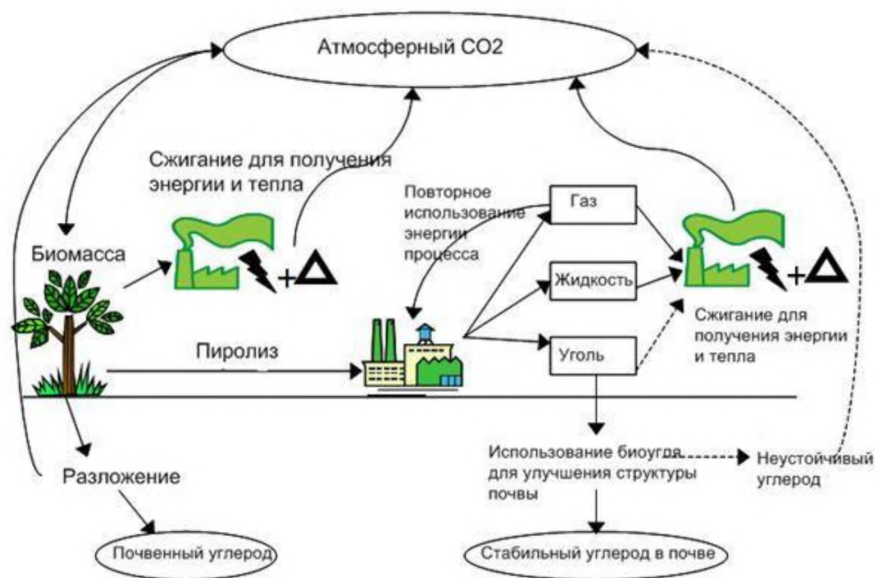


Рис.1.3. Потоки углерода с пиролизом твердой биомассы.

1.2.2. Основные типы пиролиза твёрдой биомассы

Процесс термического разложения считается наиболее перспективным, так как он эффективен экономически для преобразования биомассы в биотопливо [37].

Из четырех основных термохимических методов превращения твердой биомассы: пиролиз, сжижение, газификация и сжигание, пиролиз является наиболее перспективным.

Твердую биомассу и отходы трудно утилизируемых сельскохозяйственных культур и древесины можно относительно легко использовать для производства товарного топлива.

Медленный и быстрый пиролиз (или быстрый пиролиз) различаются по составу и количеству получаемого сырья. Применение пиролиза на практике представлено в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Диапазон основных рабочих параметров процесса пиролиза [53].

Пиролиз	Скорость нагрева, °C/ с	Температура пиролиза, °C	Размер частиц, мм	Основная фракция
Медленный	<<1	400-600	5-50	Биоуголь, пирогаз, биомасло
Быстрый	10-200	500-650	<1	75% биомасла, 12% углеродные остатки, 13% пирогаз
Флеш- пиролиз	1000	650-1000	<0,2	80% биомасло, 20% пирогаз

1.2.2.1. Меденный пиролиз твердых биомасс

На рисунке 1.4 представлена сводная информация о пиролизе твердых биомасс [53]. Треугольная схема на рисунке 1.4 показывает процессы, происходящие во время традиционного медленного пиролиза, когда жидкость и газы собираются в реторте.

Исходя из полностью твердого исходного материала при комнатной темпера-

туре, после достижения 250°C , твердая масса составляет 88%, менее 10% жидкости и всего несколько процентов газа. Между 300°C и 350°C «волна» пиролиза обычно начинает двигаться в биомассе, и доля твердых веществ быстро уменьшается до 60% от первоначальной массы, жидкость увеличивается с 20% до 30% и газ - от 15% до 25% [19].

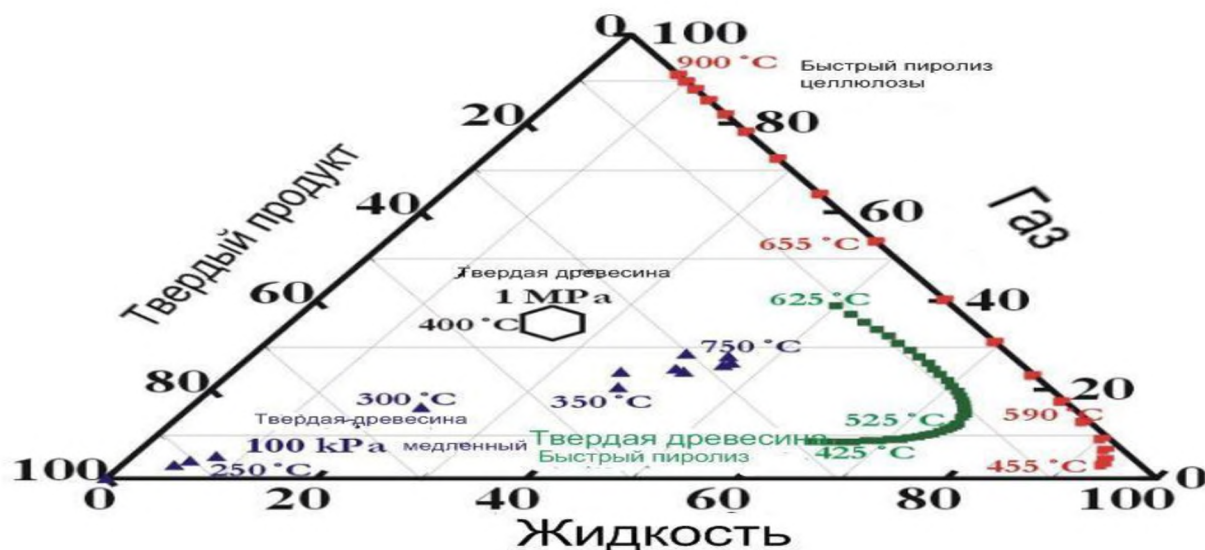


Рис. 1.4. Обобщение информации о медленном пиролизе твердых биомасс

1.2.2.2. Быстрый пиролиз твердых биомасс

Исследования быстрого пиролиза твердых биомасс для производства бионефти начались примерно 35 лет назад [14]. Такие методы включали термоконверсию малых образцов для получения газовых и жидких продуктов пиролиза [32, 2].

Примерно 80% от первоначальной массы биотоплива превращается в жидкий продукт, который содержит почти 12% воды [80].

При 500°C жидкие продукты (дизельное топливо) составляют примерно 95%. При температуре 900°C отсутствуют твердые продукты и жидкие продукты превращаются в пиролизный газ [80, 46, 131].

Существуют условия процесса быстрого пиролиза твердых биомасс для производства дизельного топлива и пиролизного газа, такие как:

1. Высокие потоки тепла;
2. Хорошо контролируемая температура;
3. Быстрое охлаждение и конденсация пиролизных газов для получения дизельного топлива.

Диаграмма типичного процесса быстрого пиролиза представлена на рисунке 1.5 [21].

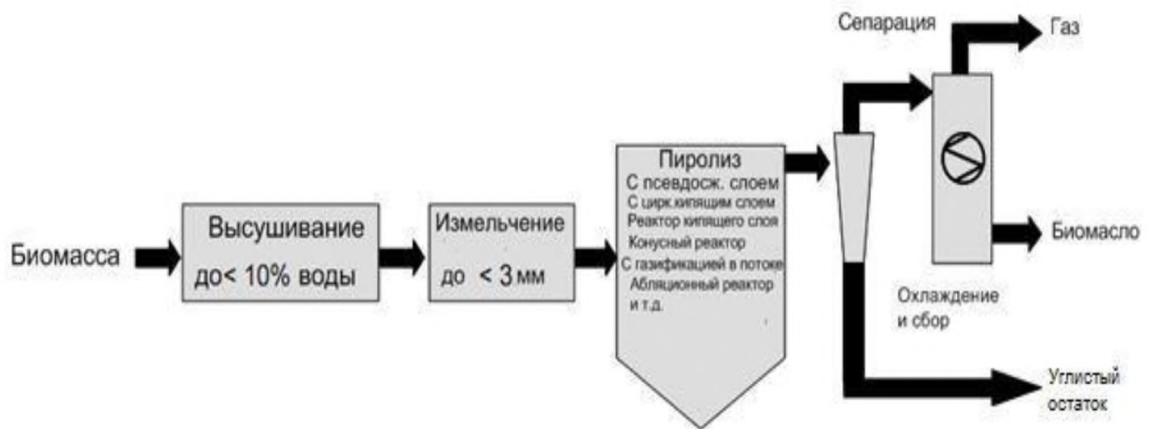


Рис. 1.5. Схема быстрого пиролиза

1.2.2.3. Флэш-пиролиз твердых биомасс

Процесс флэш-пиролиза твердых биомасс совпадает с быстрым пиролизом, но при температуре выше 650°C [46, 131, 148, 1, 131].

1.2.3. Топливная технология второго поколения твердых биомасс

Биотопливо из твердых биомасс можно получить с помощью двух различных

процессов: биохимической и термохимической конверсии [44, 156, 80]

Технология пиролиза дает возможность получения топлива из растительной биомассы [110].

Пиролизный газ с преимущественным содержанием углеводородных компонентов (что приводит к высокой теплотворной способности) используется, как правило, в качестве источника энергии [17, 31, 127], например, как показано на рисунке 1.6.

Авторы [31, 69, 96, 118] обнаружили, что количество газа, образующегося в процессе пиролиза, является достаточным для поддержания процесса без дополнительных источников энергии. Как правило, такой газ имеет теплотворную способность приблизительно 13-15 МДж/м³ (природный газ - 37 МДж / м³) [5, 8, 82].

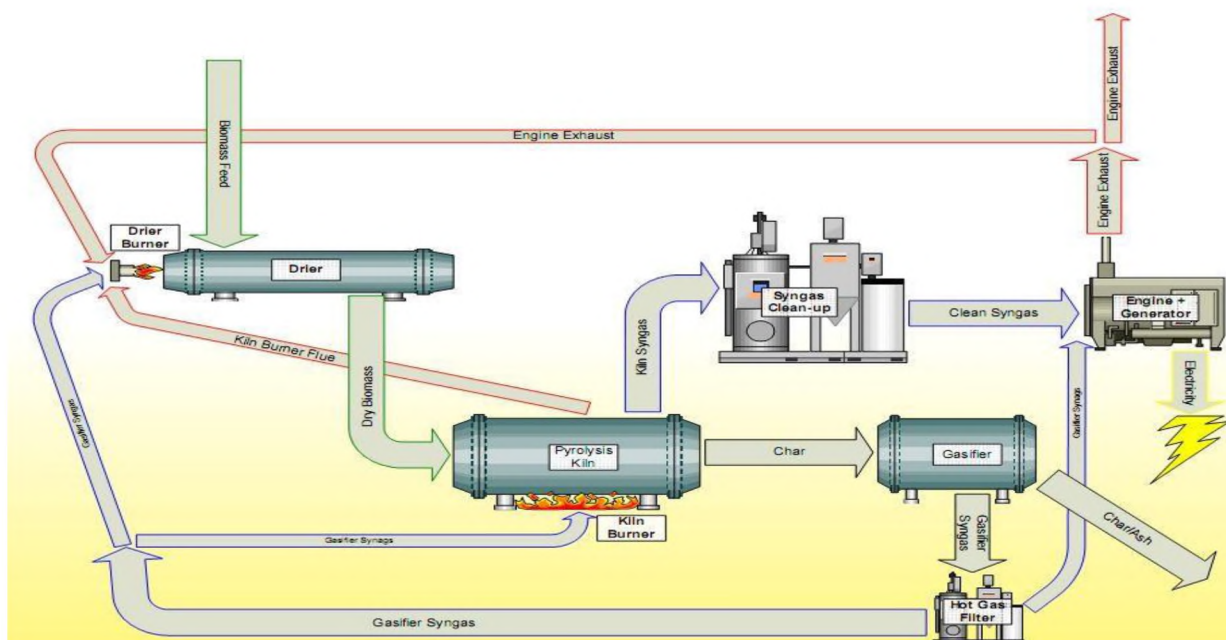


Рис. 1.6. ДВС на пиролизном газе

Большинство очищенных пиролизных газов можно использовать в качестве источника энергии в печах, в качестве топлива для промышленных паровых котлов и

все чаще в качестве газообразного топлива в двигателях внутреннего сжигания (ДВС).

В 2009 г. Wang S. и другие [151] экспериментально исследовали термическое разложение двух разновидностей биомасс «яшень» и «монгольская сосна» с различным содержанием лигнина, результаты исследования приведены на рисунке 1.7.

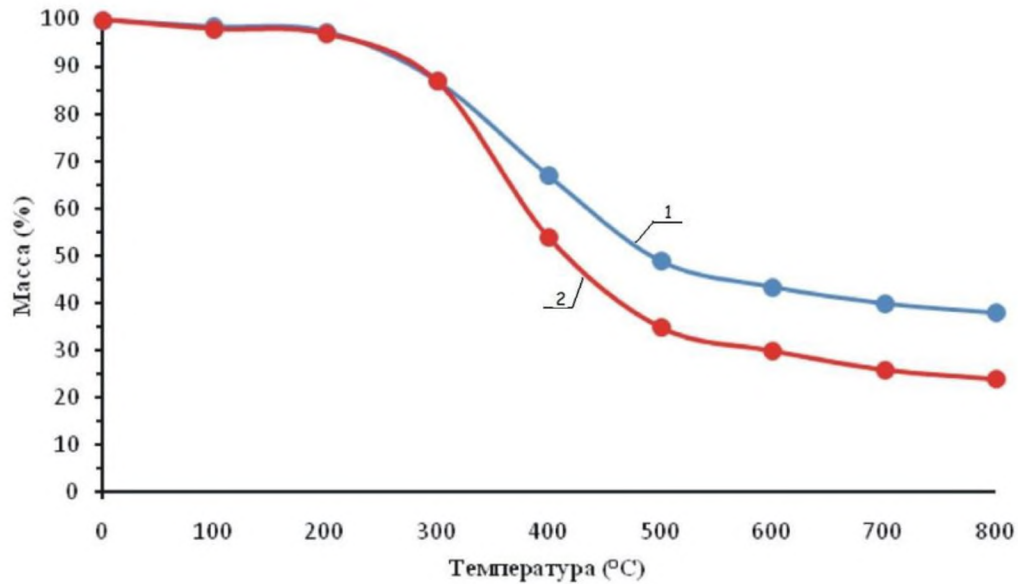


Рис. 1.7. Тепловая деградация лиственной древесины растения в процессе пиролиза: 1- яшень, 2- монгольская сосна

В целом, процесс термического разложения растительной биомассы можно условно разделить на четыре основных этапа следующим образом.

Первый этап начинается при 100°C. На этом этапе масса образца биомассы уменьшается, главным образом из-за испарения влаги. Затем потеря массы происходит из-за термического разложения гемицеллюлозы при температуре 150-260°C, в зависимости от типа твердой биомассы. Основное разложение твердой биомассы происходит на третьем этапе при температуре 300-600°C [6, 53, 48, 69, 28, 40, 141].

1.2.4. Основные результаты экспериментальных исследований по пиролизу твердой биомассы

За последние два десятилетия многие исследователи изучали пиролиз различных видов твердых биомасс, которые были подвергнуты пиролизу в различных условиях для получения биоугля, жидких и газообразных продуктов [58, 85].

Результаты различных исследований пиролиза твердой биомассы, связанных с определением химического состава и некоторых свойств продуктов пиролиза, были систематизированы с учетом используемых условий пиролиза и представлены в таблице 1.4.

В [85] приведены исследования пиролиза древесных опилок с использованием реактора при различных температурах, результаты которых показали, что продукты пиролиза древесины можно разделить на три группы: 25,1% по массе газа, 44,3% по массе жидкостей и 30,6% твердых продуктов.

Основным составом жидких продуктов являются уксусная и муравьиная кислоты, а также пиролизные газы - CO_2 , CO и CH_4 . Экспериментальные результаты показали, что состав продуктов пиролиза зависит от температура [85].

Например, в [94] сообщается об исследованиях пиролиза сельскохозяйственных остатков и щепы в радиационной печи при различной интенсивности излучения, при температурах 650-1000°C. Результаты исследования показали, что, увеличение температуры нагрева приводит к уменьшению твердого остатка и, тем самым, к увеличению выхода пиролизного газа.

Авторы [144] изучали теплопередачу в слое твердых биомасс при медленном пиролизе, а также процесс изменения толщины слоя твердой биомассы. Было установлено, что эндотермический процесс деградации происходит при температуре 200-300°C. В [115] приведен пиролиз опилок. Эксперименты проводились при температуре 450-800°C.

В результате исследования было установлено, что максимальное количество летучего вещества было получено при 450°C.

Например, авторы [104, 164] изучали влияние условий пиролиза на структуру и свойства продуктов газификации биомассы *Pinusradiata*, эвкалипта *Maculata* и выжимки из них. В результате эксперимента было установлено, что условия пиролиза значительно влияют на морфологию карбонизированного остатка, полученного из биомассы.

McHenry M.P. и его сотрудники [92, 112] изучали характеристики твердого остатка, полученного при пиролизе эвкалипта при различных температурах и скоростях нагрева, а также влияние морфологических изменений на общую реакционную способность кислорода. Пиролиз проводили при низкой скорости нагрева в реакторе в неподвижном слое.

Таблица 1.4. Таблица, обобщающая результаты различных исследований пиролиза биомассы

Тип образца биомассы	Тип пиролиза	Реактор	Продукт пиролиза (масса), %			Авторы
			Твердые	Жидкие	Газообразные	
Рисовая шелуха	Медленный	Реактор с неподвижным слоем	40	23	35	Natarajan и др. [119, 146]
Рисовая солома	Быстрый	Плазменный	33,5	0	66,5	Tu и др. [146]
Хлопковые отходы	Медленный	Шихтовый	22	28	50	Aquino и др. [41, 49, 55, 55, 56, 128, 145]
Стебель кукурузы	Быстрый	Проволочный реактор	20	8	60	Zabaniotou и др. [157]
Пальмовое масло	Медленный	Реактор с неподвижным слоем	10	20	64,5	Yang H. и др. [154]

Тип образца биомассы	Тип пиролиза	Реактор	Продукт пиролиза (масса), %			Авторы
			Твердые	Жидкие	Газообразные	
Подсолнечник	Медленный	Проволочный реактор	30	10	45	Zabaniotou и др. [158]
Люцерна сизая, Reed canarygrass, Easterngama, grass	Быстрый	PY-GC/MS	5-10	65-80	0	Boateng и др. [64, 145, 154]
Жмых Jatropha	Медленный	Реактор с неподвижным слоем	28,6	43	17,6	Raja и др. [129]
Рапс	Медленный	Реактор Хайнце	~23	46	~17	Sensoz и др. [138]
Семя граната	Медленный	Реактор с неподвижным слоем	27,8	52	20	Ucar and Karagoz [147]
Выжимки сахарного тростника	Медленный	Реактор с неподвижным слоем	22,8	59,5	17,82	Asadullah и др. [42]

1.3. Постановка задач исследования

Основной задачей исследования является поиск альтернативных источников энергии взамен дефицитному в республике Бурунди углеводородному топливу.

Как известно, бытовые и промышленные отходы, растительная биомасса являются перспективным, экологически безопасным и альтернативным источником возобновляемой энергии.

По оценкам специалистов возможный годовой объем органических отходов в 2019-20 гг. в столице Бурунди составит около 145-150 тысяч тонн [131, 132]. Утилизация этих отходов в целях получения электроэнергии позволит решить и экологические проблемы.

Полное и рациональное использование бытовых, а также сельскохозяйственных отходов, в результате которых образуется до 70% биомассы, могут успешно служить сырьем для получения как пиролизного газа, так и биогаза.

Перспективными способами переработки биомассы и превращения ее в различные виды энергии являются: термохимическая газификация, конверсия, этанольная ферментация биомассы и анаэробная переработка. Данные способы имеют низкие инвестиционные затраты и высокую энергетическую эффективность по сравнению с другими процессами переработки отходов, особенно при производстве в малых масштабах.

В процессе термохимической конверсии (пиролиза) биомассы доминирующими продуктами являются пиролизная жидкость и пиролизный газ, обладающие существенными преимуществами по сравнению с твердой биомассой, такими как высокая энергетическая плотность, стабильность состава при хранении, удобство использования и транспортировки. Метан, получаемый в виде пиролизного- и биогаза при переработке биомассы, по своим физико-химическим и энергетическим свойствам может заменить жидкое топливо для дизель-электрогенераторов энергосистемы, и тем самым улучшить экологичность республики Бурунди [25, 119].

При выполнении работы были поставлены следующие задачи:

1. Проведение анализа причин снижения экологичности, надежности и экономичности работы электростанций республики Бурунди по выработке электроэнергии.
2. Разработка экологически чистого способа получения пиролизного и биогаза из отходов биомассы сельскохозяйственного и промышленного производства.
3. Исследование физико-химического состава полученного пиро- и биогаза из отходов сельскохозяйственного и промышленного происхождения.
4. Создание экологически чистой модели пиролизной и биогазовой установок для промышленного применения в условиях республики Бурунди.

5. Внедрение пиролизной и биогазовой установок для получения экологически чистого газообразного топлива и замещения им жидкого топлива в дизель-электрогенераторах энергосистемы республики Бурунди.

Выводы по главе 1

На основании анализа состояния электроэнергетики Бурунди и обобщения, полученных многими исследователями результатов по закономерностям регулируемого термического разложения растительной биомассы, можно сделать следующие выводы:

1. Развитие электроэнергетики Бурунди путем проектирования и строительства новых типов электрогенерации является необходимым условием роста экономики страны и подъема благосостояния населения.

2. В настоящее время в Бурунди сложилась критическая ситуация с энергетическими мощностями и собственной выработкой электроэнергии из-за топливного кризиса.

3. Использование отходов органического происхождения позволит с помощью пиролиза и биогаза получать горючие газы для работы дизель-электрогенераторов энергосистемы республики Бурунди.

4. Получаемые при пиролизе сопутствующие фракции процесса в виде древесного угля, полукокса и синтетической нефти позволят решить топливную проблему в бытовом секторе республики.

5. Установлено, что для группы конкретно исследованных материалов состав продуктов пиролиза зависит от условий нагрева (температуры и скорости ее роста) в инертной атмосфере.

6. Быстрый нагрев приводит к повышению доли твердого остатка в продуктах пиролиза.

7. Нет опубликованных результатов обобщения экспериментальных данных,

которые бы позволили сделать обоснованное заключение о подобии (или о сходстве) механизмов термического разложения различных видов растительной биомассы и, соответственно, зависимости состава продуктов пиролиза от температуры и скорости ее изменения.

8. Не установлена связь выхода продуктов пиролиза со структурой или параметрами растительной биомассы, характеризующими ее состав или структуру.

9. Отсутствуют результаты теоретических исследований процессов как медленного, так и быстрого пиролиза растительно-древесной биомассы в условиях инертной атмосферы.

10. Не установлены оптимальные технологические параметры реализации конкретных технологий (толщина слоя измельченной биомассы, температура, скорость нагрева, длительность выдержки, тепловые потоки в зоне пиролиза, условия отвода и складирования продуктов пиролиза).

ГЛАВА 2. СРЕДСТВА И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИСХОДНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОВОГО ТОПЛИВА И ЛЕТУЧИХ

2.1. Средства и методика определения характеристик сырья для получения горючих газов

Целью диссертационного исследования является установление основных закономерностей регулируемого термического разложения нескольких видов твёрдой и жидкой биомассы при достаточно высоких температурах. При этом целесообразным является выделение энергетического топлива в результате исследований, соответствующих каждому материалу параметров, определяющих выход конечных продуктов: температуры выхода максимального количества определенных продуктов, диапазонов температур полной конверсии, темпов нагрева образца и др.

Решение этой задачи возможно при реализации традиционного многофакторного эксперимента с воспроизведением основных условий протекания исследуемого процесса на практике, т.е. основных параметров процесса термического разложения твёрдых биомасс. Составление плана экспериментальных исследований в соответствии с положениями теории планирования эксперимента создает условия для повышения достоверности результатов измерений и сокращения объема экспериментальных, стендовых исследований или, что особенно важно, полупромышленных испытаний. Но применение современных методов планирования экспериментальных исследований (например, составление факторных планов) предполагает обязательное наличие определенного минимума сведений о связях между исследуемыми факторами.

Анализ литературы (глава 1) по рассматриваемой проблеме показал, что пока нет достоверных сведений о характере зависимостей между основными факторами планируемого эксперимента. Можно только предположить, что на выход конечных

продуктов определенного состояния влияют: температура, темп нагрева пробы, вид пробы биомассы.

Но факторный план гарантирует получение в результате минимального количества опытов достаточных значений коэффициентов в регрессивных уравнениях. Более того, проведение экспериментов с использованием факторных планов возможно только при определенных и достаточно конкретных теоретических представлениях об изучаемом процессе пиролиза. Если же характер зависимостей между основными исследуемыми факторами заранее не известен, то использование факторного плана может привести к ошибочным результатам.

Так, например, применительно к исследованным процессам регулируемого термического разложения твердой биомассы возможно наличие локальных экспериментов для получения зависимостей доли жидких или газообразных продуктов от температуры. Поэтому использование моделей первого порядка при составлении планов эксперимента будет необоснованным, исходя из физических представлений о возможных вариантах развития процесса термической конверсии твердой биомассы. Соответственно, наиболее обстоятельным будет использование, при составлении планов эксперимента, классической многофакторной схемы последовательного проведения опытов в выбранном пространстве факторов. На основании проведенного анализа литературы (глава 1) по медленному пиролизу твердой биомассы можно сделать вывод о целесообразности проведения экспериментальных исследований, необходимых для решения задач диссертации.

При планировании опытов ставились следующие задачи:

- 1) создание условий для оценки случайных погрешностей измерений;
- 2) обеспечение минимальных величин систематических ошибок и исключения грубых ошибок;
- 3) сохранение стабильности свойств образцов исследовавшихся разновидностей твердой биомассы во всей серии экспериментов;

4) обеспечение минимальных отклонений, характеризующих условия эксперимента (постоянство влажности, давления и температуры воздуха в помещении лаборатории);

5) обеспечение адекватности воспроизводства размеров и конфигураций образцов в опыте.

Из анализа литературы (глава 1) можно сделать вывод, что основной характеристикой процессов регулируемого термического разложения твердой биомассы является состав продуктов термической конверсии. Поэтому, функцией цели в планируемых экспериментах был выбран состав конечных (к определенному моменту времени, соответствующему достижению фиксированной температуры) продуктов (твердых, жидких и газообразных) пиролиза.

Основными варьируемыми факторами, определяющими этот состав, являются: температура образца в конце единичного эксперимента, темп нагрева биомассы и диапазон изменения температуры. Выбор изменения температур осуществлялся методом последовательных приближений при достижении условий полной конверсии. Значения темпа нагрева выбирались исходя из реальных возможностей установок для промышленной термической конверсии твердой биомассы.

Интервалы изменения температур выбирались исходя из условий, обеспечивающих максимальную достоверность результатов эксперимента. При исследовании использовались основные разновидности твердой биомассы, перспективной для использования в Бурунди. Также при выборе биомассы ставилась цель получения максимально возможного диапазона изменения ее структуры как исходного сырья для выводов о влиянии индивидуальных свойств биомассы на выход конечного продукта.

При проведении экспериментов поддерживалась постоянная начальная температура образцов. Все эксперименты проводились в закрытом помещении при постоянных давлении, влажности и температуре воздуха. Для регистрации температуры образца использовались термометры с диаметром спая не более 0,2 мм.

В предварительных экспериментах было установлено, что, несмотря на высокие требования к стабильности условий проведения единичного эксперимента по всем значимым факторам, некоторое рассеяние экспериментальных данных имело место. По этой причине число опытов при фиксированных факторах выбиралось не менее трех. Далее рассмотрим методику проведения экспериментальных исследований.

Зададимся необходимыми требованиями к твёрдой биомассе в процессе пиролиза:

- высокая теплотворная способность;
- высокий выход летучих веществ;
- низкая остаточная зольность;
- низкая исходная влажность.

2.1.1. Метод определения зольности топлива

Зольность - это массовая доля золы, содержание в процентах негорючего (на безводную массу) остатка из твердого топлива при его полном сгорании. Обозначается символом A . Для практических целей значение зольности, определённое по аналитической пробе (A_a), обычно пересчитывается на сухую массу M_s или рабочее M_r состояние топлива.

Для всех типов твёрдых топлив зольность — это один из основных показателей качества топлива.

На показателе зольности твердого топлива основывается большинство существующих методов оценки эффективности процессов обогащения твердого топлива. Существует прямая связь между зольностью твердого топлива и теплотой его сгорания.

Стандартный метод определения зольности твердого топлива заключается в полном сжигании пробы (озолении), прокаливании зольного остатка до постоянной

массы при температуре $815 \pm 10^\circ\text{C}$ и определении массы образовавшейся золы. Метод может выполняться по двум вариантам, отличающимся скоростью озоления и, следовательно, общей продолжительностью анализа (медленное и ускоренное озоление). В обоих случаях зольность определяют в аналитической пробе твердого топлива, доведенной до воздушно-сухого состояния. При медленном озолении тигли с навесками топлива помещают в холодную муфельную печь, затем постепенно поднимают в ней температуру до 500°C в течении 60 мин и поддерживают эту температуру также в течении 60 мин. Далее продолжают нагрев печи до $815 \pm 10^\circ\text{C}$ и выдерживают при этой температуре не менее 60 мин.

Сущность метода ускоренного озоления с естественной вентиляцией заключается в постепенном продвижении лодочек с навесками топлива в нагретую до $815 \pm 10^\circ\text{C}$ печь. Лодочки помещают на пластинку из жаропрочного материала, устанавливая ее (пластинку) на откинутую крышку печи так, чтобы первый ряд лодочек находился у края печи, и выдерживают в таком положении 3 мин. Затем пластинку продвигают внутрь муфельной печи со скоростью 2 см/мин, закрывают дверцу печи и прокалывают зольные остатки твердого топлива (например, торфа) 20-25 мин.

Зольность аналитической пробы топлива A (масса в процентах) в обоих методах вычисляют по формуле (2.1) [166]:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} 100\%, \quad (2.1)$$

где:

m_1 - масса тигля, г;

m_2 - масса тигля с пробой, г;

m_3 - масса тигля с золой, г.

2.1.2. Определения влаги в пробах

Проба разравнивается на взвешенном противне так, чтобы на 1 кубический дециметр поверхности приходилось не более 100 г пробы. Противень с пробой взвешивается с точностью до 0,05% навески и ставится для свободной сушки в помещение с хорошей вентиляцией или в сушильный шкаф при температуре 50°C при повторяющемся перемешивании пробы до тех пор, пока расхождение между двумя взвешиваниями в течение последних двух часов будет не более 0,1%. Длительность предварительной сушки не должна превышать восемь часов.

Содержание влаги воздушно-сухого топлива определяется по лабораторной пробе крупностью не более 3 мм и осушкой ее при температуре от 105° до 110°C.

Содержание общей влаги определяют двухступенчатым методом, как содержание внешней влаги и влаги воздушно-сухого топлива.

Содержание влаги аналитической пробы определяется как потеря массы этой пробы после высушивания в сушильном шкафу.

Содержание влаги в воздушно-сухом топливе и влаги аналитической пробы (W_a) в процентах вычисляют по формуле (2.2) [167]:

$$W = \frac{m_1}{m} 100\%, \quad (2.2)$$

где:

m_1 - потеря массы при сушке навески топлива, г;

m - масса навески пробы топлива, г.

Теперь рассмотрим вариант экспериментальных исследований получения биогаза из проб.

В результате анализа анаэробного процесса в метантанках планируется установить, что, если субстрат будет состоять из сбалансированного субстрата, вклю-

чающего необходимые питательные вещества, а также инокулят, содержащий анаэробные микроорганизмы, то процесс выделения биогаза будет более интенсивным. С этой целью нами проведены исследования физико-химических параметров жидких отходов.

2.1.3. Определения взвешенных твердых частиц (MES) в пробах

Известно, что взвешенные твердые частицы (MES) - это минеральные и органические частицы, присутствующие в природной или загрязненной воде. Они могут состоять из частиц песка, земли и отложений, оторванных эрозией, различного мусора, приносимого сточными водами или дождевой водой, планктонными живыми существами (включая водоросли), которые являются не растворимыми в воде.

Обилие взвешенных твердых частиц в воде способствует уменьшению прозрачности и снижает биологическую активность из-за снижения концентрации растворенного кислорода в результате уменьшения эффекта фотосинтеза.

MES будем определять путем фильтрации через волокнистый фильтр. Измерение MES фильтрацией основано на принципе двойного взвешивания: объем воды фильтруется через взвешенную пустую мембрану. Отношение разности массы сухого остатка к объему отфильтрованной воды дает концентрацию MES в миллиграммах (на литр).

Для фильтрации воды применим оборудование для вакуумной фильтрации:

- фильтры из стекловолокна WattmanGFC (ячейка 0,5 мм);
- мерные колбы (50, 100, 200, 500 мл).

Через мембрану GFC проводим фильтрацию раствора объемом в 1,0 л. Процесс фильтрации длится не менее 0,5 час.

Мембрана восстанавливается после фильтрации, затем помещается в духовку при 105°C на 1,5 ч., чтобы удалить избыток воды её выпариванием.

Взвешенная высушенная мембрана имеет массу M_1 .

Соотношение между разницей в массе и фильтруемым объемом дает концентрацию материалов в образце [24]:

$$C_{MES} = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (2.3)$$

где:

C_{MES} - концентрация взвешенных твердых частиц в мг/л;

M_0 - масса мембраны до фильтрации, г;

M_1 - масса мембраны после фильтрации, г;

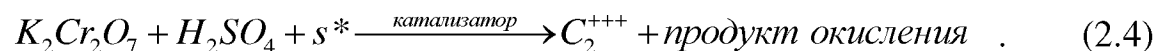
V - отфильтрованный объем образца, г.

2.1.4. Определения химического показателя кислорода (ХПК) в пробах

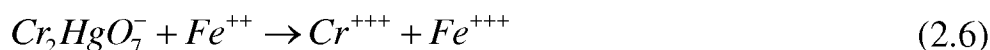
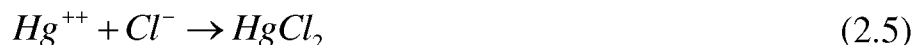
Известно, что присутствие кислорода активно влияет на окислительные процессы в биомассе, поэтому определим его содержание и назовем его концентрацию.

Рассмотрим принцип определения ХПК. Вещества в субстрате окисляются дихроматом калия в кислой среде и в присутствии катализаторов, что позволяет избежать возможного влияния хлоридов. Избыток вводимого дихромата определяется восстановителем, сульфатом железа, поэтому можно отслеживать количество дихромата, потребляемого окисляемыми материалами.

Окисление веществ, присутствующих в субстрате описывается следующей формулой (2.4) [54]:



Чтобы избежать окисления ионов хлорида, используем сульфат ртути (II) [158]:



Использовались следующие химические реагенты и оборудование. Химические реагенты:

- концентрированная серная кислота;
- разбавленная серная кислота;
- раствор сульфата серебра в концентрированной серной кислоте;
- раствор сульфата аммония-железа;
- кристаллы сульфата ртути, г;
- раствор 0,04 г/л дихромата калия;
- ферроионовый раствор.

Оборудование:

- рефлюксное устройство;
- колбы на 250 мл;
- пипетка объемная - 5 мл;
- бюретка - 25 мл;
- пробирки 10 мл, 20 мл;
- рампа отопления;
- магнитная мешалка.

Для проведения эксперимента необходимо было гомогенизировать образец и ввести его в колбу объемом 250 мл. К 10 мл образца добавлялись 0,4 г сульфата ртути, 5,0 мл дихромата, 15 мл концентрированной серной кислоты. Пробирка медленно встряхивалась круговыми движениями, устанавливалась на лед.

Для титриметрического анализа вводится в колбу Эрленмейера несколько капель окислительно-восстановительного индикатора изменения кислотности (pH) химического раствора ферроина, и раствор титруется раствором железа 2+, пока синезеленый цвет не станет красновато-коричневым.

2.1.5. Определения биохимического кислородного показателя в пробах

Биохимическая потребность в кислороде (БПК₅) является выражением количества кислорода, которое используется для разрушения разлагаемого органического материала в результате биохимических процессов. Определение БПК₅ используется для оценки концентрации органических загрязнителей на входах и выходах биологических очистных сооружений, то есть для измерения их производительности.

Измерение БПК₅ производится в респирометре типа WARBURG (Германия). При измерении 30 мл субстрата помещается в инкубационный сосуд объемом 300 мл, соединенный с ртутным манометром с крышкой, снабженной датчиком давления (манометр) анализатора БПК₅, типа OxiTopWTW (Германия). Измерительное устройство типа IS 602 помещается в холодильник, поддерживающий внутреннюю температуру 20°C. Затем в течение пяти дней ежедневно измеряется потребление кислорода.

Окисление органического вещества вызывает образование CO₂, который будет улавливаться раствором KOH. Таким образом, депрессия развивается в инкубационном сосуде. Добавление 1-аллил-2-тиомочевина C₄H₈N₂S позволяет ингибировать нитрификацию раствора, поскольку окисление аммиачных производных и нитритов до нитратов также сопровождается поглощением кислорода.

Для определения БПК₅ раствора измеряется необходимое его количество (табл. 2.1) и вносится в чистую емкость, добавляется химический сенсibilизатор аллилтиомочевина (тиозинамин), проводится перемешивание при температуре 20°C. Раствор отстаивается в течении пяти дней.

Биохимическая потребность в кислороде зависит от загрузки органическими веществами исследуемого объема. Измерение БПК₅ можно оценить на уровне около 80% от ХПК.

Таблица 2.1. Коэффициент пересчета для БПК₅

Диапазон измерения	Количество, мл	Коэффициент, К
0-40	432	1
0-80	365	2
0-200	200	5
0-400	250	10
0-800	97	20
0-2000	43,5	50
0-4000	22,7	100

Для определения физико-химических и бактериологических показателей БПК₅ применяется формула:

$$\text{БПК}_5 \text{ (мгО}_2 \text{ / л)} = \text{считываемое значение} * \text{коэффициент К.} \quad (2.7)$$

Наиболее благоприятные значения рН для биологических процессов от 6,8 до 7,4. Образец должен быть введен в термическую камеру только при 20°C.

Подходящие образцы субстрата готовятся к исследованию с использованием водопроводной воды (вода стабилизируется при 20°C в течение 48 часов). Концентрация растворенного кислорода измеряется в течение пяти дней. Затем в емкость помешается 2,0 грамма аллилтиомочевины, чтобы избежать нитрификации раствора. Тщательно перемешивая, добиваются стабилизации концентрации О₂. Через пять дней в темноте и при 20°C измеряется концентрация растворенного кислорода. Объ-

ем тестируемого образца зависит от значения ХПК: максимальное значение испытательного образца равно $4000/\text{ХПК}$ (мг $\text{O}_2/\text{л}$).

Для расчета значения БПК в мг $\text{O}_2/\text{л}$ используется формула (2.8) [54].

$$\text{БПК}_5 = ((P_0 - P_5) - (K_0 - K_5)) \times \frac{V}{E}, \quad (2.8)$$

где:

P_0 - концентрация в начале теста, мл/л;

P_5 - концентрация O_2 в конце теста (через пять дней), мл/л;

K_0 - концентрация O_2 в разбавляющей воде в начале испытания, мл/л

K_5 - концентрация O_2 в разбавляющей воде в конце теста (через пять дней), мл/л;

V - объем емкости, мл;

E - тестовый образец.

2.2. Средства и методика определения состава летучих горючих компонентов

Известно, что пиролиз представляет собой один из эффективных процессов термохимической переработки органических соединений, который происходит при повышенных температурах без участия кислорода.

Как известно, в качестве исходного сырья для пиролиза могут использоваться растительная биомасса, твёрдое ископаемое топливо, промышленные и бытовые отходы. Экономическая эффективность использования различных видов растительной биомассы определяется, в первую очередь, технологией её переработки. С одной стороны, растительная биомасса является широко распространённым возобновляемым энергетическим ресурсом и обладает достаточно высокой теплотой сгорания: для сухой массы биоотходов теплота сгорания составляет около 18,0 МДж/кг, для

сельскохозяйственных отходов – около 15,0 МДж/кг, хотя энергетически выгодной биомассой является биомасса с теплотворной способностью 20-25 МДж/кг. С другой стороны, существует ряд недостатков, которые усложняют использование ТБО как вид энергоресурсов. Отходы обладают малым насыпным весом, их зола при достаточно низких температурах начинает плавиться, а минеральные остатки золы - спекаться. Зола имеет в своём составе большое количество калия, серы, хлора. Стальные материалы оборудования для сжигания ТБО подвержены коррозии из-за высокой агрессивности жидких фракций процесса. В этом отношении пиролиз сельскохозяйственных отходов обладает явным преимуществом, так как этот вид биомассы имеет невысокое содержание хлора и других химических элементов, вызывающих повышенную коррозию оборудования. В результате пиролиза биомассы образуется горючий газ, высокоэнергетические жидкие продукты и кокс. Выход того или иного продукта, а также их энергетические и химические свойства зависят как от температуры процесса, так и скорости нагрева, свойств сырья и среды, в которой процесс протекает [7, 13, 30, 35, 70, 118].

При быстром нагреве и умеренных температурах (порядка 500°C) доминирующим продуктом является жидкость с высокой теплотой сгорания, состоящая из сложных органических соединений и воды. При этом парогазовая смесь продуктов должна быстро (в течение нескольких секунд) выноситься из активной зоны реактора и охлаждаться, чтобы избежать коррозии стальных изделий.

При более высоких температурах и большем времени разложения, органические соединения пиролизной жидкости претерпевают дальнейшее разложение на более простые вещества и доминирующим продуктом становится пиролизный газ, который в основном состоит из оксида (CO) и диоксида углерода (CO₂), водорода (H₂) и лёгких углеводородов (C_nH_m).

Медленный и сверхмедленный (карбонизация) процессы пиролиза позволяют получить наибольшее количество твёрдого остатка (кокса), что в условиях Бурунди

является весьма позитивным энергетическим фактором для бытовых и промышленных целей.

В таблице 2.2. приведено обобщение известных данных по влиянию скорости и температуры процесса пиролиза на выход продуктов [34].

Классифицировать технологии быстрого пиролиза по конструкционным особенностям реактора можно следующим образом [34]:

- Пиролиз в кипящем слое;
- Абляционный пиролиз;
- Пиролиз в циркулирующем кипящем слое (ЦКС);
- Пиролиз в двух реакторах кипящего слоя (КС);
- Пиролиз в реакторе с двумя шнеками;
- Пиролиз в потоке.

Таблица 2.2. Классификация основных технологий пиролиза по температуре и скорости процесса

Параметр	Быстрый низкотемпературный	Быстрый высокотемпературный	Медлен- ный	Карбонизация
Время про- цесса	1 сек	1 сек	5-20 мин	В часах
Размер сы- рья	Малый	Малый	Средний	Большой
Влажность сырья	Очень низкая	Очень низкая	Низкая	Низкая
Температура, °С	450-600	650-1000	500-700	400-600
Давление, кПа	100	10-100	100	100
Выход газа, % от массы	До 30	До 70	До 40	До 40
Теплота сгорания газа, МДж/м ³	10-20	10-20	5-10	2-4
Выход кокса, % от массы	До 15	До 20	До 30	До 35

Теплота сгорания кокса, МДж/кг	30	30	30	30
Выход жидких продуктов, % от массы	До 80	До 20	До 30	До 20
Теплота сгорания жидких продуктов, МДж/кг	23	23	23	15

Как следует из приведенного в таблице 2.2 (быстрый, высокотемпературный процесс), максимальное количество пиролизного газа - до 70% - выделяется при быстром высокотемпературном процессе, при малых размерах и очень низкой влажности исходного сырья, независимо от его природы. Отсюда следует, что требуется предварительная осушка или брикетирование топлива.

В настоящее время основными сельскохозяйственными культурами с годовым выходом растительной биомассы в Бурунди являются: 1. бананы – 1 600 000 тонн; 2. батат – 835000 тонн; 3. маниок – 710000 тонн; 4. фасоль – 220218 тонн; 5. маис – 123000 тонн; 6. сорго – 67947 тонн; 7. рис – 67886 тонн; 8. таро – 62 000 тонн; 9. горох – 33 000 тонн; 10. кофе – 7800 тонн; 11. чай – 7500 тонн; 12. хлопок – 4654 тонн.

Для проведения эксперимента применялись следующие аппаратура и реактивы:

1. Электрический сушильный шкаф с терморегулятором, обеспечивающим температуру нагрева от 105 до 110°C.
2. Бюксы стеклянные или алюминиевые.
3. Противни из неокисляющегося металла для подсушивания проб.
4. Эксикаторы, наполненные изучаемыми веществами.

Содержание внешней влаги определяется сушкой при внешней температуре воздуха в лаборатории или в сушильных шкафах с температурой не более 500°C. Максимальная же величина зерна пробы для определения влаги не должна превышать 20 мм.

Для оценки качества топлива и условий горения большое значение имеет выход летучих веществ. Если нагревать топливо без доступа воздуха, то под воздействием высокой температуры (от 200 до 1150°C) происходит разложение его на газообразную часть — летучие вещества (водород, метан, тяжелые углеводороды, оксид углерода, диоксид углерода и другие газы, т.е. в основном газообразные горючие вещества) и твердый остаток — кокс.

Выход летучих определяется в процентах к горючей (т.е. безводной и беззольной) массе топлива и обозначают $Y_r\%$.

Выход летучих веществ, их состав, а также температура, при которой они начинают выделяться, определяются химическим возрастом топлива: чем топливо старше по возрасту, тем меньше выход летучих и выше температура начала их выделения.

Летучие вещества оказывают большое влияние на процесс горения топлива: чем больше выход летучих, тем ниже температура воспламенения и легче зажигание топлива, и тем больше поверхность фронта пламени. Топливо с большим выходом летучих легко загорается и сгорает быстро с малой потерей тепла. При прочих равных условиях, чем больше выход летучих, тем меньше потери от механической неполноты сгорания топлива. В связи с этим рассмотрим следующий метод определения летучих веществ в пробах.

Навеску сухой пробы твердого топлива нагревают без доступа воздуха при температуре $(1150 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение семи минут.

Выход летучих веществ в процентах рассчитывают по потере массы навески пробы за вычетом влаги.

При испытании топлива коксующейся группы установлены следующие условия определения летучих:

а) проба в виде порошка нагревается в одной печи при $(900 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение семи минут,

б) проба в виде порошка и выполняется последовательный нагрев в двух печах: при $(450 \pm 0)^\circ\text{C}$ в течение семи минут и при $(900 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение семи минут.

в) брикетированная навеска пробы и выполняется нагрев в одной печи при $(900 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение семи минут.

Если при испытании пробы в условиях а) и б) не удастся избежать выброса твердых частиц, то рекомендуется проводить определение выхода летучих веществ в следующих условиях: брикетирование навески и последовательный нагрев в двух печах: при $400 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение семи минут и при $900 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение семи минут.

Обычно используют муфельную печь с электронагревом и терморегулятором, обеспечивающим в рабочей зоне печи постоянную температуру $900 \pm 5^\circ\text{C}$.

Для испытаний топлив, относящихся к группе бурых углей (например, фрезерный торф) дополнительно используют вторую муфельную печь аналогичной конструкции, в рабочей зоне которой поддерживают постоянную температуру $400 \pm 10^\circ\text{C}$.

2.3. Средства и методика определения энергетических характеристик сырья для получения горючих газов

Для экспериментального определения теплотворной способности топлива применяется калориметрическая бомба, представляющая собой толстостенный стакан из кислотоупорной стали диаметром около 80 мм и высотой около 300 мм, с герметически навинчиваемой толстой крышкой. Этот стакан помещают в водяной калориметр с определенной температурой t_1 . В чашку бомбы помещают пробу биомассы, которая воспламеняется под действием электрического тока.

По количеству тепла, воспринимаемого при этом калориметром, можно определить теплотворную способность топлива. Так как водяные пары, образующиеся при сгорании пробы топлива, конденсируются в бомбе до температуры конденсата t_2 , отдавая тепло калориметру, то в калориметрической бомбе определяется высшая теплотворная способность топлива (Q_s). В лабораторной практике пар выдерживают в газообразном состоянии. Таким образом, можно определить количество тепла, потребляемого для испарения влаги в горючем W (%) и воды, образовавшейся в результате горения. Это дает низшую теплотворную способности Q_i (или PCI), которая обычно используется в практических расчетах.

В практике сжигания топлива часть выделяющегося тепла Q_s , расходуется на: 1) испарение влаги из топлива; 2) испарение воды, образующейся при сгорании водорода, присутствующего в топливе.

Уравнение массового состава органического топлива записывается в виде:

$$m(C) + m(H) + m(O) + m(N) + m(S) + m(A) + m(W) = M \text{ топлива}, \quad (2.9)$$

где:

m - масса компонента.

Это уравнение также можно записать и в виде:

$$\frac{m(C)}{M_c} + \frac{m(H)}{M_c} + \frac{m(O)}{M_c} + \frac{m(N)}{M_c} + \frac{m(S)}{M_c} + \frac{m(A)}{M_c} + \frac{m(W)}{M_c} = 1. \quad (2.10)$$

Следует отметить, что все величины $\frac{m(\quad)}{M_c}$ меньше 1,0.

Умножим на 100 все члены уравнения, тогда получим следующее уравнение:

$$\frac{m(C)}{M_c} 100 + \frac{m(H)}{M_c} 100 + \frac{m(O)}{M_c} 100 + \frac{m(N)}{M_c} 100 + \frac{m(S)}{M_c} 100 + \frac{m(A)}{M_c} 100 + \frac{m(W)}{M_c} 100 = 100. \quad (2.11)$$

Тогда можно записать, что: $C\% + H\% + O\% + N\% + S\% + A\% + W\% = 1$.

Это равенство означает, что в 100 кг топлива содержится $H\%$ кг водорода и $W\%$ кг воды. Отсюда один килограмм топлива содержит водород $\frac{H\%}{100}$ кг и $\frac{W\%}{100}$ кг влаги. Известно, что при сжигании 1,0 кг водорода выходит 9,0 кг воды (H_2O).

Поэтому сгорание $\frac{H\%}{100}$ кг водорода дает $9 \frac{H\%}{100}$ кг воды (H_2O).

Выделяемая теплота, идущая на испарение влаги и воды, образуемая при сжигании водорода, на килограмм топлива равна:

$$Q_v = r \left(9 \frac{H\%}{100} + \frac{W\%}{100} \right), \quad (2.12)$$

где:

$r = 2500$ кДж /кг - скрытая теплота парообразования, необходимая для превращения кипящей жидкости в пар.

Поэтому,

$$Q_v = 2500 \left(9 \frac{H\%}{100} + \frac{W\%}{100} \right), \text{ кДж /кг}, \quad (2.13)$$

Тогда низшая теплотворная способность топлива Q_i будет равна:

$$Q_i = Q_s - 2500 \left(9 \frac{H\%}{100} + \frac{W\%}{100} \right) = Q_s - 25(9H\% + W\%), \text{ кДж /кг}, \quad (2.14)$$

где:

Q_s - высшая теплотворная способность топлива, кДж /кг.

Обычно в практических расчетах используют низшую теплотворную способность топлива Q_i , так как она преобразовывается в механическую работу, а Q_s служит для характеристики испарения влаги и водорода в процессе сгорания топлива.

2.4. Оценка погрешностей измерений

Для проведения инструментального эксперимента применены следующие контрольно-измерительные приборы и инструменты:

1. *Эксикатор* типа «Vitlab» (Германия) из полипропиленового материала с герметичной крышкой, где исследуемый материал рассыпается на перфорированном диске диаметром 230 мм;

2. *Лабораторные аналитические весы* для взвешивания проб, марки «OHAUS PA – 214C» (США), 1-го класса точности, специальные, с дискретностью измерений 0,1 мг, с максимальным весом пробы 210 г. Имеют встроенную калибровку типа InCal, жидкокристаллический дисплей с нелинейностью показаний не более 0,3 мг и сертифицированы для работы в условиях Бурунди;

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений низшую теплотворную способность проб П-21 сделал 3 замера при 350°C; и при влажности 20%;

3. *Калориметр* типа «CalorimeterPARR 6300» (Германия), который автоматически рассчитывает значения энергетического эквивалента на основе стандартных анализов, абсолютной погрешностью измерения теплотворной способности 0,1 кДж /кг.

Далее рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений низшей теплотворной способности пробы П-21, сделали три замера при 350°C и при влажности 20%.

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 31500 \text{ кДж/кг}. \quad (2.15)$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{(n-1)}} = 50 \text{ кДж/кг}. \quad (2.16)$$

При количестве измерений $n = 3$, доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ и коэффициенте Стьюдента, равным $t_{\text{отн}} = 4,30265272991175$, доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\text{отн}} \tilde{\sigma} = 215.13 \text{ кДж/кг с доверительной вероятностью } \alpha = 0,95. \quad (2.17)$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$ и инструментальной погрешности $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$:

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{(215.13)^2 + 0.1^2} = 215.12 \text{ кДж/кг}. \quad (2.18)$$

Вычислили относительную погрешность измерения: $\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 0.68\%$.

В результате вычислений получено: $x = (31500 \pm 50) \text{ кДж/кг}$; $\sigma = 0.68\%$; $\alpha = 0,95$.

4. *Универсальный сушильный шкаф* марки «MEMMERT» (Германия), с максимальной температурой 300°C при абсолютной погрешности измерения температур $0,1^\circ\text{C}$ (при температуре до $99,9^\circ\text{C}$), а при температуре свыше 100°C эта погрешность составляет $0,5^\circ\text{C}$.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов влажности проб

П-21, сделали три замера при 1150°C.

Средняя арифметическая погрешность составила: $\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 6,91\%$.

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{(n-1)}} = 0,1\%. \quad (2.19)$$

При количестве измерений $n = 3$, доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и коэффициенте Стьюдента $t_{\alpha n} = 4,30265272991175$, доверительный интервал случайной погрешности составил: $\Delta\tilde{x}_{сл} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 0,430265272991175\%$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности $\Delta\tilde{x}_{сл}$ и инструментальной погрешности $\Delta\tilde{x}_{он}$:

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{сл}^2 + \Delta\tilde{x}_{он}^2} = \sqrt{(0,43026527)^2 + 0,1^2} = 0,4417\%. \quad (2.20)$$

Вычислили относительную погрешность измерения: $\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 6,3\%$.

В результате вычислений получено: $x = (6,91 \pm 0,1)\%$; $\sigma = 6,8\%$; $\alpha = 0,95$.

5. *Муфельная лабораторная печь* марки «NABERTHERM L 15/11» (Германия), с абсолютной погрешностью измерения температуры 0,1°C.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов влажности проб П-21, сделали три замера проб. Средняя арифметическая погрешность составила:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 81,93\%.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2+(\tilde{x}-x_2)^2+\dots+(\tilde{x}-x_n)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(\tilde{x}-x_i)^2}{(n-1)}} = 1,5\%. \quad (2.21)$$

При количестве измерений $n=3$ при доверительной вероятности $\alpha=0,95$ и коэффициенте Стьюдента $t_{\alpha n}=4,302652729911$, доверительный интервал случайной погрешности составил: $\Delta\tilde{x}_{сл} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma} = 6,45\%$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности $\Delta\tilde{x}_{сл}$ и инструментальной погрешности $\Delta\tilde{x}_{он}$:

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{сл}^2 + \Delta\tilde{x}_{он}^2} = \sqrt{(6.45)^2 + 1.5^2} = 8,7\%. \quad (2.22)$$

Вычислили относительную погрешность измерения: $\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} 100\% = 10\%$.

В результате вычислений получено: $x = (81.93 \pm 1.5) \%$; $\sigma = 10\%$; $\alpha = 0,95$.

5. *Респирометр* типа «WARBURG» (Германия) с относительной погрешностью измерения концентрации кислорода в ферментере 0,01%.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений.

6. *Анализатор БПК5*, типа «OxiTopIS6» (WTW, Германия), с количеством мест для проб - шесть, с диапазоном показаний 40 делений (1,0 – 40000 мг/л), диапазоном измерений концентрации газа от 1,0–90 мг/л и с относительной погрешностью измерений концентрации газа не более $\pm 20\%$. Рассчитали среднее арифметическое значение *БПК5*.

Эксперимент № 2: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и коровьего навоза; $\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 13800$ мг O_2 /л. Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2+(\tilde{x}-x_2)^2+\dots+(\tilde{x}-x_n)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(\tilde{x}-x_i)^2}{(n-1)}} = 960 \text{ мг } O_2/\text{л}. \quad (2.23)$$

При количестве измерений $n = 3$, при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и коэффициенте Стьюдента $t_{\alpha n} = 4,302652729911$, доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta \tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 4130,5 \text{ мг О}_2 / \text{лс доверительной вероятностью } \alpha = 0,95. \quad (2.24)$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности $\Delta \tilde{x}_{\text{сл}}$ и инструментальной погрешности $\Delta \tilde{x}_{\text{ои}}$:

$$\Delta \tilde{x} = \sqrt{\Delta \tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta \tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{(4130,5)^2 + 2160^2} = 4661 \text{ мг О}_2 / \text{л}. \quad (2.25)$$

Вычислили относительную погрешность измерения: $\sigma = \frac{\Delta \tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 33,7\%$.

В результате вычислений получено: $x = (13800 \pm 960) \text{ мг О}_2 / \text{л}$; $\sigma = 33,7\%$; $\alpha = 0,95$.

7. Газоанализатор типа GA5000 (Франция) со стандартным измерением газа по содержанию CH_4 и CO_2 (с диапазоном измерения 0–100%), а также O_2 (с диапазоном измерения 0–25%). При необходимости можно было сделать еще три дополнительных измерения газов из следующего списка:

1. H_2S : 0,00–0,0000050 частиц, 0,00–0,0000200 частиц, 0,00–0,0000500 частиц, 0,00–0,0001000 частиц, 0,00–0,0005000 частиц или 0,00–0,0010000 частиц;

2. CO : 0,00–0,0000500 частиц, 0,00–0,0001000 частиц или 0,00–0,0002000 частиц;

3. H_2 : 0,00–000 промиле.

Диапазон измерений концентрации CH_4 от 0,0 до 70% имеет относительную погрешность $\pm 0,5\%$, а при концентрации CH_4 от 70 до 100% она составляет $\pm 1,5\%$.

Диапазон измерений концентрации CO_2 от 0 до 60% имеет относительную погрешность равную $\pm 0,5\%$, а при концентрации CO_4 от 60 до 100% она составляет $\pm 1,5\%$.

Диапазон измерений концентрации H_2S : 0,00–0,0000050 частиц, 0,00–0,0000200 частиц, 0,00–0,0000500 частиц, 0,00–0,0001000 частиц, 0,00–0,0005000 частиц или 0,00–0,0010000 частиц.

Диапазон измерений концентрации CO : 0,00–0,0000500 частиц, 0,00–0,0001000 частиц или 0,00–0,0002000 частиц с относительной погрешностью $\pm 1,5\%$.

Рассчитали среднее арифметическое значение CH_4 в эксперименте № 2: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и коровьего навоза $\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 70\%$.

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{(n-1)}} = 1\%. \quad (2.26)$$

При количестве измерений $n = 3$, доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и коэффициенте Стьюдента $t_{\alpha n} = 4,302652729911$ доверительный интервал случайной погрешности составил: $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 4,302\%$ с доверительной вероятностью $\alpha=0,95$.

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$ и инструментальной погрешности $\Delta\tilde{x}_{\text{он}}$:

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{он}}^2} = \sqrt{(4.302)^2 + 0,35^2} = 4,31\%. \quad (2.27)$$

Вычислили относительную погрешность измерения: $\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 6.18\%$. В результате вычислений получено: $x = (70 \pm 1)$ мг $\text{O}_2/\text{л}$; $\sigma = 6,16\%$; $\alpha = 0,95$.

9. *pH*-метра «Kellymeter PH-009(I)»: (elly Union Electronics, (Гонконг).

Диапазон измерений: 0,0–14,0 pH, с ценой деления: 0.1 pH и погрешностью ± 0.1 pH в эксперименте № 2: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и коровьего навоза.

Рассчитали среднее арифметическое значение pH: $\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 7$.

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{(n-1)}} = 0.2. \quad (2.28)$$

При количестве измерений $n = 3$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ и при коэффициенте Стьюдента равным $t_{\alpha n} = 4,302652729911$, доверительный интервал случайной погрешности составил: $\Delta\tilde{x}_{сл} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 0.86053$ pH с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности $\Delta\tilde{x}_{сл}$ и инструментальной погрешности $\Delta\tilde{x}_{ои}$:

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{сл}^2 + \Delta\tilde{x}_{ои}^2} = \sqrt{(0.86)^2 + 0,1^2} = 0.86 \text{ pH}. \quad (2.29)$$

Вычислили относительную погрешность измерения: $\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 1.22\%$.

В результате вычислений получено: $x = (7 \pm 0.2)$; $\sigma = 1,22\%$; $\alpha = 0,95$.

10. *фильтры из стекловолокна* «Wattman GFC» с эффективностью 99.99% имеют относительную погрешность 0.01%.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений Щелочности (мг-экв/л CaCO_3) в эксперименте № 2: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и коровьего навоза: $\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1150$ (мг-экв/л CaCO_3).

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2+(\tilde{x}-x_2)^2+\dots+(\tilde{x}-x_n)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(\tilde{x}-x_i)^2}{(n-1)}} = 15(\text{мг-экв/л CaCO}_3). \quad (2.30)$$

При количестве измерений $n = 3$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ и при коэффициенте Стьюдента $t_{\alpha n} = 4,302652729911$, доверительный интервал случайной погрешности составил: $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma} = 64,5399(\text{мг-экв/л CaCO}_3)$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$.

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$ и инструментальной погрешности $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$:

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{(64,53)^2 + 11^2} = 8,03(\text{мг-экв / л CaCO}_3). \quad (2.31)$$

Вычислили относительную погрешность измерения: $\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} 100\% = 0,00695$.

В результате вычислений получено: $x = (1150 \pm 15)$ мг $\text{O}_2/\text{л}$; $\sigma = 5,7\%$; $\alpha = 0,95$.

11. Для определения химического показателя активности кислорода (ХПК) был применен *фотометрический анализатор ХПК* типа «Эксперт-003-ХПК» (Россия) с техническими характеристиками (табл. 2.3).

Рассчитали среднее арифметическое значение ХПК в эксперименте № 5, смесь жидких отходов от производства пальмового масла и коровьего навоза: $\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 30500$ мг $\text{O}_2/\text{л}$.

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2+(\tilde{x}-x_2)^2+\dots+(\tilde{x}-x_n)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(\tilde{x}-x_i)^2}{(n-1)}} = 2118 \text{ мг О}_2/\text{л}. \quad (2.32)$$

При количестве измерений $n = 3$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ и коэффициенте Стьюдента $t_{\alpha n} = 4,302652729911$, доверительный интервал случайной погрешности составил: $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma} = 9121,3$ мг $\text{O}_2/\text{л}$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$. Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$ и инструментальной погрешности $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$:

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{(9121,3)^2 + 610^2} = 9141,6 \text{ мг О}_2/\text{л}. \quad (2.33)$$

Вычислили относительную погрешность измерения: $\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 30\%$.

В результате вычислений получено: $x = (310500 \pm 2118)$ мг $\text{O}_2/\text{л}$; $\sigma = 29\%$; $\alpha = 0,95$.

Таблица 2.3. Технические характеристики измерительного прибора

Технические характеристики измерительного прибора	
Диапазон измерения ХПК	От 10 до 8000 мг $\text{O}_2/\text{дм}^3$ при больших концентрациях разбавление пробы
Погрешность измерения ХПК	30% (10...50 мг $\text{O}_2/\text{дм}^3$)
	20% (50...200 мг $\text{O}_2/\text{дм}^3$)
	15% (более 200 мг $\text{O}_2/\text{дм}^3$)
Кюветное отделение	Под круглую кювету ХПК, для прямоугольных кювет 10×10, 20×24, 30×24, 50×24 мм

12 *Дериватограф* (термогравиметрический анализатор) марки: Q-1500D системы «Паулик-Паулик-Эрдей» (Венгрия), с рабочим диапазоном от 20°C до 1200°C,

со скоростью нагрева от 0,6 до 20°С в минуту, с измерением массы пробы от 20 до 3000 мг, имеет чувствительность 20 мг на всю шкалу, с точностью измерений: 20 мг (1,0%), 50-100 мг (0,5%), 100-3000мг (0,2%).

Выводы по главе 2

- 1) Дано теоретические обоснование экспериментальных исследований пиролиза различных проб биомассы в условиях преимущественного образования газовых и твёрдых продуктов.
- 2) Представлены практические методы определения влажности, зольности и теплотворной способности изучаемого образца биотоплива.
- 3) Представлены практические методы определения взвешенных твердых частиц, ХПК и БПК₅, изучаемого биосубстрата.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Описание экспериментальной установки и принципа ее действия

Для проведения исследования процесса пиролиза проб биомассы была создана экспериментальная лабораторная установка (рис. 3.1)

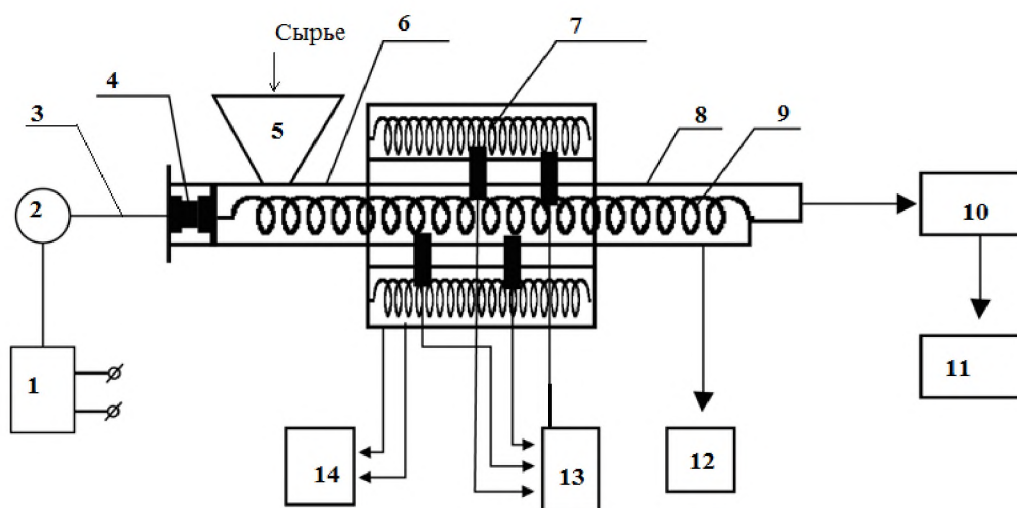


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки для пиролиза твердых биомасс в подвижном слое

Основными элементами установки являются: 1 – регулятор скорости вращения шнека; 2 – электродвигатель; 3 – гибкий вал привода; 4 – блок уплотнителей и передняя опора вала; 5 – приемный бункер с герметичной крышкой; 6 – основная часть корпуса шнека; 7 – электронагреватель мощностью 1,75 кВт; 8 – пиролизер; 9 – шнек; 10 – газоанализатор, совмещенный с фильтром – охладителем пиролизного

газа; 11 – калориметр; 12 – приемник твердого остатка; 13 – контроллер температуры; 14 – источник электропитания электронагревателя пиролизера.

Лабораторная установка работает следующим образом. В приёмный бункер (5) с герметичной крышкой поступает изучаемое сырье, затем оно винтовым шнеком (9), приводимым во вращение электроприводом (2) и регулируемым электронным потенциометром (1), поступает в пиролизер (реактор) (8), где происходит термохимическая реакция разложения (пиролиз) сырья за счёт высокой температуры, создаваемой электронагревателем (7), с помощью которого можно устанавливать фиксированную температуру в диапазоне от 100 до 1200°C.

Температура контролируется глубинными и поверхностными термодатчиками (13). В нагретой до определенной температуры изотермической камере пиролизера образец твердой биомассы начинает распадаться с выделением пиролизных газообразных, жидких и твердых фракций.

Летучие продукты, образующиеся в виде парогазовой смеси в реакционной зоне пиролизера, отводятся в систему охлаждения, очистки и в газоанализатор (10), где определяется химический состав полученного и очищенного синтез-газа, затем в калориметр (11), где определяется его теплотворная способность, а твердый (кокс) и жидкий остаток собираются в приемной пластиковой колбе (12), из которой ручным способом выгружаются.

Прозрачный пластик был применен в связи с необходимостью наблюдать остаток после пиролиза, т.к. металлическая ёмкость приходит в негодность от высокой химической активности жижи, в этом случае анализ состава пробы считается недостоверным.

В качестве изучаемых сырьевых образцов для пиролиза использовались пробы:

П-11: Проба из рисовой, кофейной соломки и шелухи;

П-21: Проба из рисовой соломки, древесины маслинной пальмы;

П-31: Проба из торфа «А» (поверхностный торф месторождения «Kirundo»);

П-41: Проба из торфа «Б» (глубинный торф месторождения «Ngozi» и «Nyamugari»);

П-42: Проба из торфа «В» (поверхностный фрезерный торф месторождений «Ngozi» и «Nyamugari»).

Все три указанные месторождения являются самыми богатыми по торфосодержанию, объем которого составляет более 80% (480 миллионов тонн) всех запасов торфа в Бурунди, и расположены они на северо-востоке республики, между озерами Кьохоха-Суд и Рверу, провинция «Kirundo», на границе с республикой Руанда. На данной установке были проведены эксперименты как с подвижным слоем твердой биомассы, так и в неподвижном слое. Исследования в неподвижном слое (насыпь) проводились в полусферической чаше из жаропрочного стекла с внешним объемным нагревом в муфельной печи со скоростью нагрева 10°C в минуту при температурах от 105 до 1150°C . Эксперименты должны подтвердить возможность получения энергетического газообразного топлива в дизель-генераторной электростанции республики Бурунди.

Изучение закономерностей термохимических превращений проводилось на тех же пробах, но насыпным методом, в различных режимах на дериватографе марки Q-1500D системы «Паулик-Паулик-Эрдей» (Венгрия), с рабочим диапазоном от комнатной температуры до 1200°C , со скоростью нагрева от $0,6$ до 20°C в минуту, с изменением массы пробы от 50 до 3000 мг, с возможностью работать в различных агрессивных газовых средах, а также возможностью определения тепловых эффектов.

Все экспериментальные работы выполнялись автором диссертации совместно с лаборантом Семеновой Е. в лаборатории Бурундийского государственного научно-агрохимического института (ISABU), в г. Бужумбура, при температуре в помещении $23-25^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности не более 30 %.

В результате проведенных исследований было выявлено, что изучаемые виды твердой биомассы имеют практически одинаковый элементный состав по C, H_2 и O_2 ,

Наиболее интенсивно процесс термического разложения (термоконверсии) органического вещества протекает с экзотермическим эффектом в области температур 200–450°C. При этом потери массы пробы могут достигать до 50%. Также были зафиксированы два максимума скорости термораспада при 300 и 360°C, ответственные за разложение гемицеллюлозы и целлюлозы в органических пробах. При достижении температуры 370°C процесс термораспада замедляется и протекает с меньшей скоростью - до 850°C.

Потеря массы при термическом разложении происходит также интенсивно и в интервале температур 500–900°C и составляет 21–23% за счет термохимических превращений, протекающих в твердом остатке, что свидетельствует о его низкой термоустойчивости, обусловленной химическим составом, главным образом, наличием кислородсодержащих соединений. Твердый остаток практически весь превращается в летучие соединения, потери массы достигают при этом, например, для рисовой соломки, 95%.

Общие закономерности процесса пиролиза биомассы, по данным термического анализа, аналогичны, однако, термоустойчивость органического вещества особенно в области температур 200–500°C - выше. При пиролизе проб биомассы в интервале температур 450–600°C наблюдается максимальный выход жидких продуктов.

Выход продуктов пиролиза при медленном нагреве проб составил: для кокса – 10%, для жидких продуктов (жижа) – около 15%, для газа – 75%.

Известно, что основными горючими компонентами пиролизного газа является водород, монооксид углерода, метан и непредельные углеводороды. Но тип исходного сырья не оказал существенного влияния на состав пиролизного газа, хотя и отмечено повышенное содержание метана в газе из рисовой соломки, что обусловлено ее химическим составом, т.е. более высоким содержанием метоксильных групп, но теплота сгорания газа проб из рисовой, кофейной соломки и шелухи лишь на 5% ниже теплоты сгорания газа, полученного из торфа «А» и «Б». Это еще раз доказы-

вает, что применение твердых биомасс для получения пиролизного газа с высоким выходом метана вполне реально в условиях республики Бурунди. Далее были проведены эксперименты по определению влажности и зольности изучаемых образцов проб твердой биомассы.

3.2. Экспериментальное определение характеристик исходного сырья и анализ результатов

3.2.1. Определение влажности и зольности в пробах

Для проведения объективного эксперимента и достоверности полученных результатов определение влажности и зольности выполнялось в 4-х параллельных навесках, где в двух сухих навесках определялась зольность, а в двух других - летучие вещества и золу. Результаты исследования представлены в таблице 3.1.

Влажность определяли путем высушивания пробы при 105°C в универсальном сушильном шкафу марки «MEMMERT» (Германия), с максимальной температурой 300°C, с естественной и принудительной циркуляцией воздуха и с объемом сушильной камеры 32 литра. Разница между исходным весом и весом после высушивания, поделенная на исходный вес и выраженная в процентах, дает искомое значение влажности. Потом эту же навеску помещали в муфельную лабораторную печь марки «NABERTHERM L 15/11» (Германия), позволяющую создать в объеме 15 литров регулируемую температуру до 1200°C. Затем, постепенно повышая температуру в объеме, доводили температуру до 750°C и выдерживали её до стабилизации веса навески. Вес остатка после сжигания, поделенный на исходный вес и выраженный в процентах, означает количество искомого значения золы. Анализ пробы из торфа месторождения «Ngozi» и «Nyamugari» на выход летучих газов нами был сделан в связи с тем, что глубинный торф (П-42) и поверхностный, маховый торф (П-41) «Ngozi» и

«Nyamugari» по своему визуальному составу резко отличаются между собой. Торф П-42 более темный, нежели торф П-41, что говорит о его высокой влажности. Высокое содержание влаги является вредным балластом в любом топливе и при его сжигании образуется парогазовая смесь, которая уносит с собою и энергетическую полезность летучих газов. Поэтому влажное топливо требует осушки. Также была исследована проба П-31 (торф «А») из месторождения «Waga», провинция «Gitega» в центральной части республики Бурунди, где запасы торфа составляют около 20% (120 миллионов тонн). Выполненные экспериментальные работы по определению содержания влаги и остаточной золы в пяти пробах нами были сведены в таблицу 3.1 и для наглядности представлены в виде гистограмм (рис. 3.2-3.4).

Таблица 3.1. Значения влажности и зольности проб при 105°C и 750°C

№ пробы	Масса тары, г	Масса брутто-пробы, г	Масса нетто-пробы, г	Масса брутто-пробы после осушки при 105°C	Влажность, %	Масса сухого вещества, %	Масса предыдущей пробы при 750°C	Зола при t = 750°C, в % от сырой пробы	Зола при t = 750°C, в % от сухого вещ-ва
П11	30.75	40.14	9.39	39.47	7.11	92.89	32.35	17.06	18.37
П21	31.74	41.21	9.47	40.55	6.91	93.09	33.32	16.72	17.96
П31	27.14	39.52	12.38	36.96	20.70	79.30	32.96	47.01	59.28
П41	27.08	37.38	10.30	33.26	39.99	60.01	27.71	6.11	10.19
П42	33.62	43.52	9.90	39.61	39.48	60.52	34.23	6.15	10.17

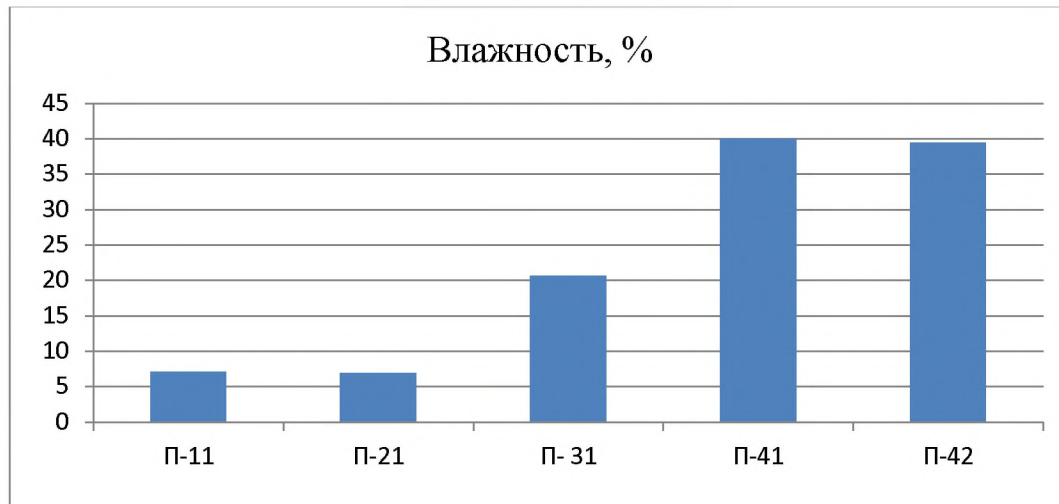


Рис. 3.2. Гистограмма влажности в пробах

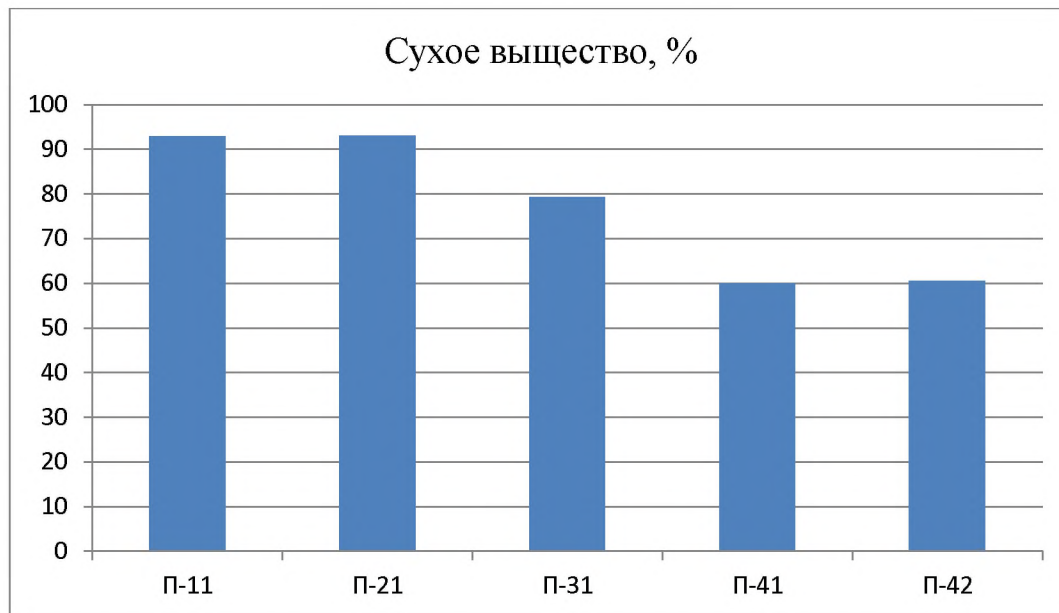


Рис. 3.3. Гистограмма начального содержания сухого вещества в отходах

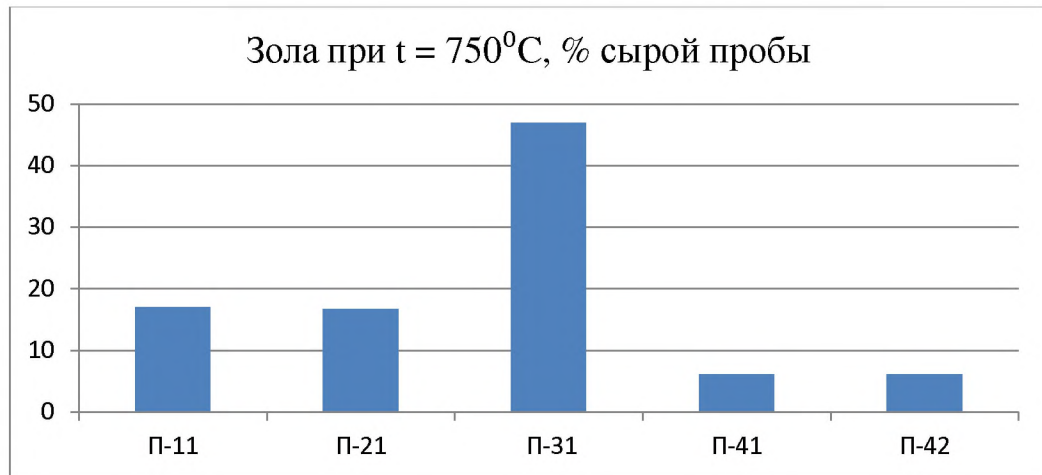


Рис. 3.4. Гистограмма содержания золы в пробах при 750°C в % от сырой массы

Из анализа табличных значений можно сделать следующие выводы:

1. Влажность торфа в пробах П-31, П-41 и П-42 превышает влажность торфа в пробах П-11 и П-21, что объясняется высокой гигроскопичностью торфа.
2. Выход летучих веществ при таком содержании влаги в пробах должен быть максимальным в пробах П-11 и П-21 и минимальным - в пробах П-31, П-41 и П-42.

В связи с этим необходимо было определить долю выхода летучих веществ при различных температурах пиролиза твёрдой массы всех пяти проб.

3.2.2. Определение низшей теплотворной способности

Низшую теплотворную способность изучаемых проб твердой биомассы определяли по сжиганию её в калориметре типа «CalorimeterPARR 6300» (Германия), который автоматически рассчитывал значения энергетического эквивалента на основе стандартных анализов.

В результате измерений в калориметре было установлено, что низшая теплотворная способность исследуемых проб в зависимости от их влажности в пределах 50-20% составила в кДж/кг:

- 1) торф «А» - 6100-9500;
- 2) торф «Б» – 24000-28000;
- 3) торф «В» – 26000-32000;
- 4) рисовая и кофейная соломка –25000-30000;
- 5) древесина масличной пальмы – 24000-31000.

Меньшее значение калорийности соответствует 50% влажности, а большее значение – 20% влажности. Результаты анализа представлены в таблице 3.2 и на рисунке 3.5.

При этом, для проб из торфа «А», «Б», «В» время горения составило от 6 до 10 часов, а для проб из соломки риса и кофе с шелухой – около 2 часов, проб из древесины масличной пальмы – от 3 до 4 часов.

Таблица 3.2. Изменение теплоты сгорания биомассы от влажности, кДж/кг

W, %	Теплота сгорания биомассы, кДж/кг					
	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
20	9500	18000	30000	31400	31500	31900
25	9000	17500	28500	29000	29500	30000
30	8500	17000	28000	28500	29000	29500
35	8000	16200	27500	28000	28400	28500
40	7500	15900	27000	27000	27500	28000
45	7000	15100	26000	27000	27400	27500
50	6500	14000	24500	25000	25500	26000

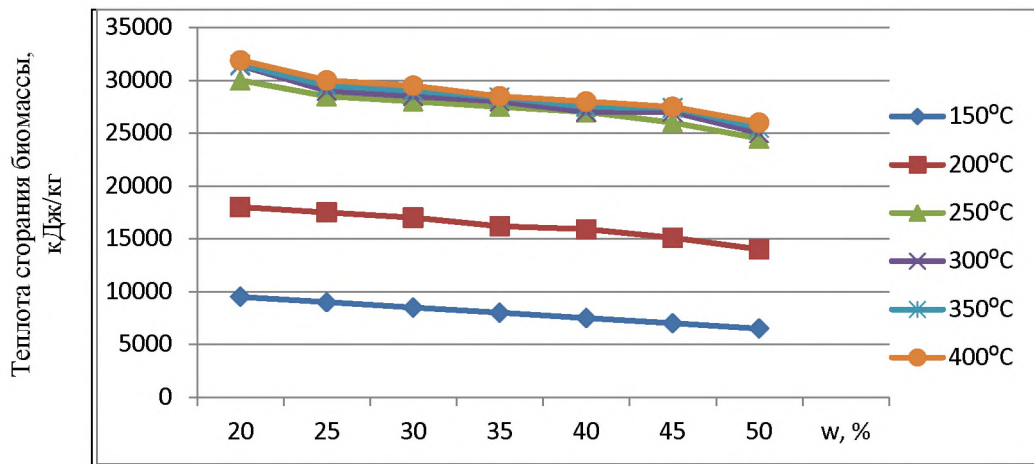


Рис. 3.5. График теплотворной способности проб биомассы в зависимости от их влажности и температуры в калориметре

3.2.3. Физическая модель термохимической конверсии твердой биомассы и выхода её фракций

Изменение физического состояния и химического состава изучаемых проб твердой биомассы с последующим их беспламенным горением предоставлено на рисунке 3.6.

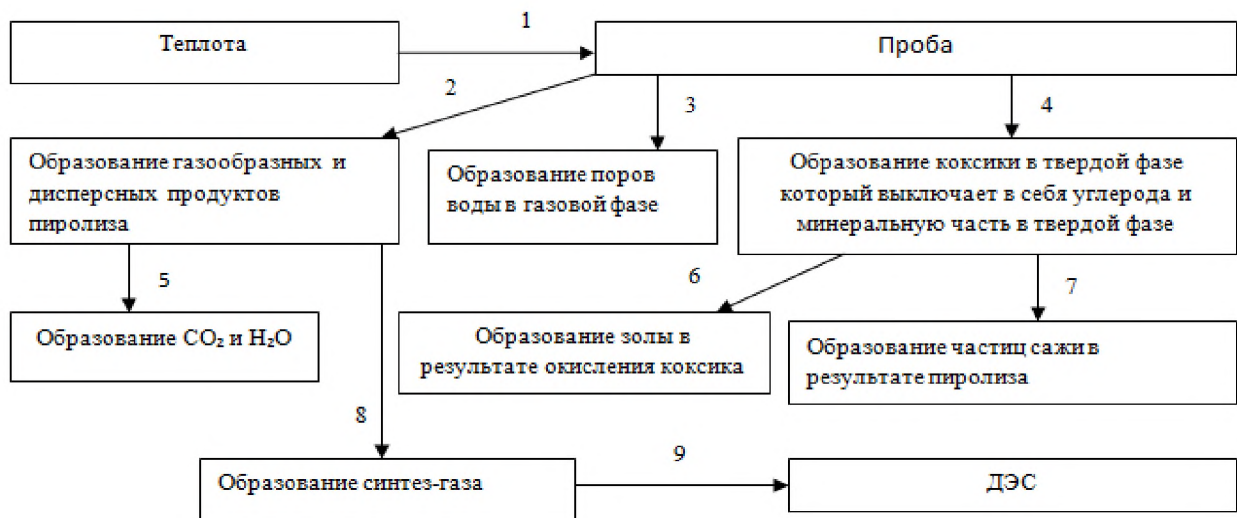


Рис. 3. 6. Схема физической модели изменения состояния и химического состава изучаемых проб твердой биомассы (количеством шесть)

3. 3. Экспериментальные исследования выхода летучих компонентов от различных условий протекания процесса пиролиза и анализ результатов

Для определения выхода летучих из пяти изучаемых сырьевых образцов, пробы сжигали в высокотемпературной стандартной печи марки «CarboliteGeroRHF 14/06» (Германия), позволяющей создать в объеме рабочей трехлитровой камеры температуру до 1400°C. Было решено установить восемь фиксированных значений температур – 450°C, 550°C, 650°C, 750°C, 850°C, 950°C, 1050°C, 1150°C с интервалом 100°C. Подъем температуры выполнялся с максимальной скоростью (10°C в минуту), чтобы не допускать глубокого остывания пробы при их замене. Разница между начальной массой и массой при фиксированной температуре, поделенная на исходную массу, выраженная в процентах, означает выход летучих веществ.

Ниже даны описания двух способов сжигания.

Каждый образец (2 параллельные навески) помещали отдельно от других в печь, уже нагретую до нужной температуры, выдерживали пять мин, вынимали образец, охлаждали в эксикаторе типа «Vitlab», (Германия) и взвешивали на аналитических весах марки «OHAUS PA – 214C» (США, первого класса точности, специальные, с ценой деления 0,1 мг). Результаты испытаний приведены в таблицах 3.3 и 3.4.

Далее на рисунке 3.7 представлены графики зависимости долевого выхода пиролизного газа из каждой пробы в зависимости от температуры в печи.

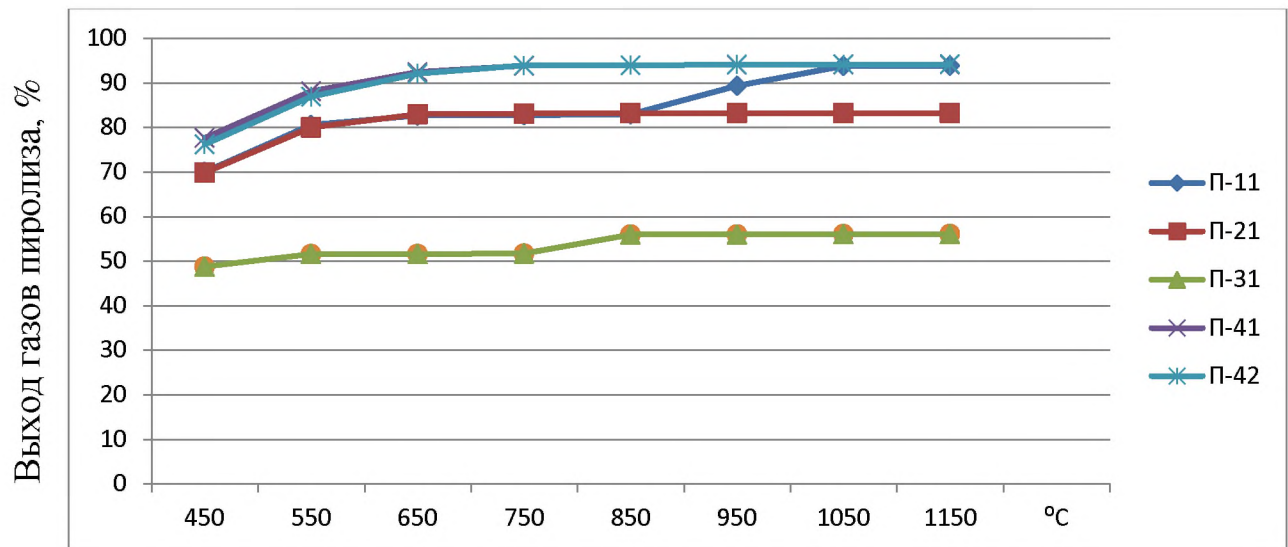


Рис. 3.7. Зависимость долевого выхода пиролизного газа из различных проб от температуры в печи.

3.3.1. Определение выходов летучих при различных температурах сухой массы образца

В качестве изучаемых сырьевых образцов для пиролиза использовались пробы с начальной влажностью не более 15%:

П-11: Проба из рисовой, кофейной соломки и шелухи;

Табл. 3.3. Выход летучих веществ при различных температурах в зависимости от влажности образца (в процентах)

№ Пробы	Масса тары, г	Масса тары вместе с пробой, г	Масса пробы без тары, г	Масса пробы с тарой после высушивания при 105°C	Влажность, %	Выход летучих веществ, %							
						450	550	650	750	850	950	1050	1150
П-11	34.5689	40.8419	6.2730	40.3927	7.16	70.03	80.55	82.67	82.76	82.91	89.33	93.80	93.88
П-21	34.8643	41.3465	6.4822	40.8679	7.38	69.90	80.00	82.97	83.07	83.21	83.25	83.25	83.26
П-31	33.0426	40.1780	7.1354	38.6681	21.16	48.76	51.57	51.59	51.69	55.96	55.98	56.04	56.06
П-41	33.3634	39.1075	5.7441	36.7716	40.67	77.66	88.10	92.41	93.84	93.94	94.05	94.12	94.13
П-42	32.5206	39.0400	6.5194	36.3908	40.64	76.21	86.89	92.09	93.90	93.95	94.11	94.17	94.18

П-21: Проба из рисовой соломки, древесины и масличной пальмы;

П-31: Проба - торф «А» (поверхностный торф месторождения «Kirundo»);

П-41: Проба - торф «Б» (глубинный торф месторождений «Ngozi» и «Nyamugari»);

П-42: Проба - торф «В» (поверхностный фрезерный торф месторождений «Ngozi» и «Nyamugari»).

Таблица 3.4. Выход летучих при различных температурах сухой массы образца

№ ПРОБЫ	Выход летучих веществ при различных температурах, % от сухого вещества								Зола, % от сырого вещества
	450°C	550°C	650°C	750°C	850°C	950°C	1050°C	1150°C	
П-11	67.71	79.04	81.31	81.43	81.58	88,50	93.33	93.34	6.12
П-21	67.49	78.40	81.6	81.72	81.90	81.91	81.92	81.93	16.74
П-31	38,35	38.55	38.58	38.71	44.13	44.16	44.23	44.26	43.94
П-41	62.35	79.94	87.21	89.62	89.78	89.93	90.09	90.10	5.87
П-42	59.91	77.9	86.67	89.72	89.81	90.07	90.17	90.20	5.82

На графике 3.8 показана зависимость долевого выхода пиролизного газа из каждой пробы от температуры в печи, в (%) от сухого вещества.

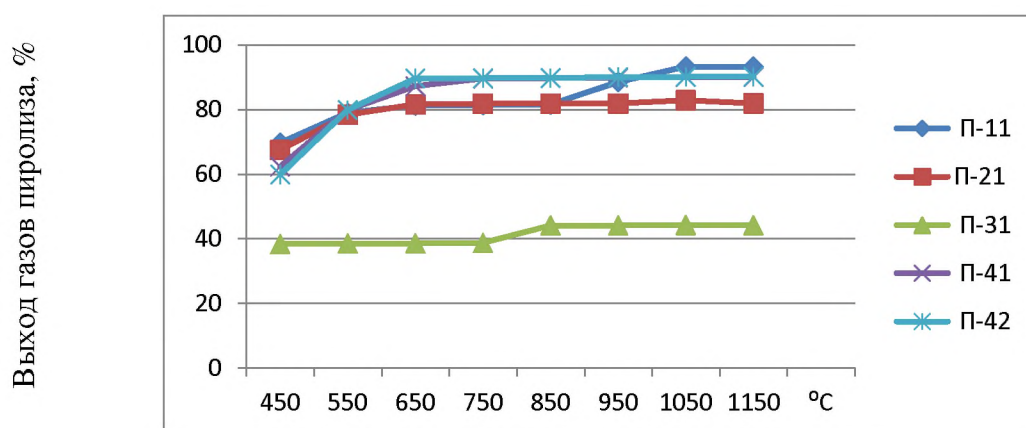


Рис. 3.8. Зависимость долевого выхода пиролизного газа от температуры в печи для различных проб сухого вещества

3.3.2. Методика проведения эксперимента по испытанию проб П-11, П-21, П-31, П-41 и П-42

Все образцы без высушивания, помещали в холодную печь, нагревали до 450°C, выдерживали пять минут при данной температуре, затем выключали печь, вынимали из неё все образцы, охлаждали в лабораторном эксикаторе типа «Vitlab», (Германия), взвешивали на прецизионных электронных лабораторных весах типа «ВМ-II», (Россия), с ценой деления 1,0-100 мг, второго измерительного класса, со встроенной юстировочной гирей, с максимальной нагрузкой до 2400г, затем опять помещали в печь и нагревали до необходимой (из восьми) температуры, $t = 450^{\circ}\text{C}$, 550°C , 650°C 1150°C , включали печь, выдерживали пять минут, затем пробу вынимали и меняли на следующую пробу, и таким образом восемь раз в соответствии с выбранной температурой. На основании результатов проведенных экспериментов были составлены таблицы 3.5, 3.6. Гистограмма эксперимента приведена на рисунках 3.9, 3.10.

Таблица 3.5. Масса пробы с тарой при различных температурах сжигания

№ пробы	Масса тары, г	Масса тары вместе с пробой, г	Масса пробы без тары, г	Масса пробы с тарой при различных температурах сжигания								Сухое вещество, %
				450°C	550°C	650°C	750°C	850°C	950°C	1050°C	1150°C	
П-11	28.33	31.36	3.034	29.79	29.47	29.24	29.03	28.87	28.83	28.83	28.83	92.86
П-21	38.34	40.39	2.04	39.11	38.74	38.51	38.39	38.39	38.38	38.38	38.38	92.86
П-31	37.99	39.99	1.99	39.25	39.05	38.93	38.93	38.92	38.91	38.91	38.91	79.15
П-41	27.64	30.25	2.59	28.76	28.48	28.29	28.09	27.94	27.90	27.89	27.89	59.81
П-42	36.64	39.53	2.89	37.65	37.30	37.02	36.86	36.81	36.81	36.81	36.81	59.81

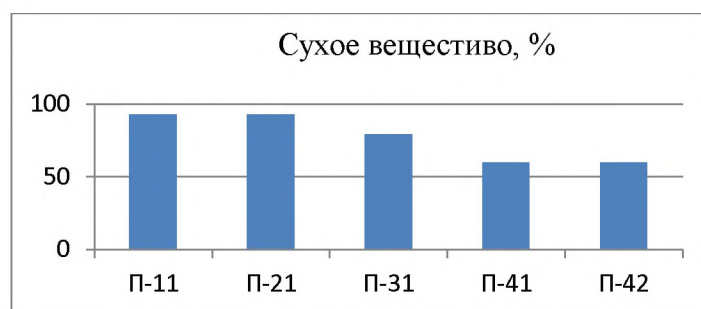


Рис. 3.9. Гистограмма содержания в пробе сухого вещества

Таблица 3.6. Выход летучих веществ при разных температурах в % от сырого вещества пробы

№ пробы	Выход летучих веществ при различных температурах, в процентах от сырого вещества							
	450 °С	550 °С	650 °С	750 °С	850 °С	950 °С	1050 °С	1150 °С
П-11	51.95	62.17	69.98	76.69	81.92	83.43	83.48	83.50
П-21	62.09	80.23	91.90	97.22	97.63	97.71	97.82	97.85
П-31	36.78	47.01	52.97	53.21	53.43	53.87	53.90	50.42
П-41	56.81	67.91	75.00	82.68	88.59	90.22	90.30	90.38
П-42	65.21	77.13	86.64	92.22	93.88	94.00	94.02	94.03

На рисунке 3.10 представлены графики зависимости долевого выхода пиролизного газа из каждой пробы в зависимости от температуры в печи (сухое вещество). Все образцы без высушивания сначала помещали поочередно в холодную печь, для нагрева, а затем нагревали до 450 °С и поднимали ступенчато температуру до 1150 °С.

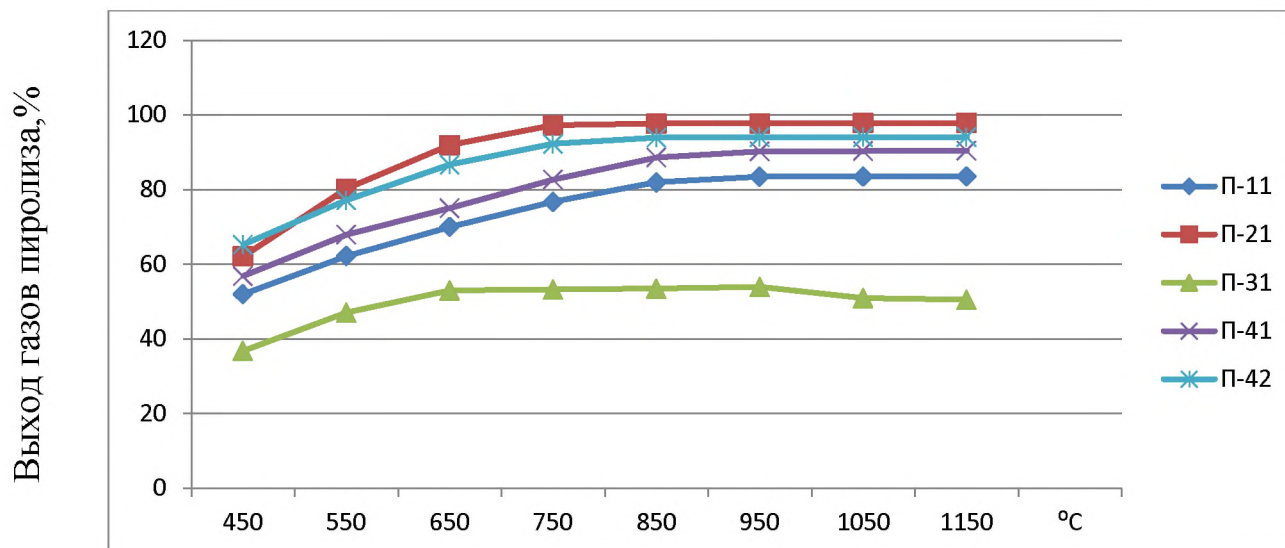


Рис. 3.10. Зависимость долевого выхода пиролизного газа от температуры в печи для различных проб сухого вещества

На основании изображенной зависимости на рис. 3.8 следует, что торф из место-

рождения «Waga» обладает минимальной реакционной способностью выделения пиролизного газа при температуре 650°C, концентрация газа не изменяется более чем 55% даже с повышением температуры в камере печи.

Пробы типа П-11 и П-21, обладая высокой энергетической способностью и выходом пиролизного газа (более 80%, рис 3.8), вполне могут быть применены для пиролизного процесса. Они имеют низкую зольность (18,37% и 17,96%, соответственно) при температуре стабилизации пиролизного процесса на уровне 750°C (табл. 3.7 и рис. 3.11).

Отсюда следует, что для них вполне достаточно низкотемпературного флеш-пиролиза, что в условиях Бурунди возможно и экономически выгодно.

Проба П-31 обладает высокой зольностью (почти 45 % от общей массы образца), что свидетельствует о большом содержании азотсодержащих примесей и его низкой калорийности. Торф типа «А» не приемлем для пиролизного процесса, но с успехом может быть использован для бытовых и промышленных целей, особенно в виде фрезерного топлива.

Далее были проведены эксперименты по определению выхода синтез-газа при пиролизе твердой биомассы.

Таблица 3.7. Изменение выхода синтез-газа в зависимости от температуры в газоанализаторе

Газ	Выход синтез-газа, %						
	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C
CO ₂	95	88	58	50	62	61	52
H ₂	2	2	12.5	16	14.5	16	12
CH ₄	2.5	2.5	21	29.9	20	20.7	30
CO	0.5	0.5	5	3	2.5	2	1.5

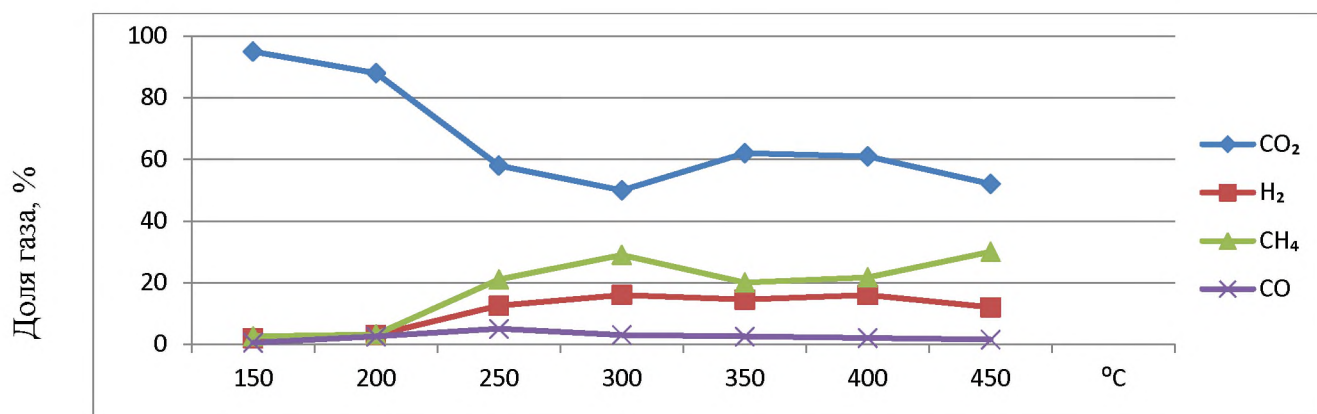


Рис. 3.11. Изменение выхода синтез-газа в зависимости от температуры в газо-анализаторе.

Из зависимости, изображенной на графике (рис. 3.10) следует, что CO₂ при низкой температуре переработки имеет максимальную концентрацию в объеме пробы, но при повышении температуры его концентрация резко снижается, особенно в диапазоне от 200 до 300°C. Это связано с тем, что при этих же температурах резко растет выделение метана CH₄ и CO. Это подтверждается и ростом выделения молекулярного водорода H₂, который является основным компонентом метана CH₄. Как следует из зависимости, изображенной на рисунке 3.12, увеличение доли углерода и водорода в метане ведет к увеличению его энергетической способности, особенно для торфа «Б» и «В», а также рисовой соломки. А также, чем больше влаги в образце, тем меньше его теплотворная способность (теплота сгорания).

Таблица 3.8. Содержание углерода в диапазоне температур от 150 до 450°C

Содержание углерода, %	Изменение выхода газов, в зависимости от содержания углерода, %			
	CO	CH ₄	H ₂	CO ₂
22	9.1	60.0	16.4	14.5
24	4.7	68.5	12.5	14.3
26	4.4	70.5	10.6	14.5
28	2.5	74.5	9.8	14.3
30	2.0	78.0	8.0	14.2
32	1.5	80.0	5.0	12.0
34	1.4	82.5	4.5	11.5

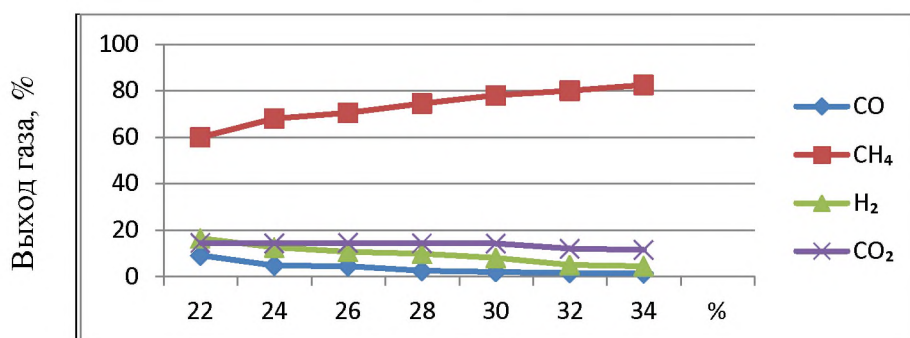


Рис. 3.12. Графики выхода газов в зависимости от содержания углерода в диапазоне температур от 150 до 450°C в газоанализаторе

Таблица 3.9. Зависимость выхода газов от содержания в пробе водорода

Содержание Водорода, %	Выход газов от содержания в пробе Водорода, %			
	CO	CH ₄	H ₂	CO ₂
10.0	9.4	78.0	4.8	12.8
10.5	8.0	80.0	1.5	10.5
11.5	6.5	80.5	1.1	10.1
12.5	5.0	81.0	0.5	10.5

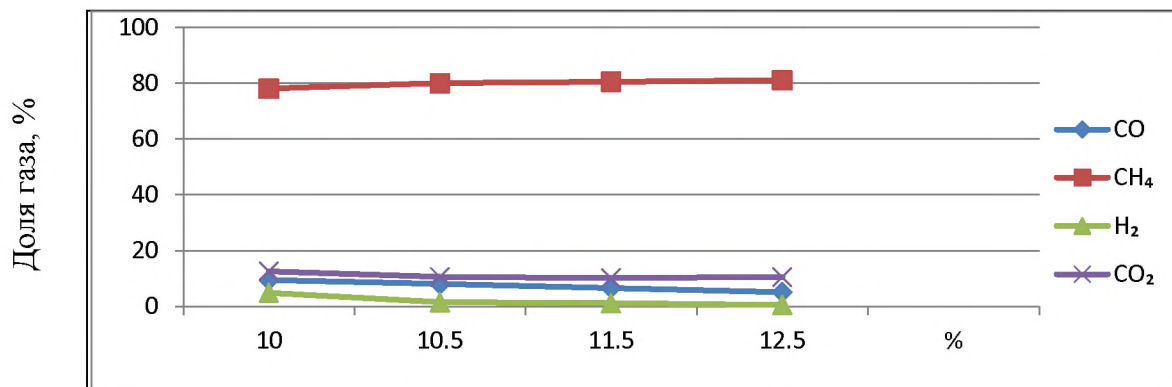


Рис. 3.13. График зависимости выхода газов от содержания в пробе водорода в газоанализаторе

В итоге можно сказать, что на процесс выработки синтез-газа огромное влияние оказывает влажность топлива, при этом было установлено, что оптимальное ее значение составило 15-20%, что позволяет применить низкотемпературный пиролиз для получения синтез-газа. Но с ростом влажности топлива наблюдается существенное снижение теплотворной способности его конечного продукта.

Калорийность газа растет из-за роста количества CH_4 и H_2 . Избыток водорода позволяет ему более интенсивно взаимодействовать с углеродом, повышая выход метана и снижая количество диоксида углерода. Но с ростом содержания углерода происходит снижение удельной теплотворной способности газа из-за повышения в нем доли CO и CO_2 .

В состав пиролизного газа из твердых биомасс в основном входят газы CO и H_2 . Но в зависимости от метода получения пиролизного газа соотношение $\text{CO}:\text{H}_2$ варьируется от 1:1 до 1:3. В прямой зависимости от применяемого сырья и метода его переработки соотношение этих компонентов может изменяться в широких пределах.

Как правило, процентное содержание веществ в сыром неочищенном пиролизом газе следующее [98]: CO - 12-18%, H_2 - 11-28%, CH_4 - 33-45%, CO_2 - 1.5-2.5 %.

В таблице 3.10. приведен средний химический состав и теплотворная способность пиролизного газа, получаемого из пяти образцов биомасс.

Таблица 3.10. Средний химический состав и теплотворная способность пиролизного газа

№ п/п	Состав пиролизного газа	Процентное содержание, %	Теплотворная способность (низшая), МДж/м ³
1	Метан (CH_4)	35 – 45	35,80
2	Водород (H_2)	16 – 28	10,80
3	Оксид углерода (CO)	14 – 18	12,64
4	Диоксид углерода (CO_2)	1,5 – 2,5	-

По результатам исследования проб твердых отходов, и разных видов торфа месторождений в Бурунди следует, что отходы из рисовой, кофейной соломки и шелухи, древесины и торфа марки «Б» является наиболее подходящими для получения синтез-газа в процессе пиролиза. По своей калорийности получаемый синтез-газ может заменить дизельное топливо. В таблице 3.11 приведены сравнительные данные по пиролизу, полученные различными авторами.

Таблица 3.11. Сравнение результатов пиролиза, полученных диссертантом и другими авторами

Тип образца биомассы	Тип пиролиза	Реактор	Продукт пиролиза (масса, %)			Автор(ы)
			Твердые	Жидкие	Газообразные	
Рисовая шелуха	Медленный	Реактор с неподвижным слоем	40	23	35	Natarajan и др.
Рисовая солома	Быстрый	Плазменный	33,5	0	66,5	Tu и др.
Хлопковые отходы	Медленный	Шихтовый	22	28	50	Aquino и др.
Стебель кукурузы	Быстрый	Проволочный реактор	20	8	60	Zabaniotou и др.
Пальмовое масло	Медленный	Реактор с неподвижным слоем	10	20	64,5	Yang H. и др.
П-11	Флэш-пиролиз	Реактор с неподвижным слоем	-	-	93,88	Манигомба Ж.А.
П-21	Флэш-пиролиз	Реактор с неподвижным слоем	-	-	83,26	Манигомба Ж.А.
П-31	Флэш-пиролиз	Реактор с неподвижным слоем	-	-	56,06	Манигомба Ж.А.
П-41	Флэш-пиролиз	Реактор с неподвижным слоем	-	-	94,13	Манигомба Ж.А.
П-42	Флэш-пиролиз	Реактор с неподвижным слоем	-	-	94,18	Манигомба Ж.А.

Выводы по главе 3

1. Экспериментально установлено влияние температуры на процесс пиролиза проб, особенно на выход газа и его теплотворную способность.

2. Установлена температурная зависимость увеличения выхода метана из торфа и, как следствие, рост объема получаемого газа и его теплотворной способности. В целом, с повышением температуры, наблюдается улучшение основных параметров получаемого газа.

3. В ходе выполнения работ по исследованию пиролиза твердой биомассы предложена физическая модель применения его фракций.

4. Выполнены экспериментальные исследования пиролиза различных проб биомассы в условиях преимущественного образования газовых, жидких и твердых продуктов.

5. В опытах, проведенных на установке, разработанной для изучения быстрого пиролиза, определена динамика выхода смолы, газа и кокса в зависимости от фиксированной температуры.

6. Установлено, что для получения максимального выхода жидких и твердых продуктов пиролиза надлежащего качества из биомассы, температура процесса не должна превышать 600°C , а для выхода газообразной фракции должна быть не менее 900°C .

7. Определен химический состав полученного пиролизного газа из основных образцов торфа «Б» и «В».

8. Установлено, что максимальной энергетической способностью обладают образцы с минимальным содержанием влаги, составляющим не более 20%.

9. Также установлено, что сырье - торф месторождения «Waga» из провинции «Gitega» в центральной части республики Бурунди, запасы которого составляют около 20%, т.е. не менее 20 млн. т от всех запасов торфа, обладая минимальным выходом летучих газов и удельной теплотворностью, приемлемо в виде топлива как в бытовых, так и в промышленных целях, и в брикетном виде имеет 1,5 раз большую энергетическую способность, чем россыпью.

ГЛАВА 4

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА НА ПРОМЫШЛЕННОЙ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ

4.1. Описание технологического процесса получения биогаза на опытно-промышленной биогазовой установке

Научные исследования биогаза как продукта естественного разложения органических веществ и, в частности, биополимеров, направлены на тщательный анализ различных субстратов и определение содержания органического сухого вещества в них, поскольку колебания в составе субстрата имеют сезонный и природно-климатический характер и оказывают существенное влияние на метаногенерацию. Кроме того, решаются следующие проблемы:

1. Поиск путей интенсификации газообразования.
2. Подбор эффективных стимуляторов и ингибиторов процесса газообразования.
3. Наиболее эффективное использование сброженных субстратов.

Рассмотрим общее описание опытной биогазовой установки. Блок биометанизации, установленный на мини-заводе "Kirekura-Muzazi" в городе Бужумбура, республика Бурунди, по переработке пальмового сырья для получения пальмового масла, где отработанное сырьё после выделения из него масла, превращается в пальмовый жмых, состоит из четырех - D1, D2, D2 и D4 метантенков, представленных на рисунке 4.1.



Рис. 4.1. Действующие метантенки

Варочные котлы предназначены для варки гроздьев африканской масличной пальмы (*Elaeisguineensis*).

Котлы снабжаются сточными водами из 14 отстойников, которые используются для отделения неочищенного пальмового масла от воды, используемой в процессе экстракции из варочного котла, и сточными водами после обработки сырой нефти.

Эти 14 отстойников имеют прямоугольную форму, а все варочные котлы взаимосвязаны между собой как по уровню субстрата, так и по уровню полученного газа (рис. 4.2). Разрез метантенка объемом 40 м^3 показан на рисунке 4.3.

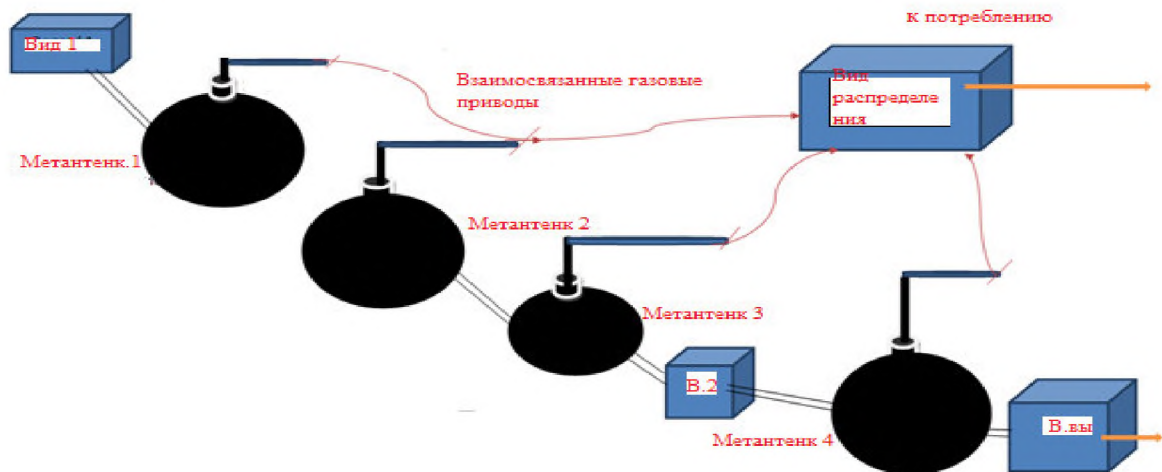


Рис 4.2. Схема технологической взаимосвязи метантенков

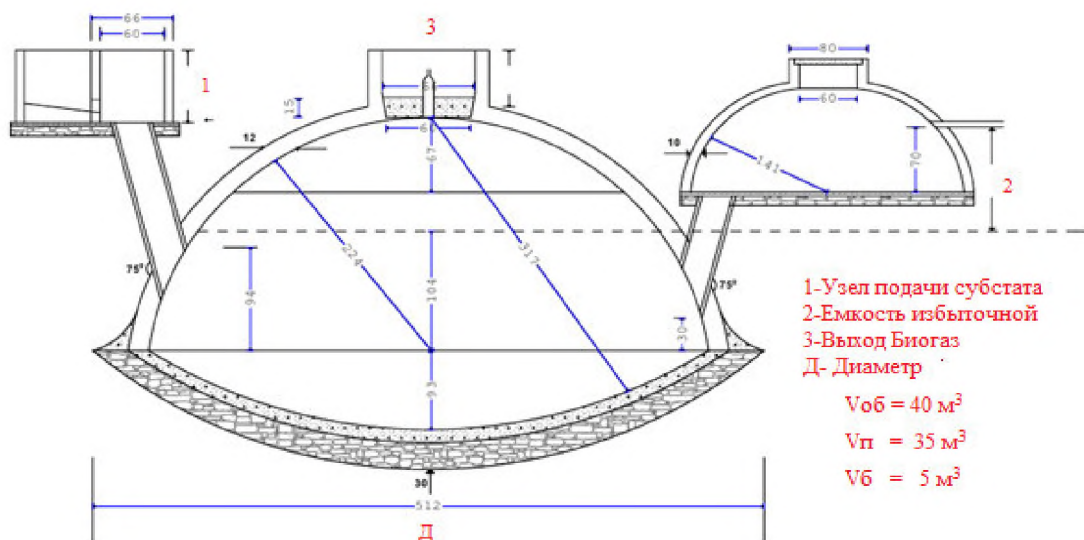


Рис. 4.3. Разрез метантенка объемом 40 м^3

Как следует из приведенного в таблице 4.1, при общем полезном объеме всех четырех метантенков, равном 108,375 м³, их суточной загрузке в объеме 62 м³, биогазовая установка способна переработать не более 1,8 тонн исходного субстрата.

Таблица 4.1. Технические характеристики метантенков

Обозначение	Общий объем метантенка, м ³	Полезный объем для субстрата, м ³	Полезный объем для биогаза, м ³
D1	40,0	35,0	5,0
D2	40,0	35,0	5,0
D3	5,0	3,375	0,625
D4	40,0	35,0	5,0

Из выполненных экспериментов следует что время пребывания субстрата в биогазовой установке составляет около 32 суток. Для промышленного применения этот период не приемлем.

Реакторы заполняются питательным субстратом не менее четырех раз в неделю. Сам активный субстрат брожения состоит из коровьего и свиного навоза, а также из отходов скотобойни.

4.2. Экспериментальное исследование состава характеристик субстратов и биогаза, получаемого от них

С этой целью и для обеспечения качества сырья для реакторов были проведены исследования характеристик субстратов. Было выполнено по три замера каждого субстрата. Также были определены физико-химические параметры субстратов, такие как щелочность, ХПК, БПК₅, MES, MVS, общее содержание азота и влаги. Методики определения этих параметрах представлены в главе 2.

Исследуемые субстраты:

Эксперимент № 1: жидкие отходы от производства пальмового масла;

Эксперимент № 2: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и коровьего навоза;

Эксперимент № 3: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и свиного навоза;

Эксперимент № 4: смесь жидких отходов от производства пальмового масла и отходов скотобойни (с содержанием рубца);

Эксперимент № 5: смесь жидких отходов от производства пальмового масла, коровьего навоза, свиного навоза и отходов скотобойни.

После исследования каждого субстрата состав биогаза также был изучен и оценен лабораторным способом на газоанализаторе типа GA5000 (Франция) со стандартным измерением газа по содержанию CH_4 и CO_2 (с диапазоном измерения 0–100%), а также O_2 (с диапазоном измерения 0–25%), со взятием проб на химический анализ непосредственно из метантенков.

Результаты исследований физико-химических параметров субстратов и состава биогаза по среднему арифметическому значению приведены в таблицах 4.2-4.11 и на рисунке 4.3.

Таблица 4.2. Результаты исследования характеристик жидких отходов завода по производству пальмового масла

Параметр субстрата	Значение параметра	VDI, Стандарт 4630
pH	$6,8 \pm 0,2$	6,8-7,4
Щелочность (мг-экв/л CaCO_3)	1120 ± 12	>1000
DCO (мг O_2 /л)	35000 ± 2018	-
DBO ₅ (мг O_2 /л)	13800 ± 960	-
MES (в мг / л)	8100 ± 57	-
MVS (в мг/л)	6700 ± 85	-
Общий азот(Общий), (мг / л)	$1011 \pm 15,2$	-
DCO/N	34,6	30-35
Уровень влажности (%)	$97,33 \pm 0.7$	Мин. - 65%

Таблица 4.3. Состав биогаза, производимого из жидких отходов завода по производству пальмового масла.

Наименование	Содержание, %
CH ₄	64 ± 1,2
CO ₂	35,1±1,1
H ₂ S	0,1±0,04

Таблица 4.4. Результаты определения характеристик смеси жидких отходов от производства пальмового масла и коровьего навоза

Параметр субстрата	Значение параметра	VDI Стандарт 4630
1	2	3
pH	6,8 ± 0,2	6,8-7,4
Щелочность (мг-экв/л CaCO ₃)	160 ± 12	>1000
DCO (мг O ₂ /л)	37000 ± 2000	-
DBO ₅ (мг O ₂ /л)	14000 ± 960	-
MES (в мг/л)	10000 ± 60	-
MVS (в мг/л)	8400 ± 30	-
Общий азот (Нобщий), (мг/л)	1080 ± 18	-
DCO / N	34,25	30 - 35
Уровень влажности (%)	7,33 ± 0.7	Мин. - 65%

Таблица 4.5. Состав биогаза, производимого из смеси жидких отходов по производству пальмового масла и коровьего навоза

Наименование	Содержание, %
CH ₄	69 ± 1,3
CO ₂	30,1 ± 1,3
H ₂ S	0,13 ± 0,04

Таблица 4.6. Результаты определения характеристик смеси жидких отходов от производства пальмового масла и свиного навоза

Параметр субстрата	Значение параметра	VDI Стандарт 4630
pH	$7 \pm 0,2$	6,8-7,4
Щелочность (мг-экв/л CaCO_3)	1118 ± 14	>1000
DCO (мг O_2 /л)	34000 ± 2017	-
DBO ₅ (мг O_2 /л)	13900 ± 960	-
MES (мг/л)	8200 ± 57	-
MVS (мг/л)	6830 ± 40	-
Общий азот (N общий), (м/л)	$1016 \pm 15,4$	-
DCO/N	33,46	30 - 35
Влажность (%)	$97,43 \pm 0,6$	Мин .65%

Таблица 4.7. Состав биогаза, производимого из смеси жидких отходов завода по производству пальмового масла и суспензии свиного навоза

Наименование	Содержание, %
CH ₄	$65 \pm 1,3$
CO ₂	$34,1 \pm 1,7$
H ₂ S	$0,1 \pm 0,03$

Таблица 4.8. Результаты определения характеристик смеси жидких отходов от производства пальмового масла и отходов скотобойни (с содержанием рубца)

Параметр субстрата	Значение параметра	VDI Стандарт 4630
pH	$7,1 \pm 0,1$	6,8-7,4
Щелочность (мг-экв/л CaCO_3)	1150 ± 15	> 1000
DCO (мг O_2 /л)	30500 ± 2118	-
DBO ₅ (мг O_2 /л)	14800 ± 1000	-
MES (в мг/л)	10000 ± 55	-
MVS (в мг/л)	8500 ± 40	-
Общий азот (N общий), (мг/л)	$950 \pm 29,9$	-
DCO/N	32,1	30-35
Влажность, (%)	$95,07 \pm 0,4$	Минимум 65%

Таблица 4.9. Состав биогаза, производимого из смеси жидких отходов завода по производству пальмового масла и отходов скотобойни (с содержанием рубца)

Наименование	Содержание, %
CH ₄	70 ± 1
CO ₂	28 + 1,2
H ₂ S	0,05 ± 0,02

Таблица 4.10. Результаты определения характеристик смеси жидких отходов от производства пальмового масла, коровьего навоза, свиного навоза и отходов скотобойни

Параметр субстрата	Значение параметра	VDI Стандарт 4630
pH	6,9 ± 0,1	6,8-7,4
Щелочность(мг-экв/л CaCO ₃)	1050 ± 15	> 1000
DCO (мг O ₂ /л)	30000 ± 2018	-
DBO ₅ (мг O ₂ /л)	13800 ± 960	-
MES (в мг/л)	8100 ± 57	-
MVS (в мг/л)	6630 ± 43	-
Общий азот (Нобций), (мг/л)	10000 ± 29,9	-
DCO/N	30	30-35
Влажность, (%)	95,07 ± 0,4	Минимум 65%

Таблица 4.11. Состав биогаза, производимого из смеси жидких отходов завода по производству пальмового масла, отходов скотобойни (с содержанием рубца), коровьего навоза и свиного помета

Наименование	Содержание, %
CH ₄	68 ± 1,2
CO ₂	31,1 ± 1,1
H ₂ S	0,1 ± 0,01

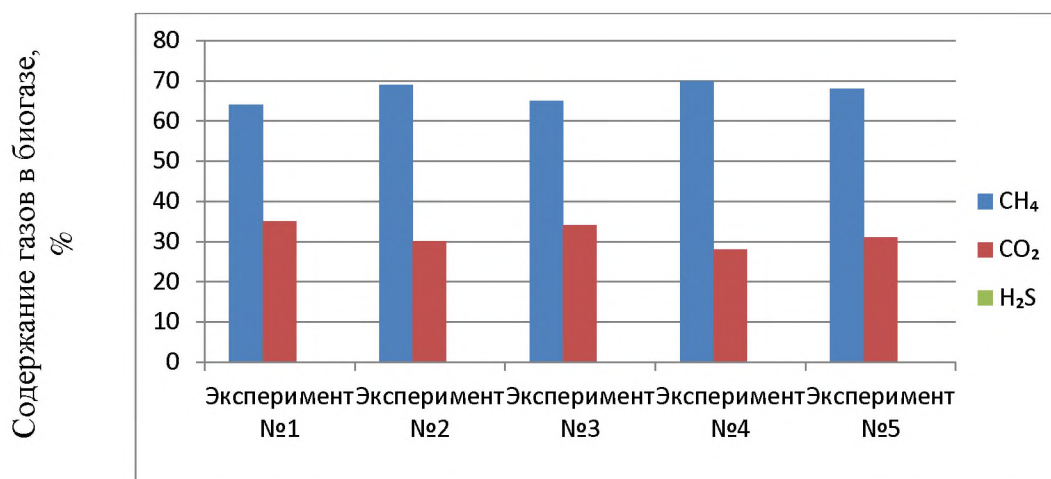


Рис. 4. 4. Экспериментальная гистограмма содержания газов в объеме биогаза

Эксперимент № 1. Состав биогаза, полученного на заводе из жидких отходов по производству пальмового масла.

Эксперимент № 2. Состав биогаза, полученного на заводе из смеси жидких отходов по производству пальмового масла и коровьего навоза.

Эксперимент № 3. Состав биогаза, полученного из смеси жидких отходов по производству пальмового масла и свиного помета.

Эксперимент № 4. Состав биогаза, полученного из смеси жидких отходов по производству пальмового масла и отходов скотобойни (с содержанием рубца).

Эксперимент № 5. Состав биогаза, полученного на заводе из смеси жидких отходов по производству пальмового масла, коровьего навоза, свиного помета и отходов скотобойни.

Таблица 4.14. Сравнение результатов биогаза, полученных диссертантом и другими авторами

Субстрат	Содержание биогаза, %			Автор(ы)
	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	
Коровьего навоза 1	62,4	33,9	0,35	Чернявский.А.А
Коровьего навоза 2	69,1	31,9	0,40	Чернявский.А.А
Коровьего навоза 3	66,9	34,4	0,63	Чернявский.А.А
Коровьего навоза 4	64,7	33,4	0,52	Чернявский.А.А
Городские очистные сооружения	65	34	1	Wang и др.
Эксперимент 1	64	35,1	0,1	Манигомба Ж.А.
Эксперимент 2	69	30	1,13	Манигомба Ж.А.
Эксперимент 3	65	34	0,1	Манигомба Ж.А.
Эксперимент 4	70	28	0,05	Манигомба Ж.А.
Эксперимент 5	68	31,1	0,1	Манигомба Ж.А.

4.3. Анализ экспериментальных исследований и практические выводы

4.3.1. Анализ экспериментальных исследований

В результате анализа анаэробного процесса в варочных котлах был сделан вывод, что, если сырье будет состоять из сбалансированного субстрата, состоящего из углерода и питательных веществ, а также анаэробных микроорганизмов, то процесс выделения биогаза будет более интенсивным.

Для получения объективных выводов по результатам анализа экспериментальных данных примем за основу немецкий стандарт VDI 4630, являющийся международным стандартом для анаэробных установок по получению биогаза [158-161]. По результатам анализа проб было установлено, что сырье в реакторах является богатым кислородом, который сбалансирован с азотом, что соответствует стандарту VDI 4630.

Химический кислородный показатель ХПК (DCO) характеризует необходимую потребность в кислороде и свидетельствует о высокой концентрации углерода в субстрате, который обрабатывается в биогазовой установке. Чем выше значение этого показателя, тем больше соотношение кислорода к азоту (ХПК/N), и тем ближе к предлагаемому соотношению в стандарте (ХПК/N = 30-35), что свидетельствует об увеличении массы вводимого в реактор субстрата, применяемого в производстве биогаза.

Биохимический кислородный показатель БПК₅ (DOB₅) указывает на содержание углерода, трансформируемого микроорганизмами в субстрате, участвующими в процессе получения биогаза. Чем выше значение этого показателя, который близок к ХПК для того же субстрата (около 80% ХПК), тем более субстрат является хорошей «пищей» для микроорганизмов, участвующих в процессе производства биогаза. В нашем случае снижение БПК₅ более, чем на 70% от ХПК, свидетельствует о том, что применяемый субстрат является хорошей «пищей» для микроорганизмов.

Параметр, определяющий выход летучих веществ (газообразный параметр биомассы) показывает, что вещества, присутствующие в виде органической суспензии, могут быть активизированы микроорганизмами, вовлеченными в биопроцесс.

Чем ближе этот параметр к взвешенным твердым частицам (MES), тем большего эффекта мы добьемся в процессе производства биогаза, при этом летучие взвешенные

частицы (MVS) находятся в диапазоне от 82 до 85% в конгломерате с твердыми веществами, что доказывает полезность сточных вод как питательной среды для микроорганизмов. Поэтому необходимо увеличить количество субстрата, богатого углеродом и азотом, как источников микроорганизмов (например, свежий коровий навоз или свиной помет).

Чем выше содержание влаги в субстрате, тем лучше контакт субстрата с микроорганизмами, что обеспечивает хорошее производство биогаза. Стандарт требует, чтобы влажность субстрата была не менее 65%. В исследуемых образцах этот уровень выше.

Поскольку в рассматриваемой работе предусматривается реализация биометана для производства электрической энергии, то необходима дополнительная очистка газа, включающая непрерывное фильтрование всего потока биогаза, в том числе и от сероводорода. Присутствие сероводорода (H_2S) в биогазе, как химически агрессивного газа, практически не допустимо, и по нормам стандарта его величина не должна превышать 0,1% от общего объема биогаза.

В нашем эксперименте мы эта норма выполняется. Однако, необходимо изыскивать пути к его снижению.

4.3.2. Практические выводы

1. Биогаз, получаемый из пальмового жидкого субстрата, на мини-заводе «Kirekura-Muzazi», в городе Бужумбура, республика Бурунди, содержит:

- CH_4 более 70%;
- H_2S около 0,1%;
- CO_2 около 30%.

Это свидетельствует о том, что получаемый биогаз может быть применен как для получения электроэнергии на дизель-генераторах, так и для бытовых целей.

2. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что смешивание субстрата с отходами завода пальмового масла и отходами со скотобойни позволяют получить биогаз следующего состава:

- CH_4 - 70%;
- H_2S - 0,5%;
- CO_2 - 28%.

3. Субстрат, состоящий из смеси производства пальмового масла и коровьего навоза, позволяет получить биогаз следующего состава:

- CH_4 - 69%;
- H_2S - 0,1%;
- CO_2 - 30,1%.

4. Субстрат, состоящий только из отходов производства пальмового масла, позволяет получить смесь биогаза следующего состава:

- CH_4 - 64%;
- H_2S - 0,13%;
- CO_2 - 35%.

5. Субстрат, состоящий из смеси производства пальмового масла и коровьего навоза, свиного помета и отходов скотобойни, позволяет получить биогаз следующего состава:

- CH_4 - 68 %;
- H_2S - 0,1 %;
- CO_2 - 31,1%.

Если рассматривать эту смесь как энергетическое топливо, то 64% метана позволяет говорить о практическом его применении, так как по нормам для биометанизации метан должен быть в пределах от 50 до 70%. Высокое содержание сероводорода свидетельствует о некачественной проварке исходного пальмового сырья в варочных котлах, но после специальной очистки всего объема биогаза от сероводорода, его можно будет успешно применять в промышленности и в быту.

6. Как следует из результатов экспериментов, степень кислотности (pH) в варочных котлах является близкой к норме. Но добавление извести в жидкий субстрат в определенной концентрации, позволит интенсифицировать как химический, так и биологический процессы брожения, и тем самым увеличить выход биогаза из субстрата.

7. Рассматривая количество газа, производимого каждый день на действующем мини-заводе, который перерабатывает 6,0 тонн в сутки пальмовых орехов, можно сделать вывод, что при его полной автоматизации и интенсификации варочного процесса, можно добиться увеличения производительности в несколько раз и тем самым приблизиться по производству биогаза к действующим промышленным заводам Европы, что позволит частично решить энергетическую проблему в республике Бурунди.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ БИОМЕТАНА НА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В РЕСПУБЛИКЕ БУРУНДИ

Для решения дефицита электроэнергии правительство Бурунди предлагает несколько направлений одним из которых является использование бытовых, сельскохозяйственных и промышленных отходов.

В качестве топлива рассмотрим применение биомассы растительного происхождения из отходов переработки зерновых культур, таких как: рис, кофе, сорго, горох, фасоль, кукуруза, масличная пальма а также торф и древесные опилки.

5.1. Рекомендации по модернизации дизель-генераторов для работы на биогазе и оценка технико-экономической эффективности.

5.1.1. Возможности использования сжиженного метана

В настоящее время в республике Бурунди эксплуатируются три дизельные электростанции – «Вија - 1, 2, 3», которые при установленной электрической мощности в 20,5 МВт, потребляют около 6000 кг дизельного топлива в час [133].

Из приведенного в таблице 3.10 следует, что наиболее энергетическим газом является метан – CH_4 . После его выделения за счёт пиролиза растительного топлива он может направляться на установку сжижения, что достаточно удобно для его применения, как уже применяемого жидкого пропана.

Процессы получения сжиженного метана из природного газа, из пиро- и биогаза технологически одинаковы и приемлемы для решения нашей задачи.

Теоретически W_r (минимальная работа, выполняемая для сжижения метана) является функцией только первоначального состояния газа и конечного состояния жидкости, и не зависит от вида применяемого процесса. Определение W_r выполняется по формуле (5.1) [98]:

$$W_r = T_o \Delta S - \Delta h, \text{ кДж}, \quad (5.1)$$

где:

W_r – минимальная (или обратимая) работа, кДж;

T_0 – температура окружающей среды, в которую может быть отведено тепло, °С;

ΔS – уменьшение энтропии при переходе газа от начального до конечного состояния, кДж/кг×град;

Δh – уменьшение энтальпии при переходе газа от начального состояния до конечного, кДж/кг.

Вычисленная теоретически по этой формуле минимальная работа, которая требуется для превращения метана, находящегося под давлением 34 кг/см² и при температуре 38°С, в жидкость при атмосферном давлении и температуре –161,5°С, составляет 117 кВт*ч/100 м³ сжиженного газа.

Действительные же затраты работы будут находиться в пределах 285÷632 кВт*ч/100 м³ сжиженного газа и зависят, главным образом, от цикла, используемого для сжижения.

Считается, что величина 285 кВт*ч/100 м³ сжиженного газа близка к экономически минимальному значению, что в нашем случае для тропической республики Бурунди неприемлемо. Поэтому будем рассматривать только газовую фракцию пиролиза и биогаза и его применение в народном хозяйстве Бурунди.

Как следует из теории тепловых машин, к которым относится и дизельный двигатель внутреннего сгорания, термодинамический к.п.д. (η_t) двигателя зависит от количества подведенного (Q_1) и отведенного (Q_2) тепла.

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (5.2)$$

В дизельном процессе впрыснутое дизельное топливо эффективно и полностью сгорает только при значительном избытке окислителя. На «пределе дымления», т.е. на максимальной мощности, дизельный двигатель использует не более 75% кислорода воздуха. Из-за этого эффекта мощность дизеля на 25% ниже мощности двигателя Otto. Исправление этого недостатка дизеля возможно тремя методами:

1. С помощью турбокомпрессора (высокая стоимость).

2. С помощью впрыска дополнительного более мощного окислителя типа закиси азота. Этот способ для республики Бурунди не приемлем из-за высокой стоимости окислительной установки.

3. С помощью подачи дополнительного, более активного топлива, которое сможет задействовать кислород, остающийся после сгорания дизельного топлива, что нам более приемлемо при условии получения собственного активного топлива – метана из биогаза.

Из теории тепловых машин также известно, что если в цилиндре дизеля полезно применяется 25% неиспользованного при сгорании дизельного топлива кислорода, то это позволяет повысить эффективность дизеля как двигателя на 25%. Для этого вместе с дизельным топливом в камеру сгорания подают любой из доступных горючих газов — метан, пропан, бутан и т.п.

С точки зрения процессов сгорания в дизельном двигателе оптимальным выбором является метан. У него высокие октановое число (более 100) и температура самовоспламенения (700-800°С), что позволяет не только выжечь незадействованный кислород, но и повысить мощность двигателя и его термодинамический к.п.д., и тем самым значительно заменить дизельное топливо. Помимо этого метан содержит большой процент атомов водорода в молекуле, который является активным веществом и может эффективно окисляться кислородом воздуха даже в условиях, когда горение других веществ в ДВС уже невозможно. Термодинамический к.п.д. (η_t) дизеля можно определить по следующей формуле:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \quad (5.3)$$

где:

c_v – удельная теплоемкость топлива при изохорном процессе его расширения в цилиндре двигателя, ккал/кг*град;

C_p - удельная теплоемкость топлива при изобарном процессе его расширения в цилиндре двигателя, ккал/кг*град;

T_2 и T_3 - температуры рабочего тела соответственно до подвода теплоты и после;

T_4 и T_1 – температуры рабочего тела до отвода теплоты и после него.

Отсюда следует, что применение метана из биогаза вполне приемлемо и экономически выгодно в условиях топливного дефицита для работы дизель-электрогенераторов в республике Бурунди.

5.1.2. Реконструкция блока цилиндров дизель-генераторов под биометан

Для возможного применения биометана в конструкции двигателя дизель-генераторов республики Бурунди необходимо установить специальную топливную аппаратуру (испаритель и подогреватель биометана, газовый редуктор, смеситель газа с воздухом).

Так как температура воспламенения газозвушной смеси от сжатия в цилиндре обычного дизеля составляет около 700°C , а дизельное топливо воспламеняется при $320\text{—}380\text{ C}$, то топливный насос высокого давления (ТНВД) и форсунки сохраняются. В цилиндры двигателя подаётся «запальная» доза дизельного топлива около 15-30% от номинального значения до реконструкции.

Переделанный дизельный двигатель сохраняет возможность работы на дизельном топливе и при отсутствии биометана.

Но возможна реконструкция дизель-генераторов, если на переделанный дизельный двигатель устанавливается система зажигания (свечи зажигания), то газодизель превращается в газовый двигатель, работающий по циклу Отто.

В этом случае возможность работы на дизельном топливе отсутствует. В наших условиях второй вариант реконструкции неприемлем.

Реконструкция дизель-генераторов на газодизель позволит:

1) увеличить ресурс двигателя за счет снижения давления в нагнетателе жидкого топлива высокого давления, т.к. система оснащена датчиками слежения температу-

ры отработавших газов, что позволяет не допускать перегрева двигателя и тем самым избежать его детонации;

2) сохранить мощность двигателя, хотя при необходимости можно увеличить его крутящий момент;

3) экономить дизельное топливо на 70-85% за счёт перевода двигателя в режим газодизеля;

4) создать источники двойного топлива, т.к. при аварийном прекращении подачи пирогаза автомат переключает топливную систему на дизельное топливо;

5) обслуживать газодизельную установку без покупки специальных запасных частей, т.к. все запчасти к двигателю остаются штатными.

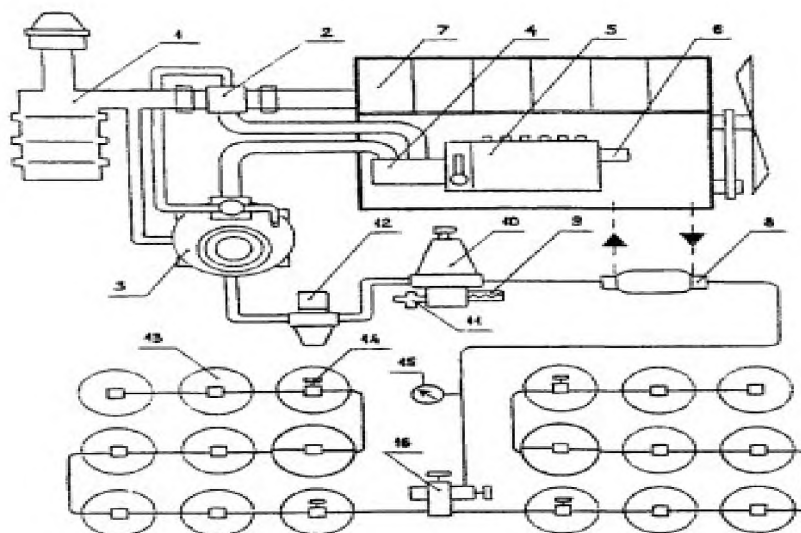


Рис. 5.1. Схема системы подачи топлива в газодизель

Система подачи топлива в газодизель (рис. 5.1) состоит из: 1 - воздухоочиститель; 2 - смеситель; 3 - редуктор низкого давления; 4 - дозатор; 5 - ТНВД (турбонаддув высокого давления); 6 - ограничитель запальной дозы жидкого топлива; 7 - дизель; 8 - подогреватель газа; 9 - предохранительный клапан; 10 - редуктор высокого давления; 11 - датчик давления; 12 - электромагнитный клапан-фильтр; 13 - баллон; 14 - расходный вентиль; 15 - манометр; 16 - крестовина с заправочным (наполнительным) дозатором газа.

Основной принцип работы системы питания газодизеля (рис. 5.1) заложен на свободном всасывании газа под действием разрежения во впускном тракте ДВС. Выходящий из баллонов 13 газ, прогревается до температуры не ниже 15°C в теплообменнике 8 жидкостью, которая используется для охлаждения воздушного компрессора двигателя, и поступает в редуктор высокого давления 10.

Под давлением, сниженным до 0,1 МПа, газ подается к электромагнитному клапану 12 с фильтром, который очищает его от различных механических примесей. В редукторе 3 давление газа снижается двумя ступенями (сначала до 0,02 МПа, а затем до нуля), и он через диффузор смесителя 2 засасывается турбокомпрессором во всасывающий коллектор двигателя.

Дозирование газа осуществляется регулируемым дросселем дозатора 4, который в режиме газодизеля управляется штатным регулятором ТНВД 5. Разрежение, которое создается в диффузоре смесителя 2, передается разгрузочному устройству двухступенчатого редуктора 3.

Ограничитель запальной дозы 6 выполнен в виде жесткого упора рейки ТНВД с приводом от электромагнита. В климатических условиях республики Бурунди узел 8 (подогреватель газа) можно не применять, что позволит удешевить топливоподачу в газодизель.

При работе двигателя в режиме газ-дизель 70–85% газовойоздушной смеси сгорает без детонации с наибольшей эффективностью [165].

5.1.3. Оценка затрат на получение пиролизного газа и биогаза для дизель-электрогенераторов электростанций «*Vuja*»

Для оценки возможного замещения жидкого топлива биометаном для производства электрической энергии дизель-генераторами Бурунди в табл. 5.1, 5.2 и 5.3 приведены их технические характеристики.

Таблица 5.1 Технические характеристики дизель-генераторов
электростанции «Вија – 1»

Двигатели	
Модель	MTU16V4000G23, Германия
Количество, шт	4
Число цилиндров, шт	16
Расположение цилиндров	V-образное
Диаметр цилиндра, мм	170
Ход поршня, мм	210
Коэффициент сжатия	14:1
Рабочий объем цилиндра, л	76,3
Основная мощность, кВт (л.с.)	1798 (2411)
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	1500
Удельный расход топлива при 1500 об/мин, г/(кВт ч): - при 100% мощности:	199
Тип топлива	Дизельное
Расход топлива, л/час	360
Расход масла на угар, % от расхода топлива, не более	0,5
Масляные фильтры	Многоступенчатый масляный-фильтр
Пусковое устройство	Электростартер, 24 В
Система смазки, л	260
Система охлаждения, л	200
Минимальная температура запуска, °С	- 44
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	2865 × 1660 × 1810
Масса двигателя, кг	7700
Ресурс до капитального ремонта, ч	30000

Генератор	
Количество	4
Номинальная полная мощность (S_n), кВт	2000
Номинальная активная мощность (P_n), кВт	1600
Установленная мощность станции, МВт	5
Частота тока, Hz	50
$\cos\varphi$	0.8
Напряжение генератора, кВ	0,4
Напряжение после трансформации, кВ	30
Сила тока, А	115
Система охлаждения	IC01
Система исполнения	IP23

Таблица 5.2. Технические характеристики дизель-генератора электрической станции *Vijsa 2*

Двигатели	
модель	Дизель ABC, Бельгия
Количество, шт	4
Расположение цилиндров	V-образное
Число цилиндров, шт	16
Диаметр цилиндра, мм	166
Ход поршня, мм	208
Коэффициент сжатия	14:1
Рабочий объем цилиндра, л	75
Основная мощность, кВт	1780
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	1500

Удельный расход топлива при 1500 об/мин, г/(кВт ч): - при 100% мощности:	190
Тип топлива	Дизельное
Расход топлива, л/час	380
Расход масла на угар, % от расхода топлива, не более	0,5
Масляные фильтры	Многоступенчатый масляный фильтр
Пусковое устройство	Электростартер, 24 В
Система охлаждения - вода, л	200
Минимальная температура запуска, °С	-40
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	2860 × 1662 × 1812
Масса двигателя, кг	7500
Ресурс до капитального ремонта, ч	30 000
Генератор	
Количество	4
Номинальная полная мощность(S_n), кВА	2000
Номинальная активная мощность(P_n), кВт	1600
Установленная мощность станции, МВт	5,5
Частота, Hz	50
$\cos\varphi$	0.8
Напряжение генератора, кВ	0.4
Напряжение после трансформации, кВ	30
Ток, А	115
Система охлаждения	IC01
Система исполнения	IP23

Таблица 5.3. Технические характеристики дизель электрической станции *ВијаЗ*

Двигатели	
Модель	Дизель «Катерпиллер», США
Количество, шт	7
Число цилиндров, шт	16
Расположение цилиндров	V-образное
Диамет рцилиндра, мм	160
Ход поршня, мм	200
Коэффициент сжатия	15,5:1
Рабочий объем цилиндра, л	75
Основная мощность, кВт (л.с.)	1798 (2411)
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	1500
Удельный расход топлива при 1500 об/мин, г/(кВт ч): - при 100% мощности	199
Тип топлива	Дизельное
Расход топлива, л/час	390
Расход масла на угар, % от расхода топлива, не более	0,5
Масляные фильтры	Многоступенчатый масляный фильтр
Пусковое устройство	Электростартер, 24 В
Система смазки, л	300
Система охлаждения, л	200
Минимальная температура запуска, °С	- 35
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	3000 × 1650 × 1800
Масса двигателя, кг	7750
Ресурс до капитального ремонта, ч	30 000

Генератор	
Количество	7
Номинальная полная мощность (S_n), кВт	2000
Номинальная активная мощность (P_n), кВт	1600
Установленная мощность станции, МВт	10
Частота тока, Hz	50
$\cos\varphi$	0.8
Напряжение генератора, кВ	0,4
Напряжение после трансформации, Кв	30
Сила тока, А	115
Система охлаждения	IC01
Система исполнения	IP23

5.1.3.1. Расчет топлива для дизель-генераторов электростанции «*Vijsa – 1*» с применением пиролизного газа

Из паспортных данных дизель-генераторов следует, что потребление дизельного топлива на один дизель-генератор составляет 0,199 л/кВт*ч. Отсюда потребность в топливе на установленную мощность в 1798 кВт составит: $1798 \text{ (кВт)} \times 0,199 \text{ (л/кВт*ч)} = 357,8 \text{ л/ч}$. В сутки – $24 \text{ час} \times 357,8 \text{ (л/ч)} = 8587 \text{ литров}$ для одного дизель-генератора.

Определим сколько нужно топлива в виде торфа, рисовой соломки или другого биотоплива, чтобы заменить дизельное топливо на пиролизный газ из газогенератора для одного дизель-генератора, мощностью 1798 кВт типа «MTU». Нами установлено, что калорийность растительной биомассы в виде брикетов составляет 20,5 МДж/кг (5,7 кВт), для получения электрической мощности 2,0 кВт требуется $1,0 \text{ м}^3$ природного газа с калорийностью около 31,8 МДж/кг (8,8 кВт). Калорийность дизельного топлива составляет – 42,7 МДж/кг (12,0 кВт). Также известно, что $1,0 \text{ м}^3$ пиролизного газа по энергетической способности эквивалентен 0,61 л дизельного топлива.

Отсюда $1,5 \text{ м}^3$ пиролизного газа могут заменить $1,0$ литр дизельного топлива. Нам нужно выполнить замещение 85% (примем максимально возможное значение) дизельного топлива в дизель-генераторе, что составляет 7299 литров от суточного расхода в 8587 литров. Объем в 7299 л/сутки дизельного топлива соответствует 10949 м^3 /сутки пиролизного газа из растительного биотоплива (брикеты). Из $1,0$ тонны растительной биомассы можно получить $258,7 \text{ м}^3$ пиролизного газа калорийностью $4300\text{-}5500$ ккал/кг ($18\text{-}20$ МДж/кг или $5,0$ кВт). Отсюда следует, что для получения 10949 м^3 пиролизного газа необходимо биомассы в размере 42 тонн в сутки.

Для 4-х дизель-генераторов MTU это составит 168 т в сутки растительной биомассы.

5.1.3.2. Расчет топлива для дизель-генераторов электростанции «*Vija – 2*» с применением пиролизного газа

Из паспортных данных дизель - генераторов следует, что потребление дизельного топлива на один дизель-генератор составляет $0,190$ л/кВт*ч. Отсюда потребность в топливе на установленную мощность в 1780 кВт составит: 1780 (кВт) \times $0,190$ (л/кВт*ч) = $338,2$ л/ч. В сутки: 24 (часа) \times $357,8$ (л/ч) = 8117 литров для одного дизель-генератора.

Определим, сколько нужно топлива в виде торфа, рисовой соломки или другого биотоплива, чтобы заменить дизельное топливо на пиролизный газ из газогенератора для одного дизель - генератора, мощностью 1798 кВт типа «ABC». Известно, что калорийность растительной биомассы в виде брикетов составляет $20,5$ МДж/кг ($5,7$ кВт). Для получения электрической мощности $2,0$ кВт требуется $1,0 \text{ м}^3$ природного газа с калорийностью около $31,8$ МДж/кг ($8,8$ кВт). Калорийность дизельного топлива составляет $42,7$ МДж/кг ($12,0$ кВт). Также известно, что $1,0 \text{ м}^3$ пиролизного газа по энергетической способности эквивалентен $0,61$ л дизельного топлива.

Отсюда, $1,5 \text{ м}^3$ пиролизного газа могут заменить $1,0$ л дизельного топлива. Необходимо выполнить замещение 85% (примем максимально возможное значение) дизельного топлива в дизель-генераторе, что составляет $6899,45$ л от суточного расхода в

8117 литров. Объем в 6899,45 литров в сутки дизельного топлива соответствует 10350 м^3 в сутки пиролизного газа из растительного биотоплива. Из 1,0 тонны растительной биомассы можно получить $258,7 \text{ м}^3$ пиролизного газа с калорийностью 4300-5500 ккал/кг (18-20 МДж/кг или 5,0 кВт). Отсюда следует, что для получения 10350 м^3 пиролизного газа необходима биомасса в размере 40,5 тонн в сутки.

Для четырех дизель-генераторов АВС это составит 162 тонн в сутки растительной биомассы.

Для двух дизель-генераторов электростанции «Вија-1» и «Вија-2» необходимо биомассы в размере 330 тонн в сутки. Для выполнения работ по выработке пиролизного газа из приведенного выше количества растительного сырья предлагается применить уже действующие российские пиролизные заводы-комплексы, которые, в зависимости от объема и вида сырья, позволяют переработать в сутки 250-400 тонн биотоплива растительного происхождения.

5.1.3.3. Второй способ расчета количества биомассы для дизель-генераторов электростанций «Вија -1 и 2» с применением пиролизного газа

В нашем случае необходимо заменить жидкое дизельное топливо биометаном из пиролизного газа. Суммарное потребление топлива для этих двух дизельных электростанций мощностью 10,5 МВт, составляет 2960 л/час, что соответствует 10,5 мегаваттам. Отсюда, суточный расход дизельного топлива составит: $24 \text{ (часа)} \times 2960 \text{ (л/ч)} = 71040 \text{ литров (59762 кг топлива)}$.

Известно, что калорийность дизельного топлива составляет – 42,7 МДж/кг (12,0 кВт), а калорийность пиролизного метана составляет 35,80 МДж/м³.

Также известно, что плотность метана равна 0,71 кг/м³. Тогда калорийность метана составит 50,4 МДж/кг (14,0 кВт).

В свою очередь, калорийность 1,0 кг дизельного топлива по энергетической способности эквивалентна 0,85 кг пиролизного метана. Отсюда, 0,85 кг метана могут заменить 1,0 кг дизельного топлива.

Необходимо выполнить замещение 85% дизельного топлива в дизель-генераторе, что составит 50797,7 кг дизельного топлива (43178,045 кг метана) от 59762 кг суточного расхода.

Из 1,0 тонны растительной биомассы можно получить 315 кг пиролизного метана. Для получения 43178,045 кг метана необходимо биомассы в количестве 137,8 тонн в сутки.

В результате пиролиза, помимо газа, из 1,0 тонны биотоплива можно дополнительно получить следующие коммерческие продукты:

1) древесный уголь - 150-200 кг с калорийностью 5000-5500 ккал/кг, который можно успешно применять также в пиролизной установке для поддержания непрерывного процесса, и тем самым сократить расходы биотоплива на 25-30%. Этот уголь также можно применять и в быту, как один из легкодоступных видов топлива для приготовления пищи;

2) 240 кг синтетической нефти в качестве топлива для бытовых и промышленных целей. По калорийности это топливо не уступает жидкому углеводородному топливу, которое после дополнительной очистки можно довести до высококачественного бензина типа А-95, при этом расходы на его получение увеличатся не более, чем на 1,0-1,5%, а также - топочный мазут, который можно успешно применять как в котельных установках, так и в смеси с торфом месторождений Бурунди для интенсификации выхода биогаза до 95-97% при флеш-пиролизе.

3) 120 кг полукокса. При полукоксовании биотоплива получают твёрдый горючий остаток – полукокк и летучие продукты. Полукокк используют как легко загорающее бездымное твёрдое топливо в промышленности и быту.

5.1.3.4. Расчет необходимого количества биогаза для работы дизель-генераторов электростанции «Vuja – 3»

Из паспортных данных дизель-генераторов известно, что потребление дизельного топлива на один дизель-генератор составляет 0,199 л/кВт*ч [50]. Отсюда потреб-

ность в топливе на установленную мощность в 1798 кВт составит 357,8 л/ч., а в сутки - 8587 литров для одного дизель-генератора.

Определим, сколько нужно биогаза, чтобы заменить дизельное топливо на метан из биогаза для одного дизель-генератора, мощностью 1798 кВт типа «Катерпиллер». Известно, что калорийность биометана 22-24 МДж/м³ (6 кВт). Известно, что 1,0 м³ биометана по энергетической способности эквивалентен одному литру дизельного топлива.

Нам нужно выполнить замещение 85% дизельного топлива в дизель-генераторе, что составляет 7299 литров от суточного расхода в 8587 литров.

Объем в 7299 л в сутки дизельного топлива соответствует 7299 м³ в сутки биометана. Согласно приведенному эксперименту биогаз состоит из: CH₄ - 70%; H₂S - 0,5%, CO₂ - 28%, следовательно, 10428 м³ в сутки биогаза калорийностью 22-24 МДж/м³ (6 кВт) для семи дизель-генераторов «Катерпиллер» составит 72996 м³ в сутки биогаза.

5.1.3. Эксплуатация установки

В течение первого года эксплуатации после пуска в работу газогенератор необходимо очищать ежемесячно, техническое обслуживание - ежемесячно, а технический осмотр - ежеквартально. Внутренняя очистка - не реже одного раза в год. Содержание золы и смолы должно быть не более: 25 мг смолы на кубический метр, 20-30% золы на – тонну.

На рисунках 5.2 и 5.3 показаны схемы электротехнологических комплексов для электростанций Вуја 1,2,3.

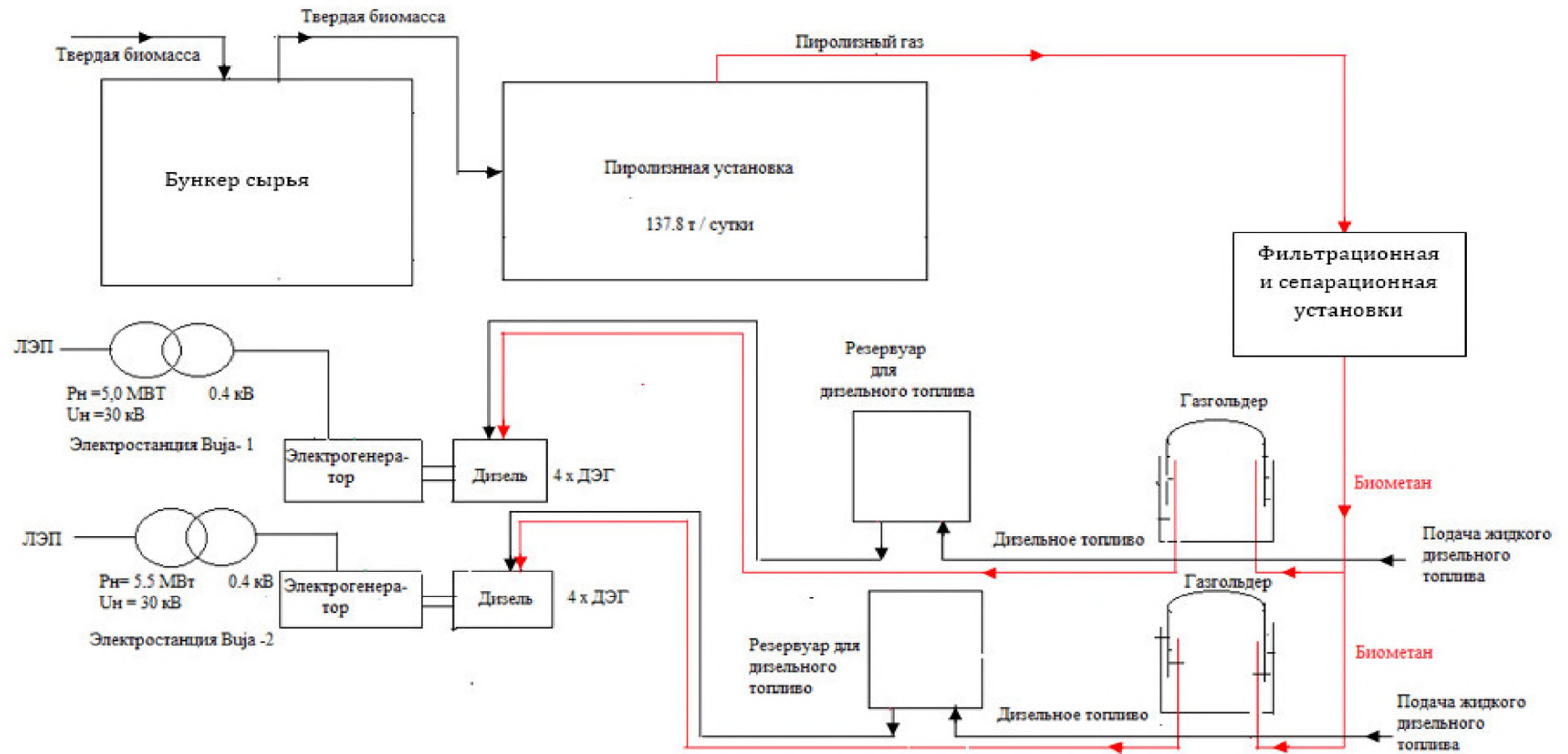
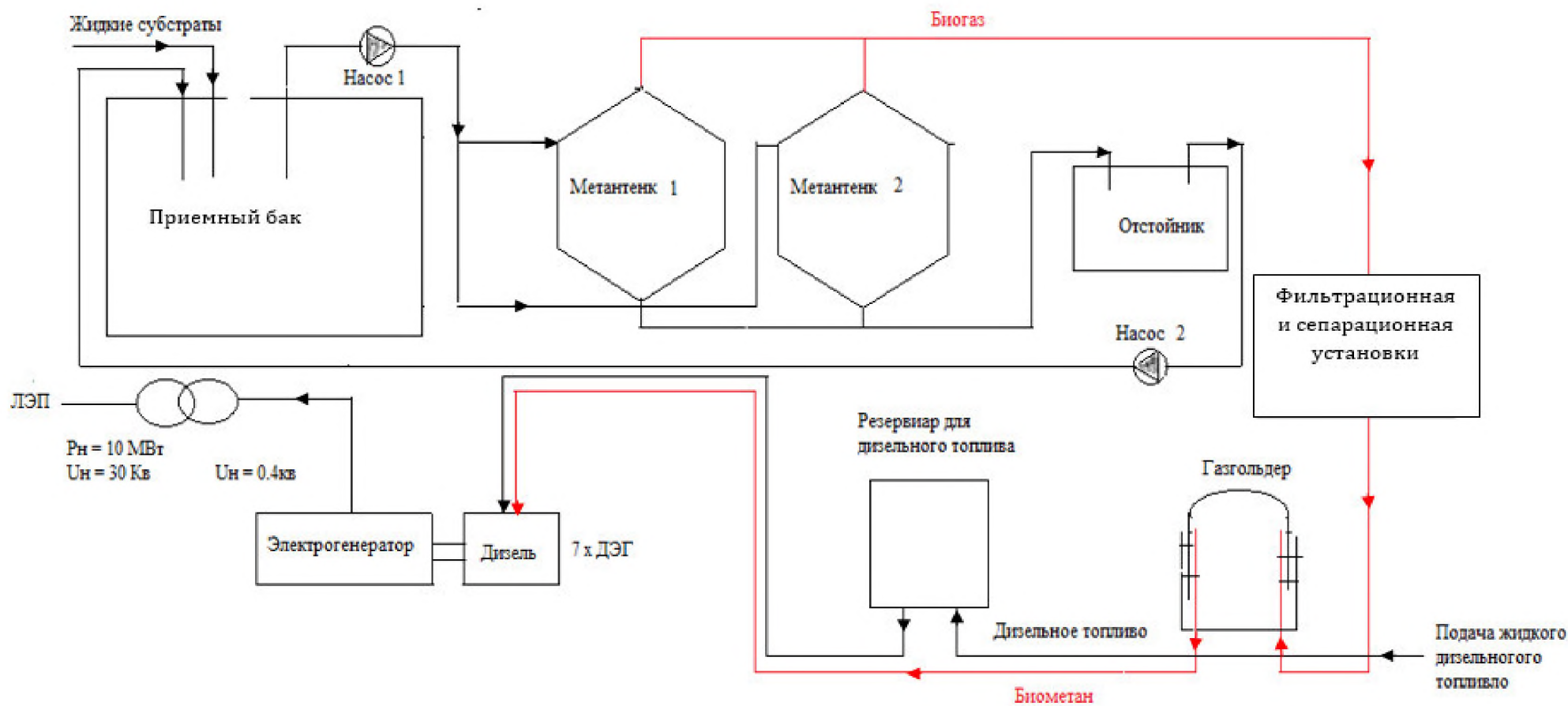


Рис 5.2. Схема энерготехнологического комплекса для дизель-электрогенераторных электростанций Вижа -1,2



5.3. Схема энерготехнологического комплекса для дизель-электродвигательной электростанции Вижа -3

Энерготехнологический комплекс, представленный на рисунке 5.2, включает в себя следующие операции. Твердая биомасса поступает в бункер сырья, выполняющий роль склада и измельчителя, из которого механическим путем (транспортером) поступает в пиролизную установку. В пиролизной установке происходит ее пиролизное сжигание. Полученный пиролизный газ поступает в систему очистки и фильтрации, где очищается от сероводорода и механических примесей, затем поступает в газгольдер выдержки, где отстаивается от растворенной влаги, а затем направляется в дизельный привод электрогенератора. В качестве запального топлива в цилиндры дизеля подается дизельное топливо, хранящееся в резервуаре.

Энерготехнологический комплекс, представленный на рисунке 5.3, работает следующим образом. Жидкий субстрат поступает на склад (приемный бак), где отстаивается и шнековым транспортером подается в метантенки (1, 2). Из метантенков, уже в виде биогаза, направляется на очистку, а затем - в газгольдер выдержки, где отстаивается от растворенной в нем жидкости, и подается в дизельный двигатель электрогенератора. В качестве запального топлива в цилиндры дизеля подается дизельное топливо, хранящееся в резервуаре.

5.2. Рекомендации по модернизации карбюраторных двигателей для их перевода на биогаз и оценка технико-экономической эффективности

В настоящее время в мировой практике широко применяется газовое оборудование для автомобилей в основном двух типов:

1 LNG (*Liquified Natural Gas*) – сжиженный природный газ. Получают при охлаждении природного газа до температуры – 160°C. При этом происходит сжатие газа по объему в 600 раз, а его масса уменьшается вдвое по сравнению с газообразным состоянием.

2 CNG (*Compressed Natural Gas*) – сжатый природный газ (метан - газообразные углеводороды, образующиеся в земной коре), являющийся высокоэкономичным энергетическим топливом.

3 LPG (*Liquified Petroleum Gas*) – сжиженный газ (пропан-бутан, газ - полученный при добыче и переработке нефти). В жидкое состояние переводят при охлаждении до критической температуры и последующей конденсации в результате отвода теплоты парообразования.

4 SNG (*Synthetic natural gas*) – синтезированный природный газ (СПГ - газ, полученный из угля или нефти, состоящий из тех же основных химических элементов, что и природный газ, и имеющий такие же горючие свойства).

В автомобилях в основном применяют CNG - сжатый газ (метан) и LPG – сжиженный природный газ (пропан-бутан). Для этого используется принципиально различное оборудование.

5.2.1. Метановая газовая установка (CNG)

Метановое оборудование предназначено для использования сжатого метана в качестве топлива. Баллон, в который закачивается газ, должен выдерживать давление 300 атмосфер, как и газопроводная арматура, предназначенная для заправки и подведения газа от баллона до понижающего редуктора. На практике в баллон закачивают газ под давлением 200 атмосфер.

Баллоны высокого давления для легковых автомобилей пока еще редко применяются из-за большого веса, поэтому они эксплуатируются на грузовых автомобилях и автобусах. В настоящее время стоимость 1,0 м³ сжатого метана составляет \$ 0,2.

Рассчитаем экономию перевода автомобиля с бензина на газ. Предположим, что автомобиль на 100 км потребляет 10 л бензина (10 литров бензина АИ-92 стоимостью \$ 1,3 и 10 м³ метана стоимостью \$ 2 в Бурунди). Экономия на 10 км составит \$ 11, на 10000 км – \$ 1110, на 30000 км – \$ 3300 (30000 км - это среднегодовой пробег автомобиля).

Стоимость установки CNG – \$ 1700-2100 (основную стоимость составляет стоимость специального баллона). Отсюда следует, что затраты перевода на мета-

новый двигатель уже окупятся на первых 30000 км или в течение первого года эксплуатации автомобиля на метане.

5.2.1. Пропан-бутановая газовая установка (LPG)

Пропан – побочный продукт нефтепереработки, что и определяет его стоимость в 0,25 дол. Самое простое газовое оборудование с моновпрыском непосредственно во впускной коллектор бензинового двигателя обойдется около 1000-1500 дол., включая оборудование и работу по переводу двигателя на газ. Пропановые баллоны достаточно компактны и стандартный баллон на 60 литров дает возможность проехать более чем 600 км на одной заправке, при этом стоимость заправки составит 15,0 дол. Стоимость заправки шестьюдесятью литрами бензина, по цене одного литра бензина в 1,3 дол. равняется 78 дол., что в пять раз дороже.

При переводе двигателя на пиролизный газ, как более эффективный, стоимость того же шестидесятилитрового баллона обойдется 7,80 дол., что в 11 раз дешевле бензинового топлива, и на этом баллоне можно будет проехать около 750 км.

Если «классический» четырехцилиндровый двигатель можно перевести на газ с помощью простейшего газового оборудования первого поколения, то шестивосьмицилиндровые двигатели требуют более «серьезного» подхода.

Отдельные блоки электронного управления с впрыском в установках четвертого поколения и газовые магистрали с насосами в установках будут стоить \$ 2000-3000. Эти затраты также окупятся в первый год эксплуатации на пропане.

Определим окупаемость наших вложений для этих крупных двигателей при цене 1,0 литра пропана в 0,25 дол. и бензина - 1,3 долларов.

Рассчитаем экономию такого перевода автомобиля с бензина на газ. Предположим, что наш автомобиль на 100 км потребляет 10 л бензина (10 литров бензина АИ-92 стоимостью 13 дол.) и 10 литров пропана (10 литров пропана стоимостью 2,5 дол.). Экономия на 10 км составит 11,5 дол., а на 10000 км. – 1150 дол.,

на 30000 км. – 3450 дол. (30 000 км - это среднегодовой пробег автомобиля). Стоимость установки CNG составляет 2000-2500 дол.

Отсюда следует, что затраты перевода на метановый двигатель уже окупятся на первых 30000 км или в течение первого года эксплуатации автомобиля на пропане.

Следовательно, оборудование LPG и CNG является окупаемым. Если же машина за год проходит 10000 км, то установка газовой аппаратуры не выгодна.

5.3. Расчет технико-экономических показателей и оценка экологической эффективности

5.3.1. Применение пиролизного газа

Стоимость одного комплекса пиролизной установки составляет 2,595 млн. долларов. Для создания резерва мощности с учётом расширения производства пиролизного дизельного топлива и газа, выбрана пиролизная установка мощностью до 250 тонн, при этом накладные расходы составят 50% от стоимости самого комплекса. Итак, накладными расходами являются:

1. Разработка проекта комплекса под индивидуальные условия требований заказчика.
2. Расходы по доставке комплекса к порту отгрузки исполнителя.
3. Доставка комплекса к порту назначения – г. Бужумбура, республика Бурунди.
4. Транспортные расходы, связанные с доставкой к месту назначения в республике Бурунди.
5. Строительство промышленной площадки под комплекс по месту назначения.
6. Монтаж комплекса.
7. Наладка комплекса после монтажа.
8. Испытания комплекса после наладки.
9. Обучение персонала для работы на комплексе.

10. Сдача комплекса в эксплуатацию по Акту сдачи-приёмки.

11. Командировочные и суточные расходы персонала завода-изготовителя.

Табл. 5.4. Калькуляция цены пиролизного комплекса

№ п/п	Наименование	Стоимость, \$
1.	Секция №1 Пиролиза	673 750
2.	Секция №2 Испарения	778 240
3.	Секция №3 Крекинга	645 900
4.	Секция №4 Газификации	497 110
Итого:		2 595 000
5.	Накладные расходы	1297500
Всего:		3892 500

5.3.2. Применение установки биогаза

Для производства биогаза количеством 72996 м³ необходимо построить новую биогазовую установку. По оценкам специалистов это может обойтись \$ 1,5-1.8 млн. Для автоматизации и интенсификации варочного процесса также предлагается создание инструментального мониторинга и контроля за работой анаэробной установки.

Табл. 5.5. Калькуляция стоимости биогазовой установки

№ п/п	Наименование	Стоимость, \$
1	2	3
1.	Постройка метантенков	1 500000
2.	Компрессор газовый, поршневой, масляный, электрический	7800
3.	Фильтр, газовый, комбинированный	3560
4.	Газоанализатор переносной	5260
5.	Газгольдер мягкий, для хранения биогаза	484600
6.	Компьютер с программным обеспечением и коммутационными кабелями	14538
7.	Датчик давления	8366
8.	Пирометр температуры биогаза	3680
9.	Датчики уровня загрузки сырья в реактор	11140

10.	Датчики направления, периода и частоты вращения механического смесителя для смешивания биомасса	13356
11.	Датчики температуры для сырья в реакторах, цифровые	9140
12.	Затраты на специализированные технические средства и обучение персонала	15000
Итого:		2071180

Реконструкция блока цилиндров дизель-генераторов под биометан, составляет \$ 1500-2000 для одного дизель-генератора, а для 15 дизель-генераторов – \$ 22.500-30.000. Тогда суммарные затраты нашего проекта составят \$ 5 986 180, или около \$ 6 млн.

Нами установлено, что стоимость пиролизной и биогазовой установок для получения биометана по замещению жидкого дизельного топлива на пятнадцати ДЭГ, равна примерно 6,0 млн. долларов.

Для замещения жидкого дизельного топлива газообразным топливом требуется 81325 м³ в сутки биометана, (условно принимаем 100 тысяч м³ в сутки).

Годовая стоимость полученного биометана составит 1,1 млн. долларов, из расчёта, что товарная стоимость 1,0 м³ составляет \$ 0,03 (*справка хозяина мини-биоавода в городе Бужумбура, республика Бурунди*).

Подсчитано, что 15% дизельного топлива от необходимого - 144000 л в сутки, составляет 21600 л в сутки или по стоимости \$ 9792000 в год, т.е. ≈ 9,8 млн. долларов в год, при стоимости одного литра дизельного топлива в Бурунди, равной \$ 1,3 (*данные на 2018 год*).

Отсюда следует, что общая годовая стоимость газодизельного топлива составит: 1,1 млн. долларов плюс 9,8.млн. долларов в год - всего 10,9 млн. долларов в год.

В свою очередь, годовая стоимость всего необходимого дизельного топлива (144000 л в сутки) на 15 ДЭГ составляет 67,4 млн. долларов в год при стоимости одного литра дизельного топлива в Бурунди, равной \$ 1,3 (*данные на 2018 год*).

Тогда экономическая выгода от замещения дизельного топлива биометаном 67,4 млн. долларов в год минус 10,9 млн. долларов в год составит 56,5 млн. долларов в год.

Но в процессе пиролиза твердой биомассы помимо пиролизного газа можно получить дополнительные коммерческие продукты такие как: древесный уголь, бioneфть, полукокс (п. 5.1.3.3).

Известно, что из одной тонны твердой биомассы можно получить:

1) 150-200 кг древесного угля по цене для потребителей 0,03 дол. за один килограмм древесного угля, что позволяет дополнительно получить $0,03 \times 150 \times 137,8 \times 365 \approx 1,6$ млн. долларов;

2) 240 кг синтез-нефти, из которой, после дополнительной очистки, которая составляет не более 10% от стоимости синтез-нефти, можно получить бензин марки А-95, стоимость которого в Бурунди составляет \$ 1,3 за один литр. Если, после дополнительной очистки, будет получено 200 литров очищенного синтетического бензина, то из 137,8 тонн твердой биомассы, после выхода пирогаза, можно будет получить 27560 л в сутки бензина А-95, при ежесуточном доходе от его реализации в \$ 35828 или 12,9 млн. долларов в годовом выражении.

Как следует из этих расчетов затраты на строительство биоцеха мощностью 100000 м³ биометана в сутки, потребуются 6,0 млн. долларов, которые можно возместить за счёт полугодовой реализации отходов пиролиза твердой биомассы, общая сумма дохода составит \$ 14,5 млн.

5.3.3. Экологическая эффективность использования биотоплива

Суточная выработка отходов в г. Бужумбура, столице Бурунди, составляет 0,52 кг на одного жителя города, при этом основная их доля (более 86%) - это отходы органического происхождения [120].

По оценкам специалистов, возможный годовой объем органических отходов в 2016-19 гг. составил около 145-150 тысяч тонн в столице Бурунди. Эти отходы либо сжигаются, либо складываются, что приводит к загрязнению окружающей

среды. Утилизация таких отходов в целях получения электроэнергии позволит решить и экологические проблемы.

Известно, что при работе дизель-генераторов только 40% потребляемого топлива полезно используется для производства электрической энергии, а остальные 60% - загрязняют окружающую среду, т.е. работа дизель-генераторов может привести к загрязнению воды и атмосферы.

Действительно, нефтяные углеводороды вредны для атмосферы, и дизель-генераторы должны быть сконструированы так, чтобы избежать такого рода загрязнений. Производители постоянно разрабатывают все более эффективные технологии для удовлетворения этих требований с точки зрения охраны окружающей среды. Они рекомендуют, например, использование ограничителя наполнения, использование адекватных резервуаров, соответствующих стандартам, и т.д.

Электрогенераторы загрязняют атмосферу пылью и газами, такими как углекислый газ, оксиды азота и серы. Кроме того, мелкие частицы выхлопных газов дизельных двигателей считаются наиболее опасными для здоровья человека. Риск загрязнения возрастает при недооценивании необходимости дополнительного обслуживания этого типа устройств (например, регулярность обслуживания). Неправильная настройка двигателя может привести к значительному превышению предельных значений загрязняющих веществ, а также, к снижению срока службы двигателей.

Дизельное топливо имеет высокий уровень выбросов, и, для соблюдения действующего законодательства, необходимо добавлять систему фильтров, которая удорожает конечную стоимость генератора.

Одним из преимуществ использования биотоплива является то, что у него уровень выбросов ниже, чем у других видов топлива (таких, как уголь, дизельное топливо или бензин). Еще одним преимуществом дизель-генераторов, работающих на биометане, является простота их использования и адаптация к повторному использованию тепла, например, для когенерации.

Выводы

1. Переработка твердых биомасс с применением пиролизной установки позволит частично решить кризисную ситуацию в энергетическом комплексе республики Бурунди и её экологическую безопасность.

2. Получаемые при пиролизе сопутствующие фракции процесса в виде древесного угля, полукокса и синтетической нефти позволят решить топливную проблему в бытовом секторе республики.

3. Реконструкция дизель-электрогенераторов республики Бурунди на применение биометана позволит повысить их моторный ресурс, а также уменьшить расход дизельного топлива, и тем самым, уменьшить себестоимость отпускаемой ими электроэнергии в 2,0-2,5 раза за счет снижения давления в нагнетателе жидкого топлива высокого давления, так как система оснащена датчиками слежения температуры отработавших газов, что позволяет не допускать перегрева двигателя и, тем самым, избежать его детонации.

4. Использование биомассы органического и промышленного происхождения позволит с помощью процесса пиролиза и биогаза получать горючие газы для работы ДВС, а также другие виды горючего топлива для широкого применения в народном хозяйстве республики Бурунди.

5. Реконструкция ДЭГ позволит увеличить срок службы дизельных форсунок, так как объем прохождения дизельного топлива через форсунки в газодизельном режиме уменьшится в 2,0 и более раз, и соответственно уменьшится негативное воздействие топлива на форсунки (эрозия, шлакование, засорение и т.п.).

6. Реконструкция ДЭГ позволит сохранить мощность двигателя, хотя при необходимости можно увеличить его крутящий момент.

7. Реконструкция ДЭГ позволит создать источники двойного топлива, так как при аварийном прекращении подачи биометана автоматически переключается топливная система на дизельное топливо.

8. Реконструкция ДЭГ позволит обслуживать газодизельную установку без покупки специальных запасных частей, так как запчасти к двигателю являются штатными.

Заключение

1. Выполнены теоретические обоснования экспериментальных исследований пиролиза различных проб биомассы в условиях преимущественного образования газовых и твёрдых продуктов.

2. Разработана методика проведения экспериментов для изучения пиролиза по выходу газа в зависимости от температуры.

3. Представлены как теоретические, так и практические методы определения влажности, зольности и теплотворной способности изучаемого топлива.

4. Установлено, что для получения максимального выхода жидких и твёрдых продуктов пиролиза и их надлежащего качества из биомассы, температура процесса не должна превышать 600°C , а для выхода газообразной фракции – не должна быть меньше 900°C .

5. Экспериментально установлено влияние температуры протекания процесса газификации на результаты пиролиза проб, особенно на выход газа и его теплотворную способность.

6. Установлена зависимость: увеличение выхода метана из торфа и, как следствие, рост объема получаемого газа и его теплотворной способности от роста температуры. В целом, с повышением температуры наблюдается улучшение основных параметров получаемого газа.

7. В опытах, проведенных на установке, разработанной для изучения быстрого пиролиза, определена динамика выхода смолы, газа и кокса в зависимости от фиксированной температуры.

8. Установлено, что для получения максимального выхода жидких и твёрдых продуктов пиролиза надлежащего качества из биомассы, температура процесса не должна превышать 600°C , а для выхода газообразной фракции – быть не менее 900°C .

9. Определен химический состав полученного пиролизного газа из основных образцов торфа из месторождений в республике Бурунди.

10. Установлено, что максимальной энергетической способностью обладают образцы твердой биомассы с минимальным содержанием влаги, значением не более 20%.

11. Установлено, что сырье (торф из месторождения «Waga», провинция Gitega, центральная часть республики Бурунди), запасы которого составляют около 20% всех запасов торфа, т.е. не менее, 120 миллионов тонн торфа, обладая минимальным выходом летучих газов и высокой удельной теплотворностью, приемлемы в виде топлива как в бытовых, так и промышленных целях.

12. Биогаз, получаемый из пальмового жидкого субстрата, на мини-заводе «Kirekura-Muzazi», в городе Бужумбура, республика Бурунди, имеет высокую долю метана - более 70%, при норме 50%, что свидетельствует о том, что получаемый биогаз вполне может быть применен как для получения электроэнергии на дизель-генераторах, так и для бытовых целей.

13. Переработка твердых биомасс с применением пиролизной установки позволит частично решить кризисную ситуацию в энергетическом комплексе республики Бурунди и её экологическую безопасность.

14. Реконструкция дизель-электрогенераторов (ДЭГ) для применения биометана позволит повысить их моторный ресурс, уменьшить расход дизельного топлива, и, тем самым уменьшить себестоимость отпускаемой ими электроэнергии в 2,0-2,5 раза в результате снижения давления в нагнетателе жидкого топлива высокого давления, что позволит не допустить перегрева двигателей, и тем самым избежать их детонации.

15. Реконструкция ДЭГ позволит увеличить срок службы дизельных форсунок, так как объем прохождения дизельного топлива через форсунки в газодизельном режиме уменьшается в 2,0 и более раз, и соответственно уменьшается негативное воздействие топлива на форсунки (эрозия, шлакование, засорение и др.).

16. Реконструкция ДЭГ позволит сохранить мощность двигателя, хотя при необходимости можно увеличить его крутящий момент.

17. Реконструкция ДЭГ позволит создать для них источники двойного топлива, так как при аварийном прекращении подачи биометана, ДЭГ автоматически переключаются на дизельное топливо.

18. Реконструкция ДЭГ позволит обслуживать газодизельную установку без покупки специальных запасных частей, так как все запчасти к двигателю остаются штатными.

Список использованной литературы

1. Баадер В. Биогаз: теория и практика / Е. Доне, М. Бренндерфер. - М.: Изд-во: Колосс, 1982. - 148 с.
2. Белосельский В.С. Низкосортные энергетические топлива: особенности подготовки и сжигания / В.И. Барышев.- М.: Изд-во: МЭИ – 2009. - 136 с.
3. Боровков В.М., Использование растительной биомассы и органосодержащих отходов в энергетике / В.С. Боровков, Л.В. Зысин, В.В. Сергеев // Итоги и научно-технические проблемы, Известия РАН: Энергетика. 2002. - № 6. - С. 13-23.
4. Бруданов А.М. Анализ применения природного газа в качестве моторного топлива на дорожно-строительных и коммунальных машинах // Молодой ученый, 2015. - № 24. - С. 96-99.
5. Булышко, М.Г. Технология торфобрикетного производства / М.Г. Булышко, Е.Е. Петровский. - М.: Недра, 1988г. - 312 с.
6. Бухаркина Т В. Химия природных энергоносителей и углеродных материалов. / Т.В Бухаркина, Н.Г. Дигуров, - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1998. - 204 с.
7. Василевич С.В. Исследование влияния влажности биомассы на состав продуктов газификации / Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. наук - 2006. - № 5. - С. 17-19.
8. Василев Р.Г. Перспективы развития производства биотоплива в России. Сообщение 3: биогаз / Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчинникова. – 2007. - Т.3. - № 3. - С. 54-61.
9. Веселовский В.С. Химическая природа горючих ископаемых. М., Изд. АН СССР, 1954. - 562 с.
10. Воронов М.П. Автоматизация процесса получения энергии неликвидной древесины в рамках системы мониторинга производственно-бытовых программ лесопромышленных предприятий / М.П. Воронов, Ю.М Коновалова, В.П. Часовских // Труды XIV Всероссийской научно-методической конференции Теле-

матика. - Санкт-Петербург. 2007. - Т. 2. - С. 192-195.

11. Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов / Ю.В. Воронов, С.В. Яковлев. 2006 - 704 с.

12. Газогенераторные технологии // Деловой лес. 2006. - № 3. - 60 с.

13. Гелетуха Г.Г., Обзор современных технологий получения топлива из биомассы быстрым пиролизом: Экотехнологии и ресурсосбережение / Г.Г. Гелетуха, Т.А Железная. - Киев 2000. - Ч. 1. - № 2. - С. 3-10.

14. Гульбис Г.Р. Химия в интересах устойчивого развития. 2014. - Т. 6. - С. 383-396.

15. Ефремов А.А. Химия древесины / А.А. Ефремов, Г.А, Слащинин и др. 2011. - Т. 5. - С. 51-56.

16. Коновалова Ю.М., возможности использования отходов лесопромышленных предприятий для получения энергии / Ю.М. Коновалова, П. Часовских // журнал современные проблемы науки и образования. 2007. - № 6. - Ч. 1. - С. 100-138.

17. Косивцов Ю.Ю. Современные каталитические методы получения энергии из возобновляемого сырья и органических отходов: Катализ в промышленности. 2006. - № 2. - С. 49-56.

18. Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды. - Д.: Недра. 1986. - 280 с.

19. Кузмин С.Г. Получение жидких топлив и их компонентов из древесной биомассы // Журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. 2013. - Т. XLVII. - № 6. - С. 83-91.

20. Кузнецов Б.Н. Каталитическая химия растительной биомассы // Соросовский образовательный журнал. 2012. - № 12. - С. 47-55.

21. Малофеев В.М. Биотехнология и охрана окружающей среды: Учебное пособие. - М.: Издательство Арктос. - 1998. - 188 с.

22. Мариненко Е.Е. Основы получения и использования биотоплива для решения вопросов энергосбережения и охраны окружающей среды в жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве: Учебное пособие - Волгоград: ВолгГАСА. -

2003. - 100 с.

23. Найман С.М. Возможность применения биогазовых технологий для переработки органических отходов в Татарстане: Производство биогаза и энергии / С.М. Найман, Ю.А. Тунакова // Вестник Казанского технологического университета. 2017. - С. 134-139.

24. Найман С.М. Возможность применения биогазовых технологий для переработки органических отходов в Татарстане: Производство биогаза и энергии / С.М. Найман, Ю.А. Тунакова, А.А. Вестник. Казанского технологического университета. 2013. - Т. 16. - № 14.- С. 154-156.

25. А.А. Никулина. Утилизация энергии из отходов – инновационные технологии // XXIII Международном Экономическом Форуме. Сборник материалов докладов. Крыница Здруй (Республика Польша). 2017. - С. 2-6.

26. Раковский В.Е. Общая химическая технология торфа. 1949. - 363 с.

27. Раковский В.Е. Химия пирогенных процессов / В.Е. Раковский, Ф.А. Филимонов, Е.А. Новичкова. - Мн.: АН БССР. 1959. - 208 с.

28. Сапунов В.А. Перспективы совершенствования способов получения СЖТ и СГТ с использованием пиролиза угля / В.А. Сапунов, В. Саранчук. // Геологія і геохімія горючих копалин. 2014. - № 3-4 (86-87). - С. 101-107.

29. Смолянинов С.И. Термобрикети́рование торфа / С.И. Смолянинов, С.Г. Маслов. - Томск. 1975. - 108 с.

30. Соколовская Ю.Г. Пиролиз отходов промышленного производства: Природопользование / Ю.Г. Соколовская. П.Л. Фалюшин. Выпуск 20. - Минск. 2011. - С. 143-146.

31. Сульман Э.М. Технологии пиролиза органических материалов. - Тверь: ТГТУ. 2010. - 124 с.

32. Тихонравов В.С. Ресурсосберегающие биотехнологии производства альтернативных видов топлива в животноводстве: науч. аналит. обзор. - М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 2011. - 52 с.

33. Ульзутуева Л.П. и др. Древесно-смоляное сырьё на основе отстойной древесной смолы // Гидролиз, и лесохим. промыш-ть. 1986. - № 3. - С. 12-14.

34. Чадов Б.Ф. Ортогенез и дарвинизм: перспектива синтеза в свете данных по условным мутациям / Б.Ф. Чадов, Е.В. Чадова, Н.Б. Федорова // Современные проблемы эволюции и экологии. Ульяновск: УлГПУ им. И.Н. Ульянова. 2017. - С. 133-142.
35. Чадов Б.Ф., Новый класс мутаций у *Drosophila melanogaster*/ Б.Ф. Чадов, Е.В. Чадова, и др. // Доклады РАН. 2000. - Т. 373. - № 5. - С. 714-717.
36. Шендрик Т.Г. Получение жидких топлив и их компонентов из древесной биомассы // Рос. Хим. Ж. (Ж. Рос. хим. Об-ва им. Д.И. Менделеева). 2013. - Т. XLVII. - № 6. - С. 83 - 91.
37. Щипко М.ЖЛ. Новые подходы в переработке твердого органического сырья / М.ЖЛ. Щипко, С.А. Кузнецова, В.Е. Тарабанько. Красноярск: изд. ИХПОС СО РАН - 2003 – 371 с.
38. Acikgoz C. and Kockar O.M. Characterization of slow pyrolysis oil obtained from linseed // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2009. - V. 85. - P. 151-154.
39. Acikgoz C. Fast pyrolysis of Linseed: Production yields and compositions / C. Acikgoz, O. Onay, O.M. Cocker // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2004. - V. 71. - 417 p.
40. Antal Jr. et al. The art, science, and technology of charcoal production // Industrial and Engineering Chemical Research. 2013. - V. 42. - 1619 p.
41. Aquino F.L. Evaluation of the different products from batch pyrolysis of Cotton Gin Trash / F.L. Aquino, J.R. Hernandez, S.C. Capareda // An American Society of Agricultural and Biological Engineering // meeting Presentation Paper Number 076083. Minneapolis. - Minnesota. USA. - 2007. - P. 17-20.
42. Asadullah M. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse / M. Asadullah, M.A. Rahman, and al // J. Fuel. 2007. - V. 86. - P. 2514-2520.
43. Ashton S. and P. Biomass chemical products / S. Ashton, P. Cassidy // Sust. Fores. Bioeng. and bio-based prod. 2007. - P. 193-196.
44. Ates F. Fast pyrolysis of sesame stalk: yields and structural analysis of bio-oil / F. Ates, E. Putun, A.E. Putun // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2004. - V. 71. - P. 779-783.
45. Майтри П. Физико-химические превращения при регулируемом тер-

мическом разложении древесной биомассы. - Томск. 2012. - С. 13-26.

46. Peng B.L. Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: A nanotechnology perspective / B.L Peng, N. Dhar, H.L Liu, K.C. Tam // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2011. - P. 1191-1206.

47. Wiggins Gary. Chemical Information Sources. - New York: - 1991. - 120 p.

48. Bugg. The emerging role for bacteria in lignin degradation and bio-product formation. Current Opinion in Biotechnology / Bugg, D. H Timothy, Ahmad, Mark and al, 2017. - P. 394–400.

49. Bob Dudley. BP Statistical Review of World Energy 2016. - P. 3-48.

50. Wilfred. A. Cote. Biomass utilization. State Uneversty of New York. - New York. 1982. - P. 3-32.

51. Michael R. Working for People and the Environment / R. Michael, S. Sean, K. Jill L. Mastny. Worldwatch Institute. 2008. - P. 5-50.

52. Prabir Basu. Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. - Boston. 2013. - P. 2-27.

53. Dwing. T. Biofuels: Global impact on Renewable Energy, Production Agriculture And Technological Advancements / T. Dwing, L. Prakash, D. Songstan. - New York. 2011. - P. 1-18.

54. Robert D. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: The technical feasibility of a billion-ton annual supply / D Robert, L.L. Perlack, A.A. Wright and al. 2005. - P. 16-54.

55. Thijs Van de Graaf. The G8 and G20 as Global Steering Committees for Energy: Opportunities and Constraints. - Berlin. 2010. - P. 1-12.

56. Andersson, G. Production of Forest Energy. Chapter 3. Bioenergy from sustainable forestry: Guiding principles and practice / G. Andersson, A. Björheden, R. Hall et al. Kluwer Academic Publishers. 2002. - P. 49–123.

57. Antti Asikainen. Forests and Bioenergy Production. 2010. - P. 1-18.

58. Yamamoto H. Evaluation of bioenergy potential with a multi-regional global - land-use-and-energy model: Biomass and Bioenergy / H. Yamamoto, J. Fujino, K. Yamaji. 2001. - P. 185–203.

59. Sukiran M.A. Bio-oils from Pyrolysis of Oil Palm Empty Fruit Bunches / M.A. Sukiran, C.M. Chin, N.K.A. Bakar // American Journal of Applied Sciences. 2009. - ISSN 1546-9239. V. 6. - P. 869-875.
60. Mungray AK. Fate of linear alkylbenzene sulfonates in the environment / AK. Mungray, P. Kumar // A review. International Biodeterioration and Biodegradation. 2009. - V. 63. - P. 981-987.
61. Bajus M. Pyrolysis of woody material: Petroleum and Coal. 2010. - V. 52. - P. 207-214.
62. Jensen P.A. Pretreatment of straw for power production by pyrolysis and char wash: Biomass. Bioenergy / P.A. Jensen, B. Sander, K. Johansen. 2001. - V. 20. - P. 431-444.
63. Boateng A.A. Pyrolysis of switchgrass harvested at several stages of maturity: Anal. Appl. Pyrolysis / A.A. Boateng, K.B. Hicks, K.P.J. Vogel. 2006. - V. 75. - P. 55-64.
64. Boateng A.A. Pyrolysis of energy crops including alfalfa stems, reed canarygrass, and eastern gamagrass / A.A. Boateng, H.G. Jung, P.R. Adler. J. Fuel. 2006. - V. 85. - P. 2450-2457.
65. Group Chief Economist. BP Statistical Review of World Energy. - London. 2015. - 45 p.
66. Bramer, E.A. A novel technology for fast pyrolysis of biomass: PyRos reactor. 12th European Biomass Conference. editor / E.A. Bramer, G.A. Brems, W. Palz, J. Spitzer, K. Maniatis, K. Kwant, P. Helm, A. Grassi. - Amsterdam. 2002. - P. 430-434.
67. Bridgwater A.V. Fast pyrolysis process for biomass / A.V. Bridgwater, G.V. Peacocke, C.J. Renew and Sust. Eng. Reviews. 2000. - V. 4. - P. 1-73.
68. Bridgwater A.V. Biomass Fast Pyrolysis: Thermal Science 2004. - V. 8. - № 2. - P. 21-49.
69. Bridgwater A.V. An overview of fast pyrolysis of biomass / A.V. Bridgwater, D. Meier, D. Radlein // J. Organ. Geochem. 1999. - V. 30. - P. 1479-1493.
70. Bridgwater T. Biomass for energy // J. Sci. and Agri. 2006. - V. 86. - P. 175-189.

71. Cetin E. Effect of pyrolysis pressure and heating rate on radiate pine char structure and apparent gasification reactivity / E. Cetin, R. Gupta, B. Moghtader // *J. Fuel* 2005. - V. 84. - P. 1328-1334.
72. Cetin E. Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars / E. Cetin, B. Moghtaderi, R. Gupta, T.F. Wall. *Fuel*. 2004. - V. 83. - P. 2139-2150.
73. Chen G. Reactivity of char from pyrolysis of birch wood / G. Chen, Q. Yu, K. Sjostrom // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 1997. - V. 40-41. - P. 491-499.
74. Chen G. Reactivity of char from pyrolysis of birch wood / G. Chen, Q. Yu, K. Sjostrom // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 1997. - V. 40-41. - P. 491-500.
75. Chen Y. Investigation of agricultural residues pyrolysis behavior under inert and oxidative conditions / Y. Chen, J. Duan, Y.H. Luo // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2008. - 8 p.
76. Demirbas A. Calculation of higher heating values of biomass fuels // *J. Fuel*. 1996. - V. 76. - P. 431-434.
77. Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE) // Ministry of energy, Thailand energy situation. 2007.
78. Dermirbas M.F. Biomass pyrolysis for liquid fuel and chemicals / M.F. Dermirbas, M. Balat // *J. Sci. Ind. Res*. 2007. - V. 66. - P. 797-804.
79. Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis // *Progr. Eng. Combust. Sci*. 2008. - V. 34. - P. 47-90.
80. Di Blasi C. Product distribution from pyrolysis of wood and agricultural residues / C. Di Blasi, G. Signorelli, C. Di Russo, G. Rea. // *Ind. Eng. and Chem. Res*. 1999. - V. 38. - P. 2216-2224.
81. Dufour A. Synthesis gas production by biomass pyrolysis: Effect reactor temperature on product distribution / A. Dufour, P. Girods, E. Masson, Y. Rogaume, A. Zoulalian // *Inter. J. hydro. Eng*. 2009. - V. 34. - P. 1726-1734.
82. Gerald W. Stewart. Bio-oil commercialization plan 2004. - P. 1-27.
83. Bridgewater A.V., «An Introduction to Fast Pyrolysis of Biomass for Fuels and Chemicals» in *Fast Pyrolysis of Biomass* / Bridgewater. A.V. et. al. // *CPL Scien-*

tific Publishing Services Limited, Newbury, 1999. – P. 1-13.

84. E-I-7v1: Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO) / CWEA 2014 – P. 1-8.

85. Encinar J.M. Fixed-bed pyrolysis of L. Product yields and compositions / J.M. Encinar, J.F. Gonzalez, J. Gonzalea // J. Fuel Process. Technol, 2000. - V. 68. - P. 209-222.

86. Encinar J.M. Pyrolysis / gasification of agricultural residues by carbon dioxide in the presence of different additives: influence of variables / J.M. Encinar, F.J. Beltran, A. Ramiro, J.F. Gonzalez // J. Fuel Process. Technol, 1998. - V. 68. - P. 209-222.

87. Erçin D. Carbonization of Fir wood in an open pyrolysis system at 50-300°C / D. Erçin, Y. Yürü // J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2003. - V. 67. - P. 11-22.

88. Diebold, J. P. Overview of Fast Pyrolysis of Biomass for the Production of Liquid Fuels in Fast Pyrolysis of Biomass / J. P. Diebold, A.V. Bridgewater // CPL Scientific Publishing Services Limited, Newbury, 1999. - P. 14-32.

89. Gaunt J. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production / J. Gaunt, J. Lehmann // J. Environ. Sci. Technol. 2008. V. 42. - P. 4152-4158.

90. Gheorghe C. Effect of pyrolysis conditions on biochar production from biomass / C. Gheorghe, C. Marculescu, A. Badea, T.A. postol // Proceeding of the 3rd WSEAS Inter. Conf. on Renew. Eng. Sources. 2009. - Bucharest, P. 239- 241.

91. Gonzalez J. Pyrolysis of various biomass residues and char utilization for the production of activated carbons / J. F Gonzalez, S. Roman, J.M. Encinar, G. Martinez // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2009. - V. 85. - P. 134-141.

92. Guerrero. Pyrolysis of eucalyptus at different heating rates: studies of characterization and oxidative reactivity / M. Guerrero, M.P. Ruiz, M. U.M. Alzueta, R. Bilbao, A. Millera // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2005. - V. 74. - P.307-314.

93. Hafsi S. and Benbouzid M., Slow and flash pyrolysis of eucalyptus glodulus wood // Res. J. Appl. Sci. 2007. - V. 2. - P. 810-814.

94. Haykiri-Acma H. Effect of heat ingrate on the pyrolysis yields of rapeseed / H. Haykiri-Acma, S. Yamanand, S. Kucukbayrak // *J. Renew. Eng.* 2006. V. 31. - 803 p.
95. НЕРОАЭРА. Технология пиролизной переработки торфа, угольных, древесных и других углеродсодержащих отходов “НЕРОАЭРА”. - Новосибирск. 2007.
96. I. Chvetz. *Thermique générale* / I. Chvetz, M. Kondak et autres, Edition MIR. Moscou 1969 - P. 20-35.
97. International Energy Agency (IEA) // *Key World energy astatistics 2014.* - P. 2-76
98. Ralph Sims Taylor. International Energy Agency (IEA). From 1st to 2nd generation bio-fuel. 2008. - P. 1-11
99. Josef Spitzer. International energy agency (IEA) // *bioenergy annual report 2009.* – P. 4-9.
100. Linda E. et. al. International Energy Agency (IEA) // *World Energy Outlook 2016.* -Washington DC. 2016. – P.1-143.
101. Islam M.N. Pyrolytic oil from fixed-bed pyrolysis of municipal solid waste and its characterization / M.N. Islam, M.R. Alam Beg, M.R. Islam // *J. Renew. Eng.* 2005. - V. 30. - P. 413-420.
102. J. Porteiro. Mathematical modelling of the combustion of a single wood particle / J. Porteiro, J.L. Miguez, E. Granada, J.C. Moran // *Fuel Proc. Technol.* 2006. - P.169-175.
103. Karaosmanoglu F. Biofuel production using slow pyrolysis of the straw and stalk of the rapeseed plant / F. Karaosmanoglu, E. Tetik, E.Gollu // *J. Fuel Process. Technol.* 1999. - V. 59. - P. 1-12.
104. Kolb S.E. Effect of Charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils / S.E. Kolb, K.J. Fermanich, M.E. Dornbush // *J. Soil Sci. Soci. of America.* 2009. - V. 73. - P. 1173-1181.
105. Ministère de l’Energie et des Mines Republique du burundi. *Opportunités dans le secteur .des énergies renouvelables au Burundi 2012.* – P. 5-52.
106. Lee D-K. Composition of herbaceous biomass feedstocks / D-K. Lee, V.N.

Owens, A. Boe, P. Jeranyama // Sun grant initiative. 2007. North central center, South Dakota State University. SGINC1-07. 2007. – P. 5-15.

107. Lehmann J. Biochar system science: climate change mitigation with multiple sustainability outcomes // Department of crop and soil science. Cornell university. 2009. - P. 5-40.

108. Lehmann, J. Bio-energy in the black // *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007. - V. 5(7). - P. 381-387.

109. Lehmann J. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems. A review / J. Lehmann, J. Gaunt, M. Rondon // *Mitigation and adaptation strategies for global change*. 2006. - V. 11. - P. 403-427.

110. Czajczyńska D. et al. "Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. "Thermal Science and Engineering Progress". 2017. - № 3 - P. 171-197.

111. Luo Z. Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel / Z. Luo, S. Wang, Y. Liao, Y. Gu, K. Cen // *J. Biom. and Bioeng*. 2004. - V. 26. - P. 455-462.

112. Mc Henry M.P. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk // *J. Agri. Ecosys. Environ*. 2009. - V. 129. - P. 1-7.

113. Mc Kendry P. Energy production from biomass (part 2):conversion technologies// *J. Biores. Technol*, 2002. V.83. - P.47-54.

114. Miura M. Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating / M. Miura, H. Kaga, ASakurai, T. Kakuchi. K. Takahashi // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2004. - V. 71. - P. 187-199.

115. Mohan D. Pyrolysis of wood biomass for bio-oil / D. Mohan, Jr Pittman, P.H Steele // *J. Eng. Fuel*, 2009. - V. 20. - P. 848-889.

116. Mohan D. Pyrolysis of Wood Biomass for Bio-oil / D. Mohan, Ch. U. Pittman, P.H. Steele // *J. Critical Review. Energy & Fuels*. 2006. - № 20. - P. 848-889.

117. Müller-Hagedorn M. and Bockhorn H. Pyrolytic behavior of different biomasses (angiosperms) (maize plants, straws, and wood) in low temperature pyrolysis / M. Müller-Hagedorn, H .Bockhorn // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2007. - V. 79. - P. 136-146.

118. Mun T-Y. Production of a producer gas with a high heating value and less tar from dried sewage sludge through air gasification using a two-stage gasified and activated carbon / T-Y. Mun, B-S. Kang, J-S. Kim // *J. Eng. Fuel*. 2009. - V. 23. - P. 3268-3276.
119. Natarajan E. Pyrolysis of rice husk in a fixed-bed reactor / E. Natarajan, S.E. Ganapathy // *World Academy of science. Engineering and Technology*. 2009. - V. 56. - P. 504-508.
120. Karangwa P.C. International conference: Fostering efficiency accessibility in East Africa / burundi national energy report Zanzibar 2017. – P. 1-22.
121. Onay O. Fast and flash pyrolysis of rapeseed / O. Onay, O. Kockar, M. Slow // *J. Renew. Eng*. 2003. - V. 28. - P. 2417-2433.
122. Parikka M. Global biomass fuel resource // *J. Biomass and Bioeng*. 2004. - V. 27. - P. 613-620.
123. Park H.J. Effect of the operating parameters on the production of bio-oil in the fast pyrolysis of Japanese larch / H.J Park H J-I.Dong, J-K. Jeon, Y-K. Park, K-S. Yoo, S-S. Kim, J. Kim, S. Kim // *J. Chem. Eng*. 2008. - V. 143. - P. 124-132.
124. Peter A. Brown sort biomass pyrolysis processes: review of scope, control and variability. - London. 2009 - P. 2-22.
125. Thomas L. Eberhardt. Impact of Industrial Source on the Chemical Composition of Loblolly Pine Bark. 2009. - P. 1-4.
126. Protocole de détermination des paramètres physicochimiques et bactériologiques.pdf / centre régional pour l'eau potable et l'assainissement à faible coût. 2007. - P. 21-32.
127. Putun A.E. Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis / A.E. Putun, E. Apaydin, E. Putun // *J. Eng*. 2004. - V. 29. - P. 2171-2180.
128. Pütün A.E. Fixed bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products / A.E. Pütün, N. Ozbay, P. Onal, E. Pütün // *J. Fuel Process. Technol*. 2005. - V. 86. - P. 1207-1219.
129. Raja S.A. Conventional pyrolysis of jatropha oil cake in a fixed bed reactor / S.A. Raja, Z.R. Kennedy, B.C. Pillai, C.L.R. Lee // *Int. J. Chem. Eng. Res*. 2010. -

V. 2. - P. 85-96.

130. Rapport de production d'électricité entre 1996 – 2014 // service équipement électricité de la REGIDESO. 2015. - 16 p.

131. Rapport de projet de production, ministère de l'énergie et des mines. 2013. - 26 p.

132. Rapport du CTB 2013. - P.1 2-13.

133. Rapport final de production de l'énergie site Jiji-Murembwe. Novembre 2014. - 271 p.

134. Rapport mensuel d'activités du mois d'Aout 2015 // service équipement électricité de la REGIDESO. 2015. - 14 p.

135. Raveendran K. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components / K. Raveendran, A. Ganesh, K.C. Khilar // J. Fuel. 1996. - V. 75. - P. 987-998.

136. REN 21. Renewable energy policy network for the 21st century Paris. P. 11-178.

137. Sanchez M.E. Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflowers: Production and characterization of bio-oil and biochar soil management / M.E. Sanchez, E. Lindao, D. Margaleff, O. Martinez, A. Moran // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2009. - V. 85. P. 142-144.

138. Şensöz S. Pyrolysis of safflower seed press cake in fixed-bed reactor: Part 2. Structural characterization of pyrolysis bio-oils / S. Şensöz, D. Angin // J. Biores. Technol. 2008. - V. 99. - P. 5498-5504.

139. Şensöz S. Pyrolysis of safflower seed press cake: Part1. The effect of pyrolysis parameters on the product yields / S. Şensöz, DAngin // Biores. Technol. 2008. - V. 99. - P. 5492-5497.

140. Şensöz S. Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed: fuel properties of bio-oil / S. Şensöz, D. Angin, S. Yorgun // J. Biomass and Bioeng. 2004. - V. 19. - P. 271-279.

141. Sharma R.K. Characterization of chars from pyrolysis of lignin / R. K. Sharma, J.B. Wooten, V.L. Baliga, X. Lin, W.G. Chan, M. R. Hajaligol // J. Fuel, 2004. - V. 83. - P. 1469-1482.

142. Sheng C. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data / C. Sheng, J.L. T. Azevedo // *J. Biomass and Bioeng.* 2005. - V. 28. - P. 499-507.
143. Tanoue K-I. Numerical simulation of heat transfer through the pyrolysis of woody biomass / K-I. Tanoue, W. Wijayanti, K. Yamasaki, T. Nishimura // *J. Japan Inst. of Eng.* 2010. - V. 89. - P. 948-954.
144. Tsai W.T., Lee M.K. and Chang Y.M. Fast pyrolysis of rice husk: product yields and compositions // *J. Biores. Technol.* 2007. - V. 98. - P. 22-28.
145. Tsai W.T. Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor / W.T. Tsai, M.K. Lee, Y.M. Chang // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 2012. - V. 76. - P. 230-237.
146. Tu W-K. Pyrolysis of rice straw using radio-frequency plasma / W-K Tu et al. // *J. Eng and Fuel.* 2008. - V. 22. - P. 24-30.
147. Ucar S. The slow pyrolysis of pomegranate seeds: The effect of temperature on the product yields and bio-oil properties / S. Ucar, S. Karago // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 2009. - V. 84. - P. 151-156.
148. VDI-RICHTLINIEN. Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests 2016. - P. 113-115.
149. Wang C. Direct conversion of biomass to bio-petroleum at low temperature / C.Wang, Z. Du, J. Pan, J. Li, Z. Yang // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 2007. - V. 78. - 438 p.
150. Wang S., Fang M., Yu C., Luo Z. and Cen K. Flash pyrolysis of biomass particles in fluidized bed for bio-oil production / S.Wang // *China Particuology.* 2005. - V. 3. - P. 136-140.
151. Wang S. Comparison of the pyrolysis behavior of lignin from different tree species / S. Wang, K. Wang, Q. Liu, Y. Gu, Z. Luo, K. Cen, T. Fransson // *J. Biotechnol. Advances.* 2009. - V. 27. - P. 562-567.
152. Williams P.T. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass / P.T. Williams, S. Besler // *J. Renew. Eng.* 1996. - V. 7. - P. 233-

250.

153. Yaman, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks J. Eng. Convers. And manage. 2004. - V. 45. - 651 p.

154. Yang H. Pyrolysis palm oil wastes for enhanced production of hydrogen rich gases / H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. Lee, D.T. Liang, C. Zheng // J. Fuel Process. Technol. 2010. - V. 87. - P. 935 –942.

155. Yanik J. Fast pyrolysis of agricultural wastes: Characterization of pyrolysis products / J. Yanik, C. Kornmayer, M. Saglam, M. Yuksul // J. Fuel Process. Technol. 2007. - V. 88. - P. 942-947.

156. Radanielina Mamy Harimisa. Co-valorisation énergie et matière des résidus agricoles par pyro-gazéification // Diss. Université d'Antananarivo. 2018. – 40 p.

157. Zabaniotou A. and Evaluation of utilization of cornstalks for energy and carbon material production by using rapid pyrolysis at high temperature / A. Zabaniotou, O. Ioannidou // J. Fuel. 2008. - V. 87. - P. 834-843.

158. Zabaniotou A. Residues utilization for energy and 2nd generation biofuels / A. Zabaniotou, O. Ioannidou, V. Skoulou // J. Fuel. 2008. - V. 87. - 1492 p.

159. Zabaniotou A. Experimental study of pyrolysis for potential energy, hydrogen and carbon material production from lignocellulosic biomass / A. Zabaniotou, O. Ioannidou, E. Antonio, A. Lappas // Int. J. hydro. Eng. 2008. - V. 33. - P. 2433-2444.

160. Portugal-Pereira, Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil / Portugal-Pereira, Joana, et al. // Biomass and bioenergy. – Brazil. 2015. – P. 521-533.

161. Zanzi R. Pyrolysis of Biomass in Presence of Steam for Preparation of Activated Carbon, Liquid and Gaseous Products / R. Zanzi, X. Bai, P. Capedevila, E. Bjornbom. – Melbourne. 2001. – P. 2-7.

162. Zanzi R. Rapid pyrolysis of agricultural residues at high temperature // J. Biomass and Bioeng. 2002. - V. 23. - P. 357- 366.

163. Zanzi R. Rapid pyrolysis of bagasse at high temperature / R. Zanzi, E. Bjornbom, K. Sjostom // 3rd Asia-Pacific International on Combustion and Energy Utilization. Proceeding of the symposium. - Hong Kong. 1995. - V. 1. - P. 211-215.

164. Zheng J-L. Pyrolysis oil from fast pyrolysis of maize stalk // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2008. - V. 83. - P. 205-212.
165. Zhang, R. Biogasification of rice straw with an anaerobicphased solids digester system / R. Zhang, Z. Zhang, Biores. Technol. 1999. – P. 235–245.
166. ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97) Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. Издание официальное. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Стандартинформ, 2006. - 3 с.
167. ГОСТ 27314-91 (ИСО 589-81) Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги. Издание официальное. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Стандартинформ, 2007. - 4 с.