

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук  
Лавренова Владимира Александровича  
на диссертационную работу Манигомбы Жан Альберта  
«Исследование замещения жидкого топлива пиро- и биогазом для дизель-генераторных комплексов в энергетической системе республики Бурунди»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы»

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертация Манигомбы Ж.А. посвящена исследованиям особенностей производства пиро- и биогаза из различных видов растительной биомассы и органических отходов с целью частичного замещения жидкого углеводородного топлива на существующих и перспективных дизель-генераторных электростанциях, входящих в состав энергетической системы республики Бурунди.

Надежное обеспечение потребителей электрической энергии является актуальной и важной задачей, стоящей перед энергетической системой республики Бурунди. Установленная электрическая мощность электростанций республики составляет менее 100 МВт, электростанции связаны между собой линиями электропередач (ЛЭП) 110/70/35/10 кВ, при этом самыми распространенными являются ЛЭП-30/35 кВ, которые составляют более 75% электрической сети, что положительно сказывается на стабильности энергообеспечения потребителей. Перспективные планы развития экономики Бурунди предусматривают интенсивный рост потребности в электроэнергии, и в настоящее время идёт работа по созданию новых участков ЛЭП-110 кВ, в частности участка, образующего связь с соседними республиками, Руандой и Танзанией, благодаря чему к 2023 году энергосистема Бурунди войдёт в единое энергетическое кольцо Центральной Африки. В тоже время перед республикой остро стоит проблема дефицита углеводородного топлива для дизель-генераторных электростанций, связанная с нестабильностью поставок и высокой стоимостью топлива. В связи с этим актуальным направлением развития электроэнергетики республики является частичный переход к альтернативным источникам энергии, к которым в том числе относятся бытовые и промышленные отходы, а также растительная биомасса. Оценочное значение годового объема образующихся только в столице Бурунди органических отходов в 2019–20 гг. составляет 145–150 тыс. тонн, переработка которых в электроэнергию позволит не только обеспечить часть потребителей, но и существенно улучшить экологическую обстановку. Указанный вид отходов может служить сырьем для получения пиролизного газа, а также биогаза, которые могут в дальнейшем использоваться для частичного замещения дизельного топлива в существующих дизель-генераторных электростанциях республики.

## Содержание и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем работы составляет 152 страницы, работа содержит 37 таблиц и 31 рисунок. Библиографический список состоит из 167 наименований. Главы диссертации логически взаимосвязаны между собой, в структуре работы последовательно отражено решение поставленных задач.

Во введении обоснованы актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана теоретическая и практическая значимость, изложены новизна полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ научно-технической литературы по получению пиролизного газа и биогаза из твёрдой и жидкой биомассы. Осуществлена постановка задач исследования.

Во второй главе выполнено теоретическое обоснование постановки серии экспериментальных исследований пиролиза различных видов твердой биомассы с целью преимущественного образования газообразных продуктов. Разработана методика проведения экспериментальных исследований количественных характеристик процесса пиролиза, в частности зависимости выхода пиролизных газов от температуры процесса. Приведено описание методов определения влажности, зольности и теплоты сгорания изучаемых образцов биомассы. Экспериментально установлено, что максимальному выходу жидких и твёрдых продуктов пиролиза биомассы соответствует верхнее значение температуры, равное 600 °С, а преимущественному образованию продуктов в газообразном состоянии – не ниже 900 °С. Представлены методы определения количества летучих веществ и взвешенных твердых частиц в биомассе, ХПК и ХПБ<sub>5</sub>.

В третьей главе приведены методики проведения экспериментальных исследований и обработки результатов процесса пиролиза биомассы из сельскохозяйственных и растительных отходов: торфа, рисовой соломки, кофейной соломки и шелухи, древесины масличной пальмы. Представлены результаты исследования характеристик продуктов пиролиза различных видов биомассы в диапазоне температур от 450 до 1150 °С. Пиролиз проводился в печи со шнековой подачей измельченного топлива и внешним электрообогревом (скорость нагрева составляла 6–9 °С/мин). Результаты исследования элементного состава различных видов биомассы говорят об их схожести по содержанию углерода, водорода и кислорода. Проведено исследование закономерностей термохимических превращений различных образцов биомассы при пиролизе и горении, которое проводилось при восьми значениях температур– от 450 до 1150 °С, причём были применены два способа исследования образцов на выход летучих газов.

1. Способ для сырых образцов, при котором все образцы без высушивания помещались одновременно в холодную печь, нагревались до 450 °С, выдерживались определенное время, затем выключалась печь, все образцы вынимались, охлаждались в эксикаторе, взвешивались, а затем опять помещались в печь, после чего устанавливалась нужная температура и печь

3. Впервые теоретически обоснованы и выполнены экспериментальные исследования характеристик газообразных продуктов процесса пиролиза указанных видов биомассы в условиях преимущественного образования газообразных и твёрдых продуктов.

4. Впервые проведены исследования биогаза, полученного при переработке различных комбинаций жидких отходов на частном промышленном предприятии в городе Бужумбура республики Бурунди; дана оценка возможности использования биогаза в газодизельных двигателях, а также предложены рекомендации по интенсификации процесса сбраживания.

### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научные положения, выносимые на защиту, обоснованы и раскрыты в тексте диссертации и в опубликованных соискателем работах. Автор корректно использует известные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Обоснованность и достоверность результатов обусловлена применением стандартных методик и использованием корректных справочных данных, подтверждается в работе удовлетворительным совпадением данных теоретических исследований с экспериментальными, а также повторяемостью результатов. Полученные результаты не противоречат основным положениям науки и опубликованным результатам других авторов.

### **Практическая значимость диссертации**

Экспериментально определены физико-химические характеристики пиролизного газа, полученного из различных видов биомассы, как источника энергетического топлива для дизель-электрогенераторов энергетической системы республики Бурунди. Объёмная доля метана в газообразных продуктах пиролиза составила 45 %, что является приемлемым значением для сжигания газа в газодизельном двигателе. Разработана методика проведения экспериментов для определения удельного выхода газообразных продуктов в процессе пиролиза твердой биомассы и торфа в диапазоне температур от 450 до 1150 °С. Определены действительные значения влажности, зольности, содержания летучих веществ в твердой биомассе, а также её теплота сгорания. Проведены исследования биогаза, полученного из отходов производства пальмового масла из масличных пальм на частном промышленном предприятии в городе Бужумбура республики Бурунди. Было установлено, что из исследуемых образцов отходов путём анаэробного сбраживания можно получить биогаз, объёмная доля метана в котором составляет около 70 %, что также является приемлемым значением для сжигания газа в газодизельном двигателе. Дана технико-экономическая оценка эффективности применения пиролизного газа и биогаза в качестве топлива для дизель-электрогенераторов республики Бурунди. Результаты проделанного расчёта подтверждают экономическую целесообразность внедрения энерготехнологических комплексов для переработки отходов в

включалась в работу. Для исключения влияния снижения температуры в печи на время сжигания между выгрузкой и загрузкой пробы засекалось время восстановления печью нужной температуры.

2. Способ для отожженных образцов, в соответствии с которым высушенный образец после определения его начальной влажности первым способом двумя параллельными навесками помещался отдельно от других в печь, предварительно нагретую до необходимой температуры, затем делалась выдержка, после чего образец удалялся из печи, охлаждался в эксикаторе и взвешивался. В конце главы представлены результаты экспериментов по определению удельного выхода пиролизного газа и его теплоты сгорания.

В четвертой главе описана технология производства биогаза, а также перспективы его применения в республике Бурунди. В настоящее время в городе Бужумбура действует частный биогазовый мини-завод «Kirekura-Muzazi», производительностью около 0,65 м<sup>3</sup> биогаза в час. Блок генерации биогаза, установленный на этом мини-заводе, состоит из четырех метантенков. Были проведены исследования физико-химических параметров жидких отходов, используемых для переработки в биогаз: отходов от производства пальмового масла, смеси жидких отходов от производства пальмового масла и коровьего навоза, смеси жидких отходов от производства пальмового масла и свиного навоза, смеси жидких отходов от производства пальмового масла и отходов скотобойни, смеси жидких отходов от производства пальмового масла, коровьего навоза, свиного навоза и отходов скотобойни. Для каждой комбинации сырья был экспериментально определён химический состав образующегося биогаза. Установлено, что в полученном биогазе содержание метана составляет около 70 %, что, в свою очередь, позволяет утверждать о его пригодности для использования в дизель-генераторах.

В пятой главе приведено описание возможностей и обоснование экономической целесообразности практического применения энерготехнологических комплексов по переработке различных видов биомассы в пиролизный газ и биогаз и их последующего использования в существующих и перспективных дизель-генераторных электростанциях, входящих в энергосистему республики Бурунди.

### **Новизна научных положений, выводов и рекомендаций**

Получены следующие результаты исследований, характеризующие научную новизну работы:

1. Впервые экспериментально определены топливные характеристики различных видов биомассы (торфа, сельскохозяйственных и промышленных отходов), распространённых в республике Бурунди, рассматриваемых в качестве сырья для производства газообразного энергетического топлива для дизель-электрогенераторов.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований процесса пиролиза указанных видов твердой биомассы в зависимости от температуры процесса.

топливный газ. Реконструкция дизель-электрогенераторов для применения 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. Кроме того, внедрение подобных комплексов положительно скажется на экологической обстановке в республике Бурунди.

### **Замечания по диссертации**

1. В работе не указывается, чем руководствовался автор при выборе характерного времени выдержки (пять минут) образцов при пиролизе. При этом в методологии, описанной в главе 2, значится выдержка в течение семи минут в один или два этапа.

2. В диссертации практически не упоминается об очистке пиролизного газа до состояния, пригодного для использования в двигателях внутреннего сгорания. Использование неочищенного пиролизного газа в кратчайшие сроки приведёт к отказу двигателя ввиду закоксовывания рабочего объёма цилиндров и засорения топливовоздушных трактов.

3. Не представлен энергетический баланс процесса пиролиза биомассы. Какой энергоноситель планируется использовать для нагревания биомассы до требуемой температуры при промышленном исполнении реактора? При использовании части образующегося газа это должно быть учтено в расчётах.

4. Оценка экономической эффективности энерготехнологического комплекса по переработке биомассы не учитывает масштаб комплекса, потребляющего порядка 140 тонн в сутки биомассы, имеющей, как правило, крайне низкую насыпную плотность, что потребует существенных логистических расходов (в том числе на топливо) при доставке биомассы.

5. Автором не раскрыта проблема утилизации большого объёма субстрата, остающегося после анаэробного сбраживания.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы, научной и практической значимости её результатов.

### **Общая оценка диссертации**

Содержание работы изложено последовательно, методически правильно и достаточно полно раскрывает решение поставленной научно-технической задачи. Представленная диссертация выполнена на достаточно высоком профессиональном уровне, отражает владение автором современных методов научных исследований и современного приборного оборудования, знание обширной библиографической базы по теме исследований. Научные результаты, представленные в диссертации Манигомбы Жан Альберта, полностью отражены в одиннадцати научных публикациях: одной статье в журнале, включенном в международную базу цитирования SCOPUS, трех статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, и семи публикаций в материалах международных и национальных научных конференций. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации и достаточно полно его раскрывает.

## Заключение по диссертации

Диссертационная работа Манигомбы Ж.А. «Исследование замещения жидкого топлива пиро- и биогазом для дизель-генераторных комплексов в энергетической системе республики Бурунди» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно на высоком научном уровне, содержит совокупность новых научных результатов. В диссертации содержится решение актуальной задачи связанной с поиском альтернативных источников энергии взамен дефицитному в республике Бурунди углеводородному топливу. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Диссертация полностью соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» (в соответствии с постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. с актуальными на настоящий момент времени изменениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Автор представленной работы Манигомба Жан Альберт заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы».

Официальный оппонент, кандидат технических наук (специальность 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы»), старший научный сотрудник лаборатории №12 Распределённой генерации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), 125412, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, Россия, тел.: +7 (909) 637-49-48, e-mail: v.a.lavrenov@gmail.com

Лавренов Владимир Александрович

05 . июля . 20 19 г.

Учёный секретарь ОИВТ РАН,  
тел.: +7 (495) 485-90-09, e-mail: amirovravil@yandex.ru



ст.н.с, д.ф.-м.н.

Амиров Равиль Хабибулович

05 . июля . 20 19 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), 125412, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, Россия, тел.: +7 (495) 484-23-00, e-mail: webadmin@ihed.ras.ru, официальный сайт: <http://www.jiht.ru>.