

На правах рукописи



**Манигомба Жан Альберт**

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

**05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы»**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань– 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Тепловые электрические станции»

**Научный руководитель:** доктор химических наук, профессор  
**Чичирова Наталия Дмитриевна**

**Официальные оппоненты:** **Сафин Рушан Гареевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), заведующий кафедрой «Переработка древесных материалов»

**Лавренов Владимир Александрович**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), старший научный сотрудник лаборатории №12 «Распределённой генерации»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола

Защита состоится «17» сентября 2019 г. в 16 ч 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-225, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06. С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=93>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.082.06  
кандидат технических наук



Зиганшин Шамиль Гаязович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Но, 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 класс напряжения на 220/330 кВ или вводить новые участки ЛЭП-110 кВ, что и выполняется электроэнергетиками республики. Например, к 2023 году будет введена в эксплуатацию новая ЛЭП-110/70 кВ от центральной подстанции «Gitaga» до южной подстанции «Makamba» протяженностью более 50 км и тем самым появится стабильная электрическая связь с соседними республиками – Руанда и Танзания, и Бурунди войдет в единое энергетическое кольцо Центральной Африки.

В тоже время, основной задачей, стоящей перед электроэнергетикой Бурунди и ее народным хозяйством, является поиск альтернативных источников энергии взамен дефицитному в республике углеводородному топливу. Как известно, бытовые и промышленные отходы, растительная биомасса являются перспективными, экологически безопасными и альтернативными источниками возобновляемой энергии. Так, по оценкам специалистов, возможный годовой объем органических отходов в 2019-2020гг. составит около 145-150 тыс. 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, которые составляют до 70% биомассы, могут успешно служить сырьем для получения как пиролизного, 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 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, Г.Р. Мингалеевой, Б.В. Канторовичем, Г.Ф. Кузнецовым, В.В. Сергеевым, Ю.Л. Любиной, А.А. Гроо, А. Jafari, G. Van Rossum, W.P.M. Van Swaai, M. Asadullah, M.A. Rahman, D. Mohan, Ch. Pittman, P.H. Jr. Steele, N. Prakash, T. Karunanithi, S.A. Raja, Z.R. Kennedy, V.C. Pillai и др.

Однако, комплексное исследование переработки растительной твердой биомассы методом термохимической конверсии и анаэробной переработки в условиях республики Бурунди практически не проводилось, 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 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 проблем снижения экологичности, надежности и экономичности 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 моделей 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-электрогенераторах энергосистемы республики Бурунди.

#### **Научная новизна.**

1. Впервые экспериментально определены физико-химические характеристики как сельскохозяйственных, так и промышленных отходов в качестве энергетического топлива для дизель-электрогенераторов 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 по изучению пиролизного газа, полученного 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, замещая дефицитное жидкое топливо на газообразное. Это позволит улучшить финансово-экономические показатели электростанций, повысить их инвестиционную способность 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, 2018гг., 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», 2017г., Ульяновск, УГТУ; XIX, XX аспирантско-магистерских научных семинарах, посвященных Дню энергетика, 2015, 2016гг., Казань, КГЭУ; Conférence au Ministère de l'Énergie et des mines de la République du Burundi du, 2017г.

### **Публикации.**

Основное содержание работы изложено в 11 научных публикациях, в том числе в 3 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК, в 1 статье в журнале, индексируемом в международной базе Scopus и в 7 публикациях 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. Объем работы - 152 страницы, она иллюстрирована 37 таблицами и 31 рисунком. 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. Дана постановка задач исследования.

**Во второй главе** выполнены теоретические обоснования экспериментальных исследований пиролиза различных проб твердой биомассы в условиях преимущественного образования газовых и твердых продуктов. Разработана методика проведения экспериментов по изучению пиролиза (выход 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, зольности, летучих веществ, взвешенных твердых частиц в биомассе, ХПК



и БПК<sub>5</sub>. Для большей достоверности инструментального эксперимента была проведена оценка погрешности измерений применяемых контрольно-измерительных приборов.

В третьей главе приведена методика проведения экспериментальных исследований и обработка результатов процесса пиролиза твердой биомассы из сельскохозяйственных и растительных (торф) отходов. Подробно изучен процесс пиролиза проб твердой биомассы в подвижном слое, который проводился в установке со шнековой подачей измельченного топлива, с внешним электрообогревом со скоростью нагрева 6–9°С/мин и в диапазоне температур от 450 до 1150°С. Блок-схема лабораторной установки представлена на рисунке 1.

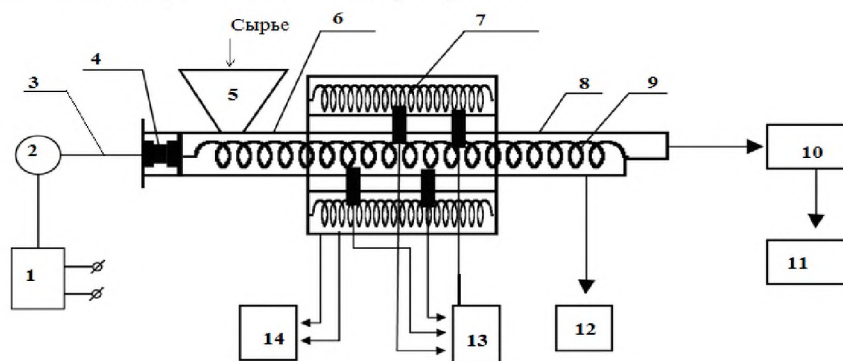


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки по пиролизу твердых биомасс в подвижном слое

Основными элементами блок-схемы являются: 1 – регулятор скорости вращения шнека; 2 – электродвигатель; 3 – вал привода подвижного шнека; 4 – блок уплотнений с передней опорой вала; 5 – приемный бункер с герметичной крышкой; 6 – основная часть корпуса шнека; 7 – электронагреватель; 8 – пиролизер; 9 – подвижный шнек; 10 – газоанализатор совмещенный с фильтром-охладителем пиролизного газа; 11 – калориметр; 12 – приемная колба твердого остатка; 13 – термометры; 14 – электроисточник питания нагревателя электронагревателя пиролизера.

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. Изученные виды твердой биомассы имеют практически одинаковый элементный состав по С, Н<sub>2</sub> и О<sub>2</sub>.

Изучение закономерностей термохимических превращений рисовой соломки, торфа и древесины, которые наблюдаются при пиролизе и горении, проводилось также методом термического анализа в различных режимах на дериватографе марки Q-1500D (Германия). Данный метод позволяет проводить дифференциально-термический анализ, исследование потери массы в диапазоне температур от 20 до 1500°С, а также изучение механизмов взаимодействия и фазовых превращений при разных скоростях нагрева. Эксперименты выполнялись автором в лаборатории Бурундийского государственного научно-агрохимического института (ISABU), г. Бужумбура. Все эксперименты проводились в закрытых помещениях при температуре воздуха 24-26°С.

Для регистрации температур образцов использовались термоэлектрические платинородий-платиновые преобразователи типа ТПП (Россия) с диапазоном измерений от 0 до 1600°С, диаметром спая 0,2 мм, имеющие класс допуска 2,0 с пределом отклонения измерений, равным ±1,5°С. Взвешивание проб выполнялось на аналитических весах марки OHAUS, PA 214C (Германия). Охлаждение образцов

выполнялось в лабораторном эксикаторе. Образцы сжигали в печи марки Carbolite RHF 1406 (США) при восьми значениях температур– 450, 550, 650, 750, 850, 950, 1050, 1150°C.

Известно, что разница между начальной массой и массой при определенной температуре, делённая на исходную массу и выраженная в процентах, даёт выход летучих газов из исследуемого образца. Результаты представлены на рис. 2.

Было применено два способа исследования образцов на выход летучих газов: первый способ - для сырых образцов, т.е. все образцы без высушивания помещались одновременно в холодную печь, нагревались до 450°C, выдерживались пять минут, затем печь выключалась, все образцы из нее вынимались, охлаждались в эксикаторе, взвешивались на аналитических весах, затем опять помещались в печь, устанавливалась необходимая (из восьми значений) температура, включалась печь.

Но, так как температура в печи уже понизилась, время сжигания могло увеличиться, поэтому отмечалось время (пять минут) достижения печью нужной температуры.

Второй способ - для отожженных образцов, когда высушенный образец, после определения его начальной влажности при первом способе, двумя параллельными навесками помещался отдельно от других в печь, предварительно нагретую до необходимой температуры, делалась выдержка (пять минут), вынимался образец из печи, охлаждался в эксикаторе и взвешивался на аналитических весах. Результаты замеров были сведены в таблицу, на основании которой были построены графики (рис. 2).

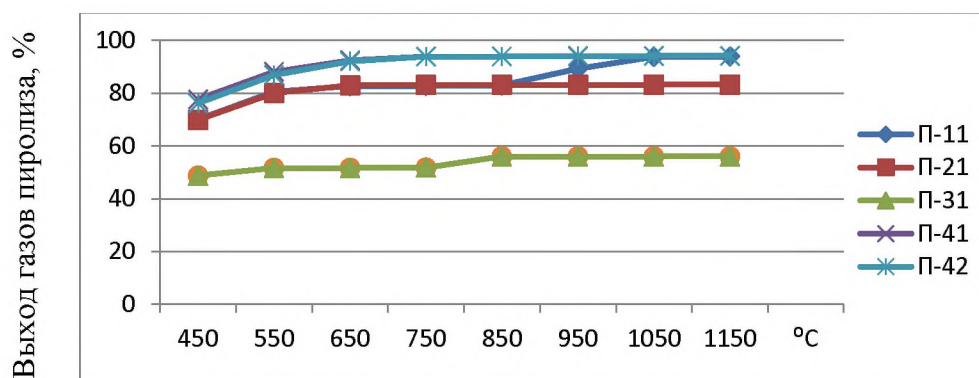


Рис. 2. Зависимость долевого выхода пиролизного газа из различных отходов от температуры в печи

Проба П-11 - серия из восьми экспериментов с пробами из рисовой, кофейной соломки и шелухи;

Проба П-21 - серия из восьми экспериментов с пробами из рисовой соломки, древесины масличной пальмы;

Проба П-31 - серия из восьми экспериментов с пробами из торфа «А» (поверхностный торф месторождения «Kirundo»);

Проба П-41 - серия из восьми экспериментов с пробами из торфа «Б» (глубинный торф месторождения «Ngozi» и «Nyamugari»);

Проба П-42 - серия из восьми экспериментов с пробами из торфа «В» (поверхностный фрезерный торф месторождения «Ngozi» и «Nyamugari»).

На рис. 3 представлены графики зависимости долевого выхода пиролизного газа из проб сухого вещества от температуры в печи при условии, что все образцы без высушивания сначала помещались поочередно в холодную печь для нагрева, а затем нагревались от 450°C при ступенчатом подъеме температуры до 1150°C.



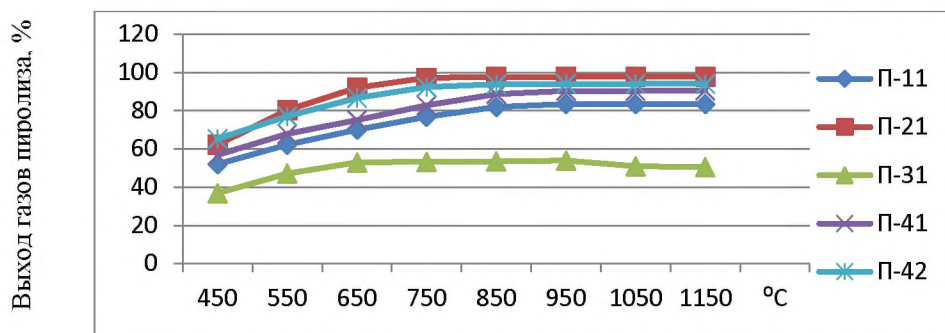


Рис. 3. Зависимость долевого выхода пиролизного газа из проб сухого вещества от температуры в печи

Известно, что в состав пиролизного газа в основном входят газы:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ .

Но в зависимости от метода его получения, соотношение  $\text{CO}:\text{H}_2$  варьируется от 1:1 до 1:3. Были проведены эксперименты по определению теплотворной способности синтез-газа при пиролизе твердой биомассы в виде предварительно термически спрессованных брикетов. Если высушенную твердую биомассу в виде брикета поместить в закрытом стальном сосуде в печь с температурой  $700\text{-}800^\circ\text{C}$ , то начинается ее более интенсивное разложение (в отличие от россыпи) с выделением большого количества пирогаза, отличающегося высокой теплотворной способностью  $7000\text{-}7500$  ккал/ $\text{м}^3$  (для сравнения, природный газ –  $8000$  ккал/ $\text{м}^3$ ), удовлетворяющего требованиям применения как для бытовых, так и для промышленных целей. Задачей нашего исследования являлась разработка способа получения максимального количества пиролизного газа в качестве топлива из твердой биомассы и местного торфа для обеспечения работы дизель-электрогенераторов энергетической системы Бурунди. 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:  $\text{CO}$ : 12-18%;  $\text{H}_2$ : 11-28%;  $\text{CH}_4$ : 33-45 %;  $\text{CO}_2$ : 1,5-2,5 %.

В табл. 1 приведен средний состав пиролизного газа, получаемого из твердой биомассы и его энергетическая ценность.

Таблица 1. Средний химический состав и теплотворная способность пиролизного газа

№ п/п	Состав пиролизного газа	Содержание, %	Теплотворная способность (низшая), МДж/ $\text{м}^3$
1	Метан ( $\text{CH}_4$ )	35 – 45	35,80
2	Водород ( $\text{H}_2$ )	16 – 28	10,80
3	Оксид углерода ( $\text{CO}$ )	14 – 18	12,64
4	Диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ )	1,50 – 2,50	-

В четвертой главе представлена разработанная технология получения биогаза на промышленной биогазовой установке. В настоящее время в городе Бужумбура действует частный биогазовый мини-завод «Kirekura-Muzazi» с производительностью биогаза около  $0,65$   $\text{м}^3/\text{час}$ , использующий смесь коровьего и свиного навоза, отходов скотобойни, а также жмых от производства пальмового масла. Блок генерации биогаза, установленный на этом мини-заводе, состоит из четырех метантенков. В результате анализа анаэробного процесса в метантенках было установлено, что, если субстрат будет состоять из сбалансированной смеси, включающей необходимые питательные вещества, а также инокулят, содержащий анаэробные микроорганизмы, то процесс

выделения биогаза будет более интенсивным. С этой целью были проведены исследования физико-химических параметров жидких отходов мини-завода «Kirekura-Muzazi» (табл. 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.

Таблица 2. Среднеарифметические параметры исследуемых субстратов

Субстрат	pH	Щелочность, мг-экв./л CaCO <sub>3</sub>	ХПК, мг O <sub>2</sub> /л	БПК <sub>5</sub> , мг O <sub>2</sub> /л	MES, мг/л	MVS, мг/л	Общий азот, мг/л	ХПК/N	Влажность, %
VDI 4630	6,80-7,40	>1000	-	-	-	-	-	30-35	Минимум 65%
Эксперимент 1	6,80±0,20	1120±12	35000±2000	13800±960	8100±57	6700±85	1011±15,20	34,60	97,33±0,70
Эксперимент 2	6,80±0,20	1160±12	37000±2000	14000±960	10000±60	8400±30	1080±18,00	34,25	97,32±0,70
Эксперимент 3	7,00±0,20	1118±14	34000±2000	13900±960	8200±57	6830±40	1016±15,40	33,46	97,33±0,60
Эксперимент 4	7,10±0,10	1150±15	30500±2118	14800±1000	10000±55	8500±40	950±29,90	32,10	95,07±0,40
Эксперимент 5	6,90±0,10	1050±15	30000±2000	13800±960	8100±57	6630±43	10000±29,90	30,00	95,07±0,40

Состав биогаза также был изучен и оценен лабораторно взятием проб на химический анализ непосредственно из метантенков (табл. 3). Анализ был выполнен на лабораторном газоанализаторе GA5000 (Франция) со стандартным измерением газа на содержание CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> (с диапазоном измерения 0–100%), а также H<sub>2</sub>S (с диапазоном измерения 0–0,20%). В связи с этим не было необходимости в создании лабораторно-экспериментальной установки. В результате было установлено, что в полученном биогазе содержание CH<sub>4</sub> составило около 70%.

Таблица 3. Среднеарифметические значения состава исследованного биогаза

Субстрат	Содержание газов, %		
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Эксперимент 1	64±1,20	35,10±1,10	0,10±0,05
Эксперимент 2	69±1,20	30,10±1,30	0,13±0,04
Эксперимент 3	65±1,30	34,10±1,70	0,10±0,05
Эксперимент 4	70±1,00	28,00±1,20	0,05±0,02
Эксперимент 5	68±1,20	31,10±1,10	0,10±0,01

Для получения объективных выводов по результатам анализа экспериментальных данных за основу был принят германский стандарт VDI 4630, являющийся международным стандартом для анаэробных установок при получении биогаза. По результатам анализа проб было установлено, что сырье в реакторах богато кислородом, который сбалансирован с азотом, что соответствует стандарту VDI 4630. Как следует из стандарта, ХПК 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. БПК<sub>5</sub> 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 субстрат является более лучшей питательной средой для микроорганизмов, участвующих в процессе производства биогаза.

В исследуемой ситуации снижение БПК<sub>5</sub> 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 больше эффект 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, получаемых при производстве пальмового масла, как питательной среды для микроорганизмов.

В связи с этим необходимо увеличить количество субстрата, богатого углеродом и азотом, а также источниками микроорганизмов (например, свежим коровьим навозом или свиным пометом). Чем выше содержание влаги в субстрате, тем теснее контакт субстрата с микроорганизмами, что обеспечивает хорошее производство биогаза. Стандарт VDI 4630 требует, чтобы влажность субстрата была не менее 65%.

В исследуемых реакторах этот уровень выше. Поскольку целью диссертации является реализация биометана в качестве замены жидкого топлива для дизель-электрогенераторов, то в связи с этим необходима дополнительная очистка газа, включающая непрерывное фильтрование всего его потока, в том числе и от сероводорода (H<sub>2</sub>S), присутствие которого в биогазе, как химически агрессивного газа, практически не допустимо, и по нормам стандарта его величина не должна превышать 0,1% от общего объема биогаза. Но, как следует из таблицы 3, во всех пяти пробах содержание H<sub>2</sub>S не более 0,1%.

**В пятой главе** представлено практическое применение продуктов пиролиза и биогаза в энергетике республики Бурунди. Динамика изменения выработки электроэнергии в Бурунди, начиная с 2010 г., согласно прогнозу до 2019 г., из года в год имеет тенденцию к снижению с частым веерным отключением потребителей.

Например, максимальная выработка электроэнергии была в 2018 г. и составила 316 млн. кВт·ч, или около 7% необходимого количества. Имеющиеся в Бурунди дизельные электростанции работают на нефтяном топливе со стоимостью одного литра более 1,3 долларов, что влечет за собой нехватку топлива и, как следствие, дизельные электростанции установленной мощностью 20,5 МВт вынуждены работать только по восемь часов в сутки.

Таким образом, ежегодные затраты на дизельное топливо составляют около 50 млн. долларов. Отсюда 1,0 кВт·ч электроэнергии обходится в 0,36 долларов, при низком коэффициенте использования установленной мощности (КИУМ), равном 0,33. Цены на нефть и нефтепродукты постоянно растут, особенно для энергодефицитных стран. Для решения столь острой проблемы правительство Бурунди предлагает несколько путей, одним из которых является использование биометана, полученного из биомассы. Для возможного применения биометана в качестве топлива в дизель-генераторах необходимо установить специальную топливную аппаратуру. Так как температура воспламенения газозвушной смеси от сжатия в цилиндре обычного

дизеля составляет около 700°C, а само дизельное топливо воспламеняется при 320-380°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 его реконструкции.

Переделанный дизельный двигатель сохраняет возможность работы на дизельном топливе и при отсутствии пиролизного газа. Но возможна реконструкция дизель-генераторов, когда на переделанный дизельный двигатель устанавливается система зажигания (свечи зажигания), тогда газодизель превращается в газовый двигатель, работающий по циклу Отто. В этом случае возможность работы на дизельном топливе отсутствует. В условиях Бурунди второй вариант реконструкции неприемлем. Реконструкция дизель-генераторов на газодизель позволит:

1) увеличить ресурс двигателя в результате 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;

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, так как при аварийном прекращении подачи биометана автомат переключает топливную систему на дизельное топливо;

5) обслуживать газодизельную установку без покупки специальных запасных частей, так как все запчасти к двигателю остаются штатными;

6) повысить экологическую безопасность в республике за счет экологически чистого биометана.

Выполнен расчет количества биомассы для дизель-генераторов электростанций «Вижа-1 и 2», применяющих пиролизный газ. Также рассчитано необходимое количества биомассы по выработке биогаза для дизель-генераторов электростанции «Вижа-3».

В таблицах 4, 5, 6 представлены технические характеристики дизель-электрогенераторов электростанций «Вижа-1,2,3».

Таблица 4. Технические характеристики дизель-электрогенераторов электростанции «Вижа-1»

Двигатели		Электрогенератор	
Модель	MTU16V4000G23, Германия	Количество, шт.	4
Количество, шт.	4	Установленная мощность станции, МВт	5,5
Основная мощность, кВт (л.с.)	1798 (2411)	Частота тока, Hz	50
Удельный расход топлива при 1500 об/мин	199	Сosφ	0,8

Таблица 5. Технические характеристики дизель-электрогенераторов электростанции «Вижа-2»

Двигатели		Электрогенератор	
Модель	ABC, Бельгия	Количество, шт.	4
Количество, шт.	4	Установленная мощность станции, МВт	5
Основная мощность, кВт (л.с.)	1780	Частота тока, Hz	50
Удельный расход топлива при 1500 об/мин	190	Сosφ	0,8



Таблица 6. Технические характеристики дизель-электрогенераторов электростанции «Буја-3»

Двигатели		Электрогенератор	
Модель	Дизель«Катер», США	Количество, шт.	7
Количество, шт.	7	Установленная мощность станции, МВт	10
Основная мощность, кВт (л.с.)	1798 (2411)	Частота тока, Hz	50
Удельный расход топлива при 1500 об/мин	199	Cosφ	0,8

Необходимо заменить жидкое дизельное топливо биометаном из пиролизного газа и биогаза. Суммарное потребление топлива для этих трех дизельных электростанций мощностью 20,5 МВт составляет около 6000 литров/час. Отсюда, суточный расход дизельного топлива составит 144000 литров (121139 кг). Исходя из технико-экономических расчетов, затраты на реконструкцию дизель-генераторов под биометан составят 5 986 180 долларов (принимая 6,0 млн. долларов).

Необходимо выполнить замещение 85% дизельного топлива в дизель-электрогенераторе, что составляет 122 400 л от суточного расхода в 144 000 литров. При стоимости одного литра дизельного топлива в Бурунди в 1,3 долларов суточная экономия составит 159 120 долларов или годовая экономия на топливе составит ≈ 58,1 млн. долларов при суммарных затратах в 6,0 млн. долларов, что почти в 10 раз меньше. На рис. 4,5 показаны разработанные схемы энерготехнологических комплексов для дизель-электрогенераторных электростанций Буја-1,2,3.

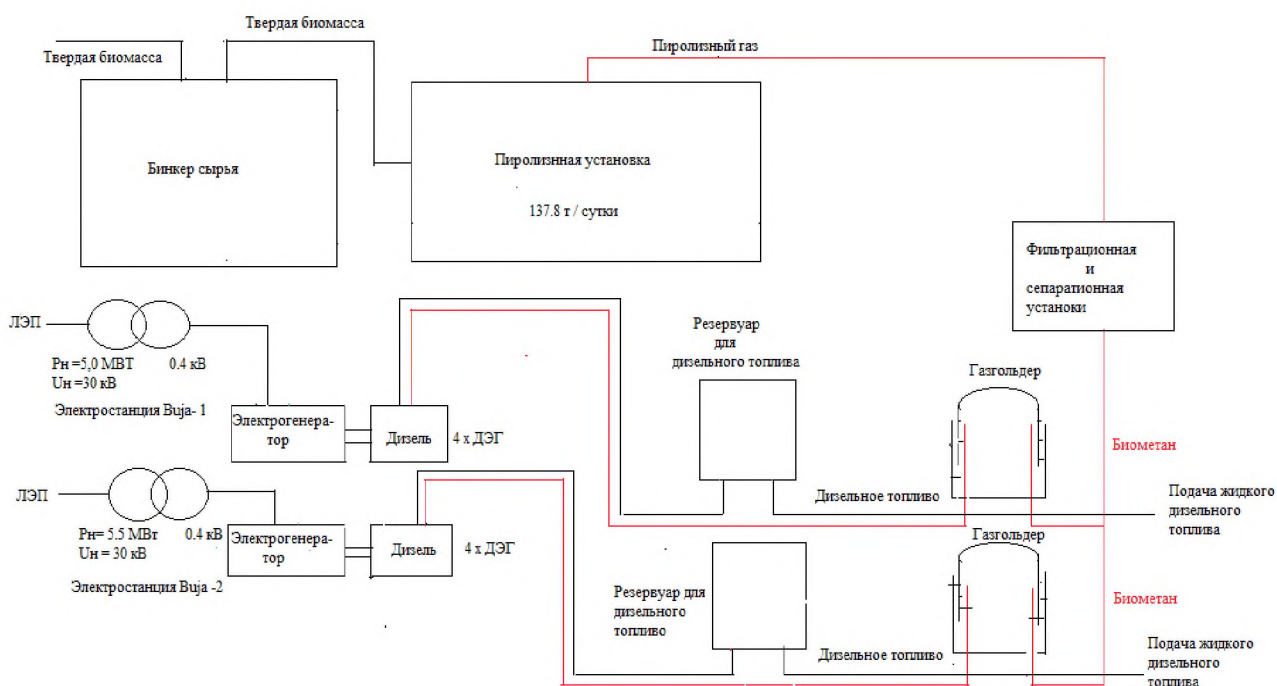


Рис. 4. Схема энерготехнологического комплекса для дизель-электрогенераторных электростанций Буја-1 и 2

В энерготехнологическом комплексе Буја-1 и 2 твердая биомасса поступает в бункер сырья, выполняющий роль склада и размельчителя, из которого механическим путем (транспортер) подается в пиролизную установку, где происходит его пиролизное сжигание, полученный пиролизный газ поступает в систему очистки и фильтрации, для очистки от сероводорода и механических взвесей, затем поступает в газгольдер-выдержки, где отстаивается от растворенной влаги, и далее направляется в

дизельный привод электрогенератора. В качестве запального топлива в цилиндры дизеля подается дизельное топливо, хранящееся в резервуаре.

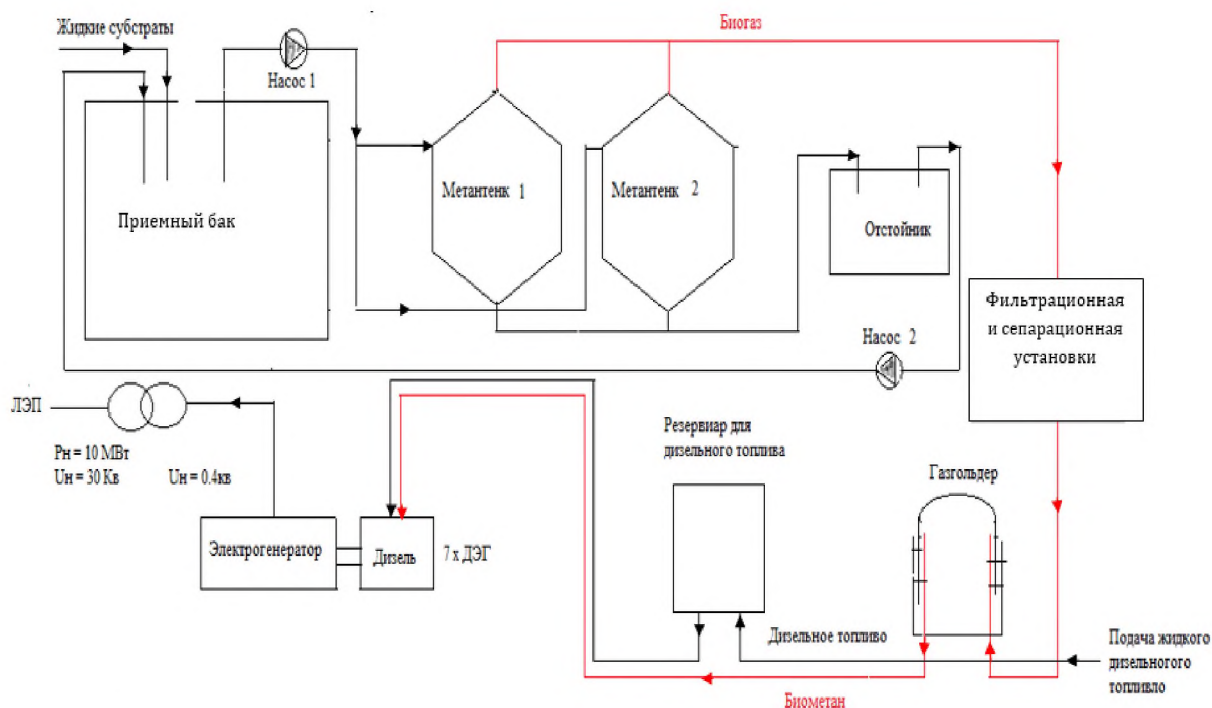


Рис. 5. Схема энерготехнологического комплекса для дизель-электрогенераторной электростанции Vuja-3

В энерготехнологическом комплексе Vuja-3 жидкий субстрат поступает на склад (приемный бак), где отстаивается, и шнековым транспортером подается в метантенки 1 и 2 из которых получаемый биогаз 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.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально определены физико-химические характеристики пиролизного газа, полученного из твердой биомассы сельскохозяйственных отходов (источника энергетического топлива), для дизель-электрогенераторов энергетической системы республики Бурунди. В пиролизном газе содержание метана составило 45% при минимально допустимом его значении, равном 30%.

2. Выполнено теоретическое обоснование экспериментального исследования пиролиза различных проб твердой биомассы в условиях образования преимущественно газовых и твердых продуктов.

3. Разработана методика проведения экспериментов для изучения пиролиза твердой биомассы и местного торфа по выходу пирогаза в зависимости от температуры: 450-1150°C.

4. Определены действительные значения влажности, зольности, летучих веществ в твердой биомассе, а также ее теплотворная способность, с максимальным значением у древесины масличной пальмы около 31000 кДж/кг (проба П-21).

5. Проведены промышленные испытания биогаза, полученного из отходов производства пальмового масла из масличных пальм на частном предприятии в городе Бужумбура республики Бурунди, где в результате испытаний было установлено, что из этих отходов можно получить около 70% метана, при минимально допустимом его значении, равном 50%.

6. Проведена технико-экономическая оценка эффективности применения пиро- и биогаза в качестве топлива для дизель-электрогенераторов республики Бурунди. Результаты расчетов показали, что после внедрения мероприятия по модернизации дизель-генераторов годовой расход дизельного топлива снизится на 85%. Общая годовая денежная экономия на топливо превысит суммарные затраты на внедрение мероприятия в 10 раз, при стоимости 1 литра дизельного топлива в Бурунди в 1,3 дол. (2018 г.).

7. В результате, реконструкция дизель-электрогенераторов на применение биометана в качестве топлива позволит повысить их моторный ресурс и на 70-85% уменьшить расход дизельного топлива, и тем самым, снизить себестоимость отпускаемой электроэнергии в 2,0-2,5 раза, а также улучшить экологичность работы дизельных электрогенераторов на биометане в республике Бурунди.

**Основное содержание исследования отражено в следующих публикациях:**

***В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:***

1. Манигомба Ж.А. Организация электроэнергетики Республики Бурунди / Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова // Труды Академэнерго. 2015. №4. С. 119-125.

2. Манигомба Ж.А. Перспективы применения органических и промышленных отходов в энергетике республики Бурунди / Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова // Труды Академэнерго. 2017. № 2. С. 106-114.

3. Манигомба Ж.А. Перспективы использования продуктов пиролиза в дизель-генераторах промышленной группы «Regideso» в Республике Бурунди / Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова, В.Б. Груздев // Известия вузов. Проблемы энергетика. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 33-40.

***В изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus:***

4. Manigomba J.A. Prospects for biomass energy use in the republic of Burundi / J.A. Manigomba, N.D. Chichirova, V.B. Gruzdev, E.Ndikumana, A.I. Lyapin // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). January 2019. V. 10. I. 01. pp. 1371-1382.

***В других изданиях:***

5. Манигомба Ж.А. Организация электроэнергии Республики Бурунди / Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова // XIX Аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный «Дню энергетика». Сб. материалов докладов. Казань, КГЭУ. 2015. 13 с.

6. Манигомба Ж.А. Замещение дизельного топлива пиролизным газом для производства электрической энергии дизель-генераторами промышленной группы Regideso в Республике Бурунди / Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова // XII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017». Сборник материалов докладов. Иваново. 2017. Т. 1. С. 16-17.

7. Манигомба Ж.А. Возможности использования отходов в энергетике Республики Бурунди / Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова // XX Аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный «Дню энергетика» Сб. материалов докладов. Казань, КГЭУ. 2016. С. 26-27.

8. **Манигомба Ж.А.** Альтернативный газ, получаемый из бытовых и промышленных отходов Республики Бурунди, для замены нефтяного топлива / Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова // VII МНТК «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике и промышленности». Сб. материалов докладов. Ульяновск, УлГТУ. 2017. С. 105-109.

9. **Манигомба Ж.А.** Продукты пиролиза и их применение в электроэнергетике / Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова // XII Международная молодежная научной конференция «Тинчуринские чтения». Сборник материалов докладов. Казань, КГЭУ. 2017. Т.2.С. 34-35.

10. **Manigomba J.A.** Projet de substitution du carburant par le gaz pour la production de l'Energie électrique par les groupes électrogènes / J.A Manigomba, N.D. Chichirova // Exposée «Conférence au Ministère de l'Energie et des mines de la République du Burundi.2017.P. 1-10.

11. **Манигомба Ж.А.** Исследование термохимической конверсии биомассы для получения различных видов топлив / Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова // XIII Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения». Материалы докладов. Казань, КГЭУ. 2018. Т. 2.С. 23-25.

---

Подписано в печать 28.06.2019. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать ризографическая.  
Усл. печ. л. 1. Тираж 100. Заказ № 2806/2.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)  
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92  
e-mail: westfalika@inbox.ru

---