



Набиуллина Мадина Фаридовна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА ЗА СЧЕТ АВТОНОМНЫХ ГИБРИДНЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Энергетическое машиностроение»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Мингалеева Гузель Рашидовна

Официальные оппоненты: **Дудолин Алексей Анатольевич**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», заведующий кафедрой «Тепловые
электрические станции», г. Москва

Владимиров Ярослав Александрович,
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого», доцент Высшей
школы Атомной и тепловой энергетики, г. Санкт-
Петербург

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Северный (Арктический)
Федеральный Университет имени М.В.
Ломоносова», г. Архангельск

Защита диссертации состоится 22 декабря 2026 г. в 10 ч. 00 мин.
на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, созданного на базе
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический
университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51,
ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-20.

Отзыв на автореферат, с указанием контактных данных и
заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу:
420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, КГЭУ, ученому
секретарю диссертационного совета 24.2.310.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Казанского государственного энергетического университета и на
официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/struktura-vuza/dissertatsionnye-sovety/dissertatsionnyy-sovet-24-2-310-02/soiskatel-nabiullina-madina-faridovna/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зиганшин Шамиль
Гаязович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Энергетическая система любого региона включает в себя различные топливные ресурсы. От вида и качества используемых ресурсов зависит себестоимость выработки энергии, а также надежность и эффективность системы, в которую включены как крупные объекты, обеспечивающие централизованную выработку энергии, так и малые, работающие автономно. Автономные электростанции преимущественно обеспечивают электроэнергией и теплом обособленных потребителей, учитывая их особенности. Таким образом, формируются энергетические комплексы «электростанция – предприятие». Причем потребителями могут являться как промышленные, так и сельскохозяйственные предприятия.

Внедрение малых автономных энергетических объектов (мини-ТЭС, мини-ТЭЦ) способствует снижению потерь энергии при ее транспортировке и более полному удовлетворению нужд потребителей энергии. Моделирование, расчет и оптимизация технологических схем гибридных электростанций является актуальной задачей и будет способствовать разработке типовых решений данных объектов и более широкому их распространению. В данной работе рассмотрено энергообеспечение сельскохозяйственных объектов посредством создания энергетического комплекса на основе малой гибридной электростанции, работающей автономно и использующей возобновляемые источники энергии, что полностью исключает затраты на топливо.

Разработка типовых схем гибридных электростанций позволит определить оптимальные соотношения между мощностями компонентов системы для конкретных климатических и географических условий, что поможет минимизировать инвестиционные и эксплуатационные затраты.

Гибридизация солнечных тепловых электростанций и установок на биотопливе может быть использована для проектирования электростанции, которая использует солнечные концентраторы в течение дня и биомассу в периоды пониженной интенсивности солнечного излучения (ночь, облачные периоды, переходные периоды), что позволяет сглаживать колебания выработки и обеспечивать более равномерное энергоснабжение. Гибридная технология сжигания биомассы с использованием концентрированной солнечной энергии основана на эффективной интеграции солнечного коллектора в водно-паровой цикл электростанции на биомассе. Использование местных ресурсов биотоплива снижает зависимость от привозного топлива, солнечные концентраторы используют бесплатный и неисчерпаемый ресурс – солнечную энергию.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области гибридных электростанций занимаются ведущие отечественные и зарубежные ученые: Очков В.Ф., Кусова Ж.Г., Гальперин А.А., Цебоев Р.З., Хузмиев И.К., Гассиева О.И., Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., Nathan G.J., Jafarian M., Dally B.B., Lopez-Gonzalez L.M., Sala J.M., Minguez-Tabares J.L., Lopez-Ochoa L.M., Dersch J., Geyer M., Herrmann U., Jones S.A., Kelly B., Kistner R., Ortmanns W., Pitz-Paal R., Price H., Servert J., San Miguel G., López D., Alireza Tajeddin, Elham Roohi, Subhadip Goswami, Tapas Kumar Benia, Abhik Banerjee и др.

Исследованиями в области использования возобновляемых топливных ресурсов и подготовки растительной биомассы к использованию в качестве топлива в энергетических котлах занимались: Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю., Андрееenko Т.И., Новаковский Б.А., Забарный Г.Н., Ключ С.В., Довженко Д.С., Прасолова А.И., Кинжибекова А.К., Алеева А.Ж., Слюсаренко В.В., Mehmet A.D., Samuel A.S., Ernest F.A., Bridgwater A.V., Demirbas A., Okello C., Kaliyan N., Morey R.V. и др.

Объект исследования: энергетический комплекс, включающий малую автономную гибридную электростанцию, работающую с использованием местных возобновляемых энергетических ресурсов.

Предмет исследования: влияние условий работы энергетического комплекса на параметры малой гибридной электростанции, работающей на возобновляемых ресурсах.

Целью исследования является повышение эффективности энергетического комплекса, работающего на основе малой гибридной электростанции, использующей солнечную энергию и биомассу, на примере Республики Татарстан.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

1. Оценка ресурсов растительных сельскохозяйственных отходов для использования в качестве возобновляемого топлива по районам Республики Татарстан.

2. Разработка технологии получения биотопливных гранул и исследование их теплофизических и механических свойств.

3. Разработка технологической схемы гибридной электростанции, работающей на основе использования биомассы и солнечной энергии.

4. Моделирование технологической схемы гибридной электростанции.

5. Определение эффективности работы гибридной электростанции при изменении условий функционирования энергетического комплекса.

Научная новизна работы. Научная новизна результатов заключается в следующем:

- разработана технология получения биотопливных гранул из растительных отходов сельскохозяйственного производства с учетом их теплофизических и механических свойств;
- разработана технологическая схема гибридной электростанции, работающей на основе использования биомассы и солнечной энергии, и создана ее математическая модель, позволяющая исследовать влияние режимов работы энергетического комплекса на параметры малой гибридной электростанции;
- получены зависимости показателей эффективности гибридной электростанции при изменении условий функционирования энергетического комплекса.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработана технология получения биотопливных гранул из лузги подсолнечника, шелухи овса и соломы и исследованы их теплофизические и механические свойства.
2. Разработана технологическая схема гибридной электростанции, работающей на основе использования биомассы и солнечной энергии, и создана ее математическая модель.
3. Получены зависимости показателей эффективности гибридной электростанции при изменении условий функционирования энергетического комплекса.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в создании математической модели технологической схемы объекта, позволяющей определить режимные параметры ее работы и обеспечить равномерность выработки энергии за счет сочетания различных энергоресурсов.

Практическая значимость работы. Практическая ценность планируемых результатов исследований состоит в определении теплофизических и механических свойств биотопливных гранул, изготовленных из сельскохозяйственных отходов, и разработке типовых решений для электростанций малой мощности с учетом климатических условий региона на примере Республики Татарстан.

Методология и методы исследования. Эмпирический подход включает проведение экспериментальных исследований по определению теплофизических свойств растительных отходов сельскохозяйственных предприятий региона, определение их химического состава, как в исходном состоянии, так и после стадий обработки для улучшения эксплуатационных свойств. Теоретический метод исследования включает изучение методов подготовки растительных отходов к сжиганию, изучение международного опыта внедрения технологических схем с солнечной энергией и биомассы в энергосистему страны/региона.

Достоверность и обоснованность достигается за счет использования апробированных математических и статистических методов анализа результатов, законов тепломассообмена и термодинамики.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования; выполнении экспериментальных исследований теплофизических и механических свойств биотопливных гранул различного состава и разработке технологии их получения; обзоре и анализе методик расчета технологических схем гибридных электростанций, представленных в отечественной и зарубежной литературе; разработке технологической схемы гибридной электростанции и создании ее математической модели; получении результатов численных исследований по данной модели.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования были доложены на следующих конференциях: VII Международная научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (Кемерово, 2022), VIII Национальная научно-практическая конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» (Казань, 2022), International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Сочи, 2023), VI Всероссийская научно-практическая конференция обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе» (Санкт-Петербург, 2023), Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика (Казань, 2022, 2023, 2024), Международная молодежная научная конференция Тинчуринские чтения - «Энергетика и цифровая трансформация» (Казань, 2022, 2023, 2024), Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 80-летию юбилею института Энергомашиностроения и механики НИУ «МЭИ» (Москва, 2023), VII Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития энергетики» (Казань, 2025), Международная научно-техническая конференция «Технологический суверенитет и цифровая трансформация» (Казань, 2025).

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в 19 печатных работах, 4 из которых входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 1 работа опубликована в сборнике трудов конференций, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, 12 работ опубликованы в сборниках трудов конференций,

входящих в РИНЦ, 1 патент на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 173 страницы, включая 35 таблиц, 31 рисунок и 4 приложения. Список использованной литературы включает 120 наименований.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2, 7 паспорта специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, степень ее разработанности, формулируются цели и задачи исследования, описывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Далее характеризуется методология и методы исследования, обозначаются положения, выносимые на защиту, а также обосновывается достоверность и апробация полученных результатов. Дается общая информация о структуре диссертации.

Первая глава посвящена обзору и обобщению результатов исследований современных гибридных энергетических установок с использованием возобновляемых источников энергии и методик их расчета, полученных отечественными и зарубежными исследователями.

В рамках главы рассмотрены различные конфигурации гибридных электростанций, включающие сочетание солнечной энергии и энергии ископаемого топлива, интеграцию системы солнечных коллекторов в схему парогазовой установки, системы выработки энергии на биомассе в сочетании ветровыми электростанциями. Также проведен литературный обзор, включающий химический состав и характеристики различных видов биомассы и способы их подготовки к сжиганию в энергетических котлах.

Глава содержит описание математических моделей для анализа термодинамических характеристик гибридных установок с использованием различных программных продуктов.

В результате обзора научно-технической литературы выявлено, что наиболее эффективные технические решения малых гибридных электростанций предполагают включение одного возобновляемого источника в технологическую схему другого. При этом отсутствуют предложения по типовым схемам и методикам расчета данных объектов.

Вторая глава посвящена исследованию биоэнергетического потенциала Республики Татарстан на основе анализа органических

отходов сельскохозяйственного производства, включая солому, лузгу подсолнечника и шелуху овса, с последующей оценкой суммарного валового энергетического потенциала по муниципальным районам региона.

Использование растительного биотоплива в чистом виде затруднено его большим объемом при малом весе. Наиболее эффективным способом подготовки растительной биомассы к использованию в качестве топлива в котлах является создание искусственных структурированных комплексов - брикетов, гранул (пеллет) для последующего сжигания. В основе технологии производства топливных гранул лежит процесс прессования растительного биотоплива под высоким давлением при нагревании с добавлением связующего вещества – мелассы – побочного продукта свекловичного производства, которая не требует предварительного подогрева и не выделяет вредных веществ.

Исследования характеристик соломы зерновых, шелухи овса и лузги подсолнуха в чистом виде и топливных гранул из указанных видов биомассы с добавлением связующего вещества (мелассы) проведены по известным методикам определения рабочей влажности твердого биотоплива высушиванием (ГОСТ 32975.2-2014). Определение зольности твердого биотоплива выполнено в соответствии с ГОСТ 32988-2014. Определение выхода летучих веществ твердого биотоплива выполнено в соответствии с ГОСТ 32990-2014. Теплотворная способность твердого топлива по его элементарному составу определена по формуле Д. И. Менделеева. Результаты определения характеристик твердого биотоплива представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики твердого биотоплива

Наименование показателя	Гранулы из лузги подсолнечника	Гранулы из шелухи овса	Гранулы из соломы
Влажность W^p , %	29,08	25,54	25,06
Зольность A^p , %	8,28	7,65	5,83
C^p , %	31,39	30,07	31,10
S^p , %	0,09	0,01	0,01
H^p , %	3,95	3,88	4,01
N^p , %	1,48	0,27	0,28
O^p , %	25,94	26,06	26,96
Низшая теплота сгорания, Q_n^p , МДж/кг	11,15	10,69	11,09

Анализ полученных результатов показывает, что рабочая влажность топливных гранул возросла по сравнению с исходным сырьем в связи с

добавлением связующего вещества - свекловичной мелассы. Для всех исследованных видов биомассы зольность гранул возросла по сравнению с зольностью исходных веществ, что объясняется наличием минеральной негорючей части в связующем веществе. Выход летучих для всех исследованных видов гранул биотоплива ниже, чем для исходного вещества, что можно объяснить воздействием связующего, имеющего меньший выход летучих.

Производство топливных гранул представляет собой оптимальное решение проблемы предварительной переработки в удобные для транспортировки и хранения формы, однако их широкое применение ограничено недостаточной изученностью механических характеристик.

Для определения предельного напряжения проведены численные расчеты и проведены испытания на сжатие на испытательной машине УТС-110М при продольном нагружении гранул. Вертикальные напряжения при хранении топливных гранул в контейнере, рассчитанные по формуле Янссена, составляют для гранул из лузги подсолнечника, шелухи овса и соломы (σ_v) – 2,6 кПа, 3,3 кПа, и 2,6 кПа соответственно – значительно ниже допускаемого напряжения ($[\sigma]_{\max}$): 250 кПа, 320 кПа и 200 кПа соответственно, что подтверждает безопасность хранения гранул даже при максимальном заполнении бункеров. Кинетическая энергия гранул из лузги подсолнечника, шелухи овса и соломы при падении из конвейера в бункер и из бункера в топку котла составляет всего 0,0101 Дж, 0,00806 Дж и 0,00806 Дж соответственно. Условие прочности выполняется с запасом более 4,4. Дополнительные напряжения от вибраций и веса для гранул из лузги подсолнечника, шелухи овса и соломы в сумме дают 5,16 кПа, 4,22 кПа и 4,15 кПа соответственно, что также значительно ниже предельного значения. Силы трения, касательные напряжения и максимальная сила трения о стальное полотно для гранул из лузги подсолнечника, шелухи овса и соломы составляют 0,0196 Н, 0,0469 Н и 0,0469 Н соответственно, что создает касательное напряжение 1,96 кПа для гранул из лузги подсолнечника, 4,69 кПа для гранул из шелухи овса и 4,69 кПа для гранул из соломы. Это намного ниже оцененного предела прочности на сдвиг (около 300 кПа для гранул из лузги подсолнечника, 384 кПа для гранул из шелухи овса и 240 кПа для гранул из соломы), что указывает на низкий риск разрушения от сдвига.

Полученные результаты подтверждают возможность надежного использования топливных гранул в энергетических установках. Проведенные исследования механических характеристик позволяют обеспечить бесперебойную работу систем топливоподачи и эффективное использование биотоплива в энергетических целях.

Третья глава посвящена моделированию и математическому описанию элементов технологической схемы гибридной электростанции. Рассмотрен энергетический баланс параболического желобчатого коллектора, тепловой баланс термомасляного котла, произведен расчет теплового баланса и теплопередачи многоступенчатой системы теплообмена, произведен подбор основного оборудования и оборудования циркуляционного контура и блока подготовки топлива.

Схема выработки электрической энергии из твердого биотоплива с использованием солнечной энергии (рисунок 1) работает следующим образом. В контуре солнечных параболических коллекторов 1 синтетическое масло подогревается до 160-400°C за счет солнечного излучения в зависимости от времени года. Затем подогретое масло направляется в котел на биотопливе для дополнительного нагрева до 400°C. Тепловая энергия синтетического масла передается воде для получения перегретого пара в многоступенчатой системе теплообмена. Пар из многоступенчатой системы теплообмена направляется в паровую турбину 4 для выработки электрической энергии.

В периоды повышенной солнечной активности, когда теплоноситель в трубках-поглотителях нагревается до температуры 390-400 °C за счет солнечной инсоляции, биотопливный котел может быть отключен, так как теплоты, получаемой от солнечного коллектора достаточно для подогрева теплоносителя до требуемого значения. Теплоноситель напрямую направляется в многоступенчатую систему теплообмена для выработки пара. В ночной период и в условиях погодноклиматических ограничений для гелиоустановок теплоноситель из системы солнечных коллекторов подается в котел для нагрева до необходимой температуры за счет сжигания биотоплива.

Блок топливоподготовки работает следующим образом: сырье из бункера 11 подается в измельчитель 12, далее измельченное до 1-2 мм сырье поступает в смеситель 13, в который вместе с измельченным биотопливом поступает пар для увлажнения топлива и связующее вещество – меласса. Готовая к формованию смесь поступает в экструдер 14, где происходит гранулирование биотоплива. Во время транспортировки биотопливных гранул от экструдера 14 до бункера хранения 15 осуществляется их естественная сушка до допустимых значений влажности гранул - 12%. За котлом предусмотрена установка рукавного фильтра 16 для улавливания летучей золы.

$$+\varepsilon_{\text{абс}} \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_{\text{абс}}^4 - T_{\text{неба}}^4) + A \cdot U_L \cdot (T_{\text{абс}} - T_{\text{окр}}),$$

где $\eta_{\text{опт}}$ – оптический КПД, A – площадь апертуры, м^2 ; E – солнечная инсоляция, $\text{Вт}/\text{м}^2$; (θ) – модификатор угла падения; $D_{1\text{T}}$ – массовый расход теплоносителя, $\text{кг}/\text{с}$; $T'_{1\text{T}}$ – температура теплоносителя на входе в коллектор, К ; $T''_{1\text{T}}$ – температура теплоносителя на выходе из коллектора, К ; $c_{\text{р1T}}$ – средняя удельная теплоемкость теплоносителя, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\varepsilon_{\text{абс}}$ – коэффициент эмиссии абсорбера солнечного коллектора, принимается в диапазоне $0,05 \div 0,1$; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_{\text{абс}}$ – температура абсорбера солнечного коллектора, К , принимается равной температуре теплоносителя в трубках; $T_{\text{неба}}$ – температура небосвода над солнечным коллектором, К , принимается равной температуре окружающей среды; U_L – коэффициент тепловых потерь за счет конвекции и теплопередачи при заданной скорости ветра, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, задается техническими характеристиками солнечного коллектора; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, К .

Основным показателем расчета энергоустановки является температура теплоносителя на выходе из солнечного коллектора, которая определяется по следующей формуле:

$$T''_{1\text{T}} = T'_{1\text{T}} + \frac{A \cdot E \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot (\theta) - \varepsilon_{\text{абс}} \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_{\text{абс}}^4 - T_{\text{неба}}^4) - A \cdot U_L \cdot (T_{\text{абс}} - T_{\text{окр}})}{D_{1\text{T}} \cdot c_{\text{р1T}}}.$$

Расчет термомасляного котла сводится к нахождению теплоты на подогрев синтетического масла и расхода топлива. Расход топлива, подаваемого в топку, рассчитывается следующим образом, $\text{кг}/\text{с}$:

$$B = \frac{D_{1\text{T}} [c_{\text{р2T}} \cdot (t''_{2\text{T}} - t'_{1\text{T}}) - c_{\text{р1T}} \cdot (t'_{1\text{T}} - t'_{1\text{T}})]}{Q_{\text{н}}^{\text{p}} \cdot \eta_{\text{к}}},$$

где $c_{\text{р2T}}$ – теплоемкость синтетического масла в трубопроводах котла, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $t''_{2\text{T}}$ – температура синтетического масла на выходе из котла, $^\circ\text{C}$; $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ – низшая теплота сгорания топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$; $\eta_{\text{к}}$ – КПД котла, %.

Температура синтетического масла на выходе из многоступенчатой системы теплообмена, которая определяется из теплового баланса теплообменного аппарата с учетом фазового перехода одного из теплоносителей:

$$t'_{1\text{T}} = t''_{3\text{T}} = t'_{3\text{T}} - \frac{G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} (t_{\text{с}} - t'_3) + G_{\text{в}} \cdot r + G_{\text{в}} \cdot (h''_3 - h'_3)}{G_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}}},$$

где $G_{\text{в}}$ – массовый расход воды (пара) через многоступенчатую систему теплообмена, $\text{кг}/\text{с}$; $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воды, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{с}}$ – температура насыщения воды, $^\circ\text{C}$; t'_3 – температура воды на входе в теплообменник,

$^{\circ}\text{C}$; r – скрытая теплота парообразования, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; h_3'' – энтальпия пара на выходе из теплообменника, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; h_3' – энтальпия воды на входе в теплообменник, $\text{кДж}/\text{кг}$; G_m – массовый расход синтетического масла через многоступенчатую систему теплообмена, $\text{кг}/\text{с}$; c_m – средняя теплоемкость синтетического масла, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; t_{3T}' – температура синтетического масла на входе в многоступенчатую систему теплообмена, $^{\circ}\text{C}$.

Электрический КПД гибридной электростанции не является оптимальным показателем для оценки эффективности в связи с его уменьшением по мере увеличения располагаемой солнечной энергии. Потому стоит рассматривать эффективность гибридной электростанции как произведение тепловых КПД аппаратов, входящих в технологическую схему:

$$\eta_{\text{ЭС}} = \eta_{\text{СК}} \cdot \eta_{\text{К}} \cdot \eta_{\text{МСТ}},$$

где $\eta_{\text{СК}}$ – коэффициент полезного действия солнечного коллектора; $\eta_{\text{К}}$ – коэффициент полезного действия термомасляного котла; $\eta_{\text{МСТ}}$ – коэффициент полезного действия многоступенчатой системы теплообмена.

В рамках **четвертой главы** была разработана принципиальная схема энергетического комплекса сельскохозяйственного предприятия, проведен сравнительный анализ влияния различного состава биотоплива и различных теплоносителей на общий расход топлива в котле и изменение температуры различных теплоносителей для интенсивности солнечного излучения, характерной для Республики Татарстан в течение года.

Для определения необходимой мощности гибридной электростанции необходимо знать нагрузки отдельных энергопотребителей. В сельском хозяйстве можно выделить следующих основных потребителей электроэнергии: жилые дома рабочих и служащих; производственные потребители; предприятия АПК и прочие.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема энергетического комплекса сельскохозяйственного предприятия с указанием основных потребителей, для которых суммарная нагрузка энергопотребления составляет от 470 до 500 кВт.

Для обеспечения электроэнергией сельскохозяйственного предприятия необходимо в схеме гибридной электростанции предусмотреть турбину мощностью 500 кВт и котельное оборудование, обеспечивающее необходимый расход и параметры пара. Таким образом, формируется энергокомплекс, состоящий из хозяйственных объектов и гибридной электростанции, работающей на отходах данного производства и солнечной энергии.



Рисунок 2 – Принципиальная схема энергетического комплекса сельскохозяйственного предприятия

На рисунке 3 представлены графики расхода различного биотоплива на гибридной электростанции с подключением установок концентрации солнечной энергии. Показано изменение расхода различных видов топлива в зависимости от интенсивности солнечного излучения.

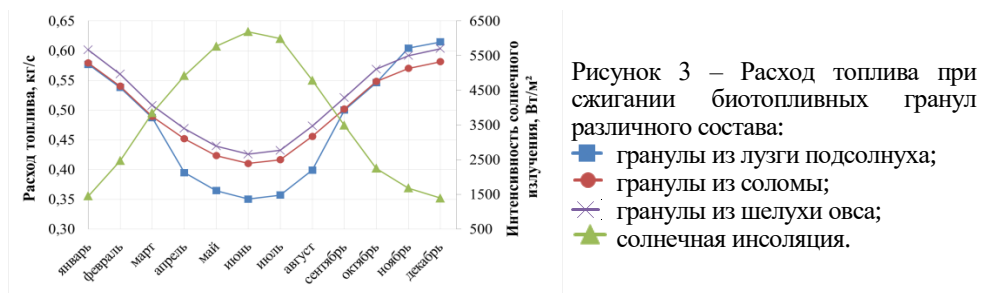


Рисунок 3 – Расход топлива при сжигании биотопливных гранул различного состава:

- гранулы из лузги подсолнуха;
- гранулы из соломы;
- ✕ гранулы из шелухи овса;
- ▲ солнечная инсоляция.

Во второй главе были изучены различные теплоносители и их влияние на эксплуатационные характеристики станции. Расход топлива в термомасляном котле на биотопливе имеет прямую зависимость от свойств теплоносителя, используемом в системе (рисунок 4).

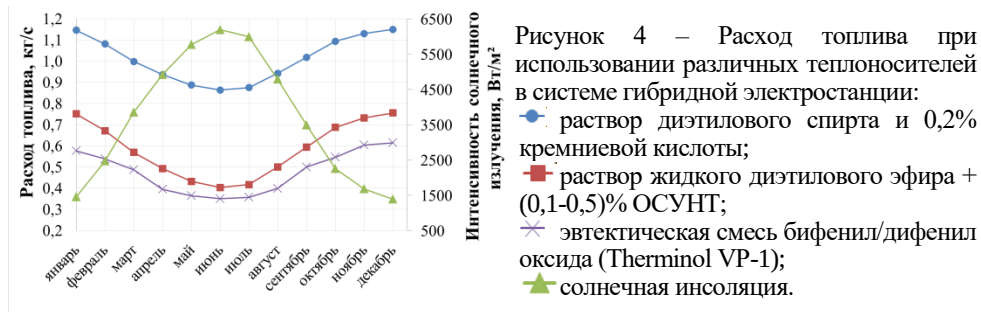


Рисунок 4 – Расход топлива при использовании различных теплоносителей в системе гибридной электростанции:

- раствор диэтилового спирта и 0,2% кремниевой кислоты;
- раствор жидкого диэтилового эфира + (0,1-0,5)% ОСУНТ;
- ✕ эвтектическая смесь бифенил/дифенил оксида (Therminol VP-1);
- ▲ солнечная инсоляция.

Температура теплоносителей имеет прямую зависимость от интенсивности солнечного излучения в течение календарного года (рисунок 5).

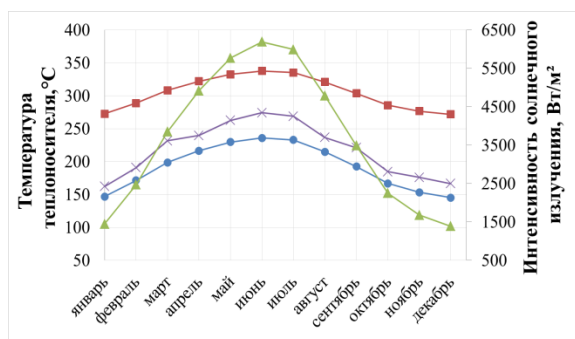


Рисунок 5 – Изменение температуры различных теплоносителей в системе солнечного коллектора в зависимости от солнечной инсоляции:

- раствор диэтилового спирта и 0,2% кремниевой кислоты;
- раствор жидкого диэтилового эфира + (0,1-0,5%) ОСУНТ;
- × эвтектическая смесь бифенил/дифенил оксида (Therminol VP-1);
- ▲ солнечная инсоляция.

Раствор жидкого диэтилового эфира с добавлением 0,1-0,5% одностенных углеродных нанотрубок демонстрирует наиболее высокую температуру среди всех составов на протяжении всего года, что связано с его высокой способностью аккумулировать и передавать тепловую энергию. Однако, использование раствора жидкого диэтилового эфира с добавлением 0,1-0,5% одностенных углеродных нанотрубок ограничено в связи с низкой температурой кипения теплоносителя (377 °C). Эвтектическая смесь бифенил/дифенил оксида (Therminol VP-1) стабильно удерживает температуру выше 200 °C в теплый период и имеет температуру кипения 400 °C, что делает ее пригодной для высокотемпературных процессов. Раствор диэтилового спирта и 0,2% порошка кремниевой кислоты демонстрирует наименьшую температуру среди всех теплоносителей, что связано с низкой теплоемкостью. Использование данного теплоносителя также ограничено низкой температурой кипения, которая составляет всего 250 °C.

Эффективность работы гибридной электростанции рассматривается относительно ее теплового КПД и составляет 57,73%.

Годовой энергобаланс гибридной электростанции отражает закономерное перераспределение нагрузки между источниками в зависимости от сезона (рисунок 6).

Наблюдаемая динамика характеризуется ростом доли солнечной энергии с марта по июль и последующим снижением к декабрю, при этом генерация на биотопливе демонстрирует обратную тенденцию, компенсируя дефицит солнечной составляющей в холодный период. Такая взаимодополняемость источников подтверждает эффективность

выбранной гибридной конфигурации для обеспечения круглогодичной надёжности энергоснабжения.

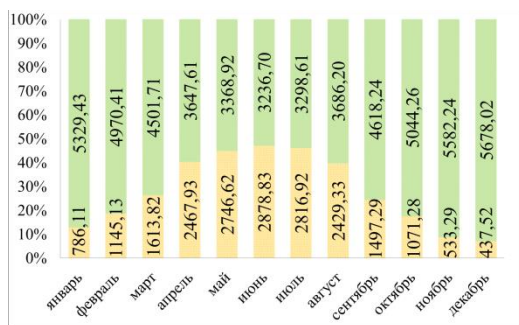


Рисунок 6 – Распределение тепловой энергии по источникам:

■ тепло, получаемое от сгорания топлива;
 ■ тепло, получаемое от солнечного коллектора

Для определения себестоимости электроэнергии, генерируемой на гибридной мини-ТЭС, необходимо обозначить затраты на эксплуатацию станции, которые включают в себя затраты на заработную плату работников станции, отчисления по единому социальному налогу, амортизационные отчисления. При капитальных затратах на строительство станции и закупку и монтаж оборудования для нее, равных 107 059,00 тыс. руб., себестоимость производства электрической энергии составит 2,84 руб. за 1 кВт·ч отпущенной электроэнергии, срок окупаемости составляет 12 лет 6 месяцев для гибридной электростанции на биотопливе номинальной электрической мощностью 500 кВт, при этом в качестве топлива используются растительные отходы сельскохозяйственного предприятия.

Стоимость подключения сельскохозяйственного энергетического комплекса к существующим электросетям составит 22 691,64 тыс. руб., а ежегодные затраты на электроэнергию составят 17 237,64 тыс. руб.

На основе оценки суммарного валового потенциала и данных об объемах образования сельскохозяйственных растительных отходов можно определить, какое количество гибридных электростанций допустимо разместить в муниципальных районах Республики Татарстан:

$$n = \frac{M_{\text{год}}}{B_{\text{год}}},$$

где $M_{\text{год}}$ – масса отходов сельскохозяйственных культур, тонн; $B_{\text{год}}$ – расход топлива на гибридной электростанции за год, тонн.

Растительные отходы зерновых и зернобобовых культур используются для собственных нужд сельского хозяйства (корм скоту, подстилка для животных), в связи с этим на топливные нужды можно использовать 12,5-16 % от общего количества. Общее число гибридных электростанций мощностью 500 кВт составит 35 шт., в том числе 29

станций на соломе, а также по 3 станции на шелухе овса и лузге подсолнечника.

Общая мощность, вырабатываемая гибридными электростанциями, работающими на возобновляемых ресурсах Республики Татарстан, составит 17,5 МВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены значения объемов образования растительных сельскохозяйственных отходов по районам Республики Татарстан, которые для лузги подсолнечника составляют 52 967,99 тонн, для соломы - 1 989 213,92 тонн и для шелухи овса - 198 921,39 тонн, пригодные для использования в качестве топлива.

2. Разработана технология получения биотоплив из лузги подсолнечника, соломы и шелухи овса в виде гранул и исследованы их теплофизические и механические свойства. Выявлено, что полученные гранулы удовлетворяют условиям эксплуатации по механическим характеристикам.

3. Разработана технологическая схема гибридной электростанции, работающей на основе использования биомассы и солнечной энергии, которая включает солнечные коллекторы, термомасляный котел, систему теплообменников и охлаждения оборотной воды.

4. Создана математическая модель технологической схемы гибридной электростанции, работающей на основе использования биомассы и солнечной энергии, включающая взаимосвязанные уравнения и позволяющая определить параметры работы электростанции при различных условиях функционирования.

5. Определены параметры работы гибридной электростанции при использовании различных видов биотоплива, теплоносителей и изменении интенсивности солнечного излучения.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

В качестве дальнейшего развития исследования могут быть рассмотрены другие виды отходов сельского хозяйства, такие как стебли кукурузы и подсолнечника, объем образования которых значительно превышает исследованные виды сырья, а питательные свойства гораздо ниже, что делает их непригодными для использования в качестве корма. Поэтому предпочтительно их использование в качестве топлива.

Исследования могут быть продолжены в направлении моделирования других схем малых гибридных электростанций, использующих ветрогенераторы, газотурбинные и парогазовые установки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК по специальности 2.4.5:

1. Перспективы развития гибридных источников автономного энергоснабжения / О. Афанасьева, Г. Мингалеева, М. Набиуллина // Энергетическая политика. – 2022. – № 9(175). – С. 88-99.

2. Использование растительных отходов для обеспечения функционирования сельскохозяйственных энергокомплексов / М.Ф. Набиуллина, Г.Р. Мингалеева, О.В. Афанасьева, С. С. Тимофеева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 3. – С.120-131.

3. Оценка физических и механических свойств топливных гранул для систем автономного энергоснабжения / М.Ф. Набиуллина, Г.Р. Мингалеева, О.В. Клейдман, А.А. Саченков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2026. – № 4. – С. 17-24.

4. Влияние условий эксплуатации на эффективность гибридной электростанции, работающей в составе сельскохозяйственного энергетического комплекса / М. Набиуллина, Г. Мингалеева // Мониторинг. Наука и технологии. – 2026. – № 3(69). – С. 70-77.

Статьи, опубликованные в сборниках трудов конференций, индексируемых в международной реферативной базе Scopus:

5. G. R. Mingaleeva, M. F. Nabiullina and D. N. Pham, Efficiency of the Energy Complex when Using a Hybrid Mini-HPS in the Republic of Vietnam // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 233-238.

Статьи, опубликованные в сборниках трудов конференций, входящих в РИНЦ:

6. Автономные малые электростанции на возобновляемых ресурсах / М.Ф. Набиуллина, А.Е. Редель, Г.Р. Мингалеева // В сборнике: Технологический суверенитет и цифровая трансформация. Материалы международной научно-технической конференции. Казань, 2025. С. 242-245.

7. Исследование механических характеристик топливных гранул из растительных отходов сельского хозяйства / М.Ф. Набиуллина, О.В. Клейдман, Г.Р. Мингалеева // В сборнике: Проблемы и перспективы развития энергетики. сборник материалов VII Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции. Казань, 2025. С. 772-775.

8. Исследование работы различных типов солнечных концентраторов в условиях Республики Татарстан / М. Ф. Набиуллина // В

сборнике: Тинчуринские чтения - 2024 "Энергетика и цифровая трансформация". Материалам Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах. Казань, 2024. С. 402-406.

9. Исследование теплофизических характеристик растительных отходов сельского хозяйства / М.Ф. Набиуллина // В сборнике: XXVIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика. Материалы докладов. В 3-х томах. Казань, 2024. С. 408-411.

10. Использование различных теплоносителей в солнечных коллекторах гибридных электростанций / М. Ф. Набиуллина // В сборнике: Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции. Кемерово, 2023. С. 154-1-154-5.

11. Подготовка отходов сельскохозяйственного производства к сжиганию в котлах / М. Ф. Набиуллина // В сборнике: XXVII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика и 55-летию КГЭУ. материалы докладов. Казань, 2023. С. 310-313.

12. Гибридная технология получения энергии на основе использования биомассы / М. Ф. Набиуллина, Г.Р. Мингалеева // Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 80-летию юбилею института Энергомашиностроения и механики: Сборник материалов и докладов конференции, электронное издание. Москва: НИУ «МЭИ», 2024. С. 23-26.

13. Возобновляемые источники энергии и перспектива совместного использования с традиционной энергетикой / П. И. Дарьина, М. Ф. Набиуллина // В сборнике: Энергетика и автоматизация в современном обществе. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей. Санкт-Петербург, 2023. С. 7-11.

14. Гибридные мини-ТЭС на биомассе и солнечной энергии для энергоснабжения изолированных потребителей / М. Ф. Набиуллина, Г. Р. Мингалеева // В сборнике: Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Материалы VIII Национальной научно-практической конференции. Казань, 2023. С. 411-415.

15. Гибридные мини-ТЭС на биомассе и солнечной энергии как автономные источники тепла и электричества / М. Ф. Набиуллина // В сборнике: XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика. Материалы докладов. Казань, 2023. С. 196-200.

16. Исследование работы гибридной мини-ТЭС на биотопливе с ветроэнергетической установкой / М. Ф. Набиуллина // В сборнике: Тинчуринские чтения - 2023 "Энергетика и цифровая трансформация". Материалы Международной молодежной научной конференции. Казань, 2023. С. 719-722.

17. Перспективы разработки основного оборудования для гибридных электростанций / Г. Р. Мингалеева, М. Ф. Набиуллина // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2022 (МНТК "ИМТОМ - 2022"): Материалы XI-й Международной научно-технической конференции. Казань, 2022. С. 211-215.

РИД, зарегистрированные в Роспатенте:

18. Патент №2870963 Российская Федерация, МПК F24S 20/40, F23G 5/033, F23G 5/04, F23G 7/10. Способ производства энергии на гибридной электростанции за счет использования возобновляемых ресурсов: № 2026110960: заявл. 10.04.2026: опубл. 29.09.2026 / М.Ф. Набиуллина, Г.Р. Мингалеева; заявитель ФГБОУ ВО "КГЭУ".

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026686845 Российская Федерация. Расчетный модуль для определения энергетических показателей гибридной электростанции: заявл. 07.08.2026: опубл. 02.09.2026 / М.Ф. Набиуллина, Г.Р. Мингалеева; заявитель ФГБОУ ВО "КГЭУ".

Подписано в печать 20.10.2026. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 2010/2.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: +7(843)292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru