

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи



Набиуллина Мадина Фаридовна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЗА СЧЕТ АВТОНОМНЫХ
ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Мингалеева Гузель Рашидовна

Казань – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА I. СОВРЕМЕННЫЕ ГИБРИДНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ	12
1.1. Технологические схемы гибридных электростанций	12
1.2. Виды сырья и способы подготовки к сжиганию	25
1.3. Математические модели технологических схем гибридных электростанций	33
Выводы по первой главе	45
ГЛАВА II. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА	47
2.1. Источники и объемы образования биотоплива	47
2.2. Исследование состава и энергетических характеристик растительных отходов	52
2.3 Механические свойства топливных гранул из лузги подсолнечника	66
Выводы по второй главе	78
ГЛАВА III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	82
3.1 Методология моделирования технологических схем	82
3.3 Математическое описание элементов технологической схемы автономной гибридной электростанции	87
3.3.1 Энергетический баланс параболического желобчатого коллектора	87
3.3.2 Термомасляный биотопливный котел	93
3.3.3 Многоступенчатая система теплообмена	108
3.3.4 Паровая турбина	117
3.3.5 Циркуляционный контур охлаждения воды	118
3.3.6 Блок подготовки топлива	122
3.3.7 Общая система уравнений	127
Выводы по третьей главе	131

ГЛАВА IV. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.....	132
4.1. Определение эффективности работы гибридной электростанции при изменении условий эксплуатации	132
4.2. Оценка эффективности сельскохозяйственного энергетического комплекса при внедрении малых гибридных электростанций	140
Выводы по четвертой главе.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ	171
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС	172
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В ООО «ЭНЕРГОГАЗСЕРВИС».....	173

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

SEGS – Solar Energy Generating System (система выработки солнечной энергии)

ИСКЦ – интегрированная система комбинированного солнечного цикла

ПГУ – парогазовая установка

КУ – котел-утилизатор

CSP – Concentrated Solar Energy (концентрированная солнечная энергия)

HTF – High Temperature Coolant (высокотемпературный теплоноситель)

HRES – Hybrid Renewable Energy System (гибридная система производства электроэнергии)

КПД – коэффициент полезного действия

КСЭ – концентраторы солнечной энергии

ПКК – поле концентрационных коллекторов

LHV – Lower Heating Value (низшая теплотворная способность топлива)

DNI – Direct Normal Irradiation (прямое нормальное облучение)

ОСУНТ – одностенные углеродные нанотрубки

МСУНТ – многостенные углеродные нанотрубки

ВВЕДЕНИЕ

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. Электрогенерирующие мощности все чаще интегрируются с конечными потребителями, образуя специализированные энергетические комплексы, функционирующие в рамках промышленной и аграрной инфраструктуры.

Внедрение малых автономных энергетических объектов (мини-ТЭС, мини-ТЭЦ) способствует снижению потерь энергии при ее транспортировке и более полному удовлетворению нужд потребителей энергии. Экономия традиционного топлива на таких объектах может быть достигнута за счет использования ВИЭ, таких как биомасса, солнечная и ветровая 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.

Основными преимуществами гибридных электростанций являются непрерывность энергоснабжения независимо от погодных условий, экологическая чистота производства энергии, автоматизированное управление, возможность работы в удаленных районах без подключения к

общей сети, экономическая эффективность при правильном подборе мощности.

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. Готовые решения ускоряют процесс разработки проекта и подбор компонентов, что позволит масштабирование систем - адаптацию под объекты разной мощности.

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. Гибридные системы подходят для энергоснабжения изолированных объектов, поселков, сельскохозяйственных предприятий, где прокладка линий электропередач нецелесообразна или затруднена.

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., Андреев 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 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 патент на изобретение.

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 следующим пунктам паспорта специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы:

п. 1 – разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования;

п. 2 – математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии;

п. 7 – исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем, комплексов и установок на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования.

ГЛАВА I. СОВРЕМЕННЫЕ ГИБРИДНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

1.1. Технологические схемы гибридных электростанций

Одним из способов повышения надежности энергоснабжения потребителей является локально-децентрализованная генерация электрической энергии и тепла с помощью когенерации и возобновляемых источников энергии. Это обеспечивает значительное снижение стоимости энергоресурсов. При этом не нужно оплачивать дополнительные издержки централизованной системы и нет необходимости платить за подключение к сети [1]. Однако при внедрении объектов автономного энергоснабжения возникают определенные трудности, которые связаны с выбором вида используемого топлива или других энергоресурсов. Они должны быть доступными и достаточно дешевыми. Выбор энергоресурсов для децентрализованного энергоснабжения определяет структуру технологической схемы и состав основного и вспомогательного оборудования. При этом затраты на топливо на таких электростанциях должны быть минимальны для обеспечения ее конкурентоспособности с централизованной энергосистемой.

Эту проблему можно решить с помощью современных технологий энергосбережения и альтернативных - возобновляемых источников энергии - ВИЭ (солнце, ветер, водные потоки). Основным преимуществом ВИЭ является доступность и отсутствие платы за используемые энергетические ресурсы [1]. Основным недостатком ВИЭ является переменный характер потока мощности в зависимости от времени и состояния окружающей среды. Для обеспечения резервной выработки электроэнергии может быть использована гибридная энергоустановка на биомассе для покрытия

возможных несоответствий между прогнозируемыми и реальными значениями выходной мощности установок на ВИЭ [2].

Современные гибридные энергетические установки представляют собой комплексные системы производства электроэнергии, использующие два или более источников энергии.

Основными компонентами гибридной электростанции являются ветрогенераторы, солнечные панели, аккумуляторные батареи, резервные генераторы (дизельные/газовые), система управления с автоматизированным контролем.

Основными преимуществами гибридных электростанций являются непрерывность энергоснабжения независимо от погодных условий, экологическая чистота производства энергии, автоматизированное управление, возможность работы в удаленных районах без подключения к общей сети и экономическая эффективность при правильном подборе мощности [3].

Технические характеристики гибридных электростанций охватывают широкий диапазон параметров [3]. Мощность установок может составлять от 1 кВт для индивидуальных потребителей до нескольких сотен кВт, что подходит для энергоснабжения небольших населенных пунктов. Современные ветрогенераторы способны запускаться уже при скорости ветра от 2,2 м/с, а уровень создаваемого ими шума составляет около 43 дБ. Кроме того, такие электростанции можно адаптировать к самым разным климатическим условиям, в том числе и к суровым арктическим.

Гибридные электростанции на возобновляемых источниках энергии могут применяться для энергоснабжения удаленных объектов, обеспечения электроэнергией небольших населенных пунктов, резервного энергоснабжения и как дополнение традиционных энергетических систем [3].

Экономическая эффективность гибридных электростанций определяется объемом потребления электроэнергии, наличием местных

возобновляемых источников энергии, расстоянием до ближайшей подстанции, сложностью рельефа местности [3].

Современные гибридные электростанции особенно эффективны для электрификации удаленных объектов, так как позволяют избежать значительных затрат на прокладку линий электропередач и установку дополнительного оборудования. При этом они работают в автоматическом режиме и требуют минимального обслуживания.

Стандарты качества гибридных электростанций должны соответствовать требованиям ГОСТ 56124-2014, который приведен в соответствие с международным стандартом IEC/TS 62257-1:2003 [4].

В перспективе гибридные энергетические установки могут обеспечить до 32% потребностей России в электроэнергии, что делает их одним из приоритетных направлений развития энергетической отрасли страны.

Стабильность энергоснабжения потребителей при использовании двух и более энергоресурсов достигается в том случае, когда один возобновляемый источник интегрирован в технологическую схему другого.

В работе рассматривается организация автономного энергоснабжения путем объединения гибридных энергетических установок с котлами, работающими на биотопливе.

Ключевым компонентом гибридной электростанции с использованием возобновляемых источников энергии с котлом на биотопливе является блок подготовки биотоплива, биотопливный котел, теплообменник, дополнительный источник энергии (концентраторы солнечной энергии или ветроэнергетическая установка), электрогенератор.

Схемы гибридных электростанций на биотопливе с подключением возобновляемых источников энергии могут включать различные комбинации компонентов для обеспечения эффективного и надежного энергоснабжения.

Схема с биотопливным котлом и солнечными панелями включает солнечные панели, работающие от солнечной энергии, как основной источник электроэнергии, биотопливный котел для использования как

источник тепловой энергии в периоды, когда выработка ВИЭ недостаточна, теплообменник для передачи тепла воде от нагретого в солнечных коллекторах теплоносителя, электрогенератор, преобразующий механическую энергию в электрическую.

Схема с биотопливным котлом и ветрогенератором включает котел на биотопливе как основной источник тепла, паротурбинную установку для генерации электрической энергии, ветрогенератор как дополнительный источник электрической энергии, работающий от ветра.

Гибридная электростанция, сочетающая биотопливный котел и ветроэнергетическую установку, особенно эффективна для сельскохозяйственных объектов и удаленных территорий. Внедрение таких электростанций требует тщательного технико-экономического обоснования, профессионального обслуживания и возможности модернизации, и обеспечивает надежное, экологичное и экономически выгодное энергоснабжение при грамотном проектировании и эксплуатации.

Предприятия деревообработки образуют отходы круглогодично без выраженной сезонной зависимости, тогда как в аграрном секторе объемы доступной биомассы зависят от времени года [5]. В связи с этим для обеспечения стабильного производства тепла и электроэнергии целесообразно применять комбинирование разнотипных энергетических ресурсов [5]. На практике уже существуют гибридные энергетические комплексы, одновременно задействующие несколько возобновляемых источников – солнечное излучение, ветер и биомассу [5].

Сочетание солнечных коллекторов и биотопливных котлов может быть применено для создания электростанции, где в дневное время используются солнечные концентраторы, а в периоды пониженной инсоляции (в ночные часы, при пасмурной погоде и в переходные сезоны) подключается биотопливный котел [5]. Соответственно, гибридная технология, объединяющая сжигание биотоплива и концентрированную солнечную

энергию, строится на грамотной интеграции солнечного коллектора в пароводяной контур биотопливной электростанции [5].

Энергетические установки на биомассе и ветровые электростанции могли бы эффективно дополнить друг друга. Биотопливный котел обеспечивает резервную выработку энергии, компенсирующую расхождения между прогнозируемым и фактическим уровнем выработки мощности ВЭУ [5]. Непрерывная работа системы на биомассе обеспечивает гибкость и надежность всей энергосистемы. Оптимизация установки на биомассе обеспечивается ее размещением на территории ветропарка и непрерывной работой для производства электроэнергии [5].

Работа солнечных энергоустановок напрямую зависит от суточной цикличности и продолжительности солнечного облучения (ночное время, зимний период, при облачности). Работа электростанции на биомассе зависит от поставок топлива, при этом доступность сырья имеет сезонный характер, а организация транспортировки и хранения создает дополнительные логистические сложности. Гибридные энергетические системы позволяют использовать энергетический потенциал каждого ресурса, обеспечивая надежность энергоснабжения и оптимизацию совокупных издержек эксплуатации.

Электростанции на биомассе были адаптированы к различным видам топлива (сельскохозяйственные и промышленные побочные продукты, энергетические культуры), при этом мощность установок обычно составляет 2-50 МВт. Более крупные электростанции выигрывают от сравнительно более высокой энергоэффективности (обычно до 22-23%), но им приходится сталкиваться с проблемой удовлетворения спроса на большое количество биомассы [6].

Рассмотрим сочетание солнечной энергии и энергии ископаемого топлива.

В составе технологий концентрирования солнечной энергии можно выделить четыре основных типа установок: параболические желобчатые

коллекторы (PTC), линейные отражатели Френеля (LFR), солнечные энергетические башни (SPT) и параболические тарелочные коллекторы (PDC). Их принципиальные схемы представлены на рисунке 1.1. На практике применяются в основном технологии PTC и SPT [7].

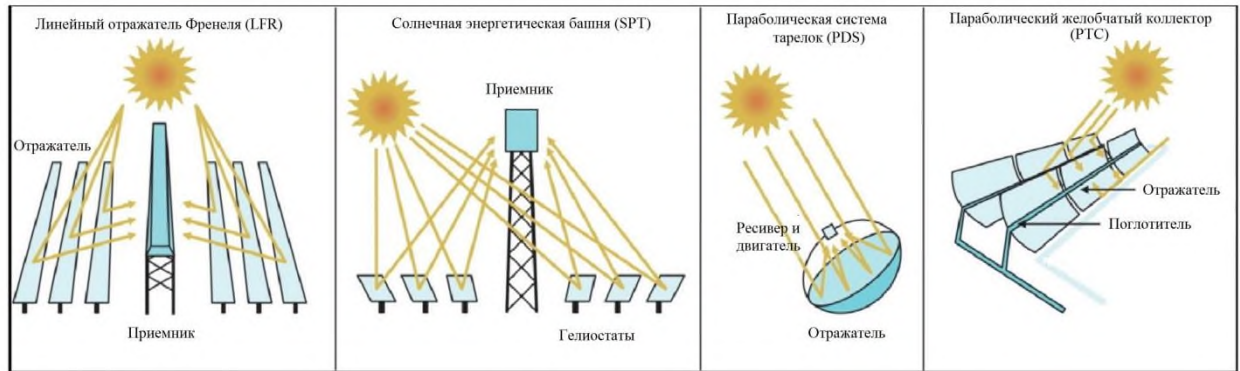


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема четырех основных технологий CSP [5]

Примером электростанции с параболическим желобом является группа из 9 электростанций под названием SEGS (Solar Energy Generating System – Система выработки солнечной энергии), обозначающая системы выработки солнечной электроэнергии, общей установленной мощностью 350 МВт [8]. Данные электростанции были построены для покрытия пиковых нагрузок. Теплоносителем в системе является синтетическое масло, которое используется в теплообменнике для нагрева воды и получения и перегрева пара, как описано на рисунке 1.2. В качестве резервной системы используется система на природном газе, что обеспечивает 25% производительности установок. Это позволяет достичь температуры 390°C и давления 100 бар на входе в турбину, в то время как вода, поступающая в солнечное поле, имеет температуру около 304°C . Однако хранение тепловой энергии на SEGS невозможно [8].

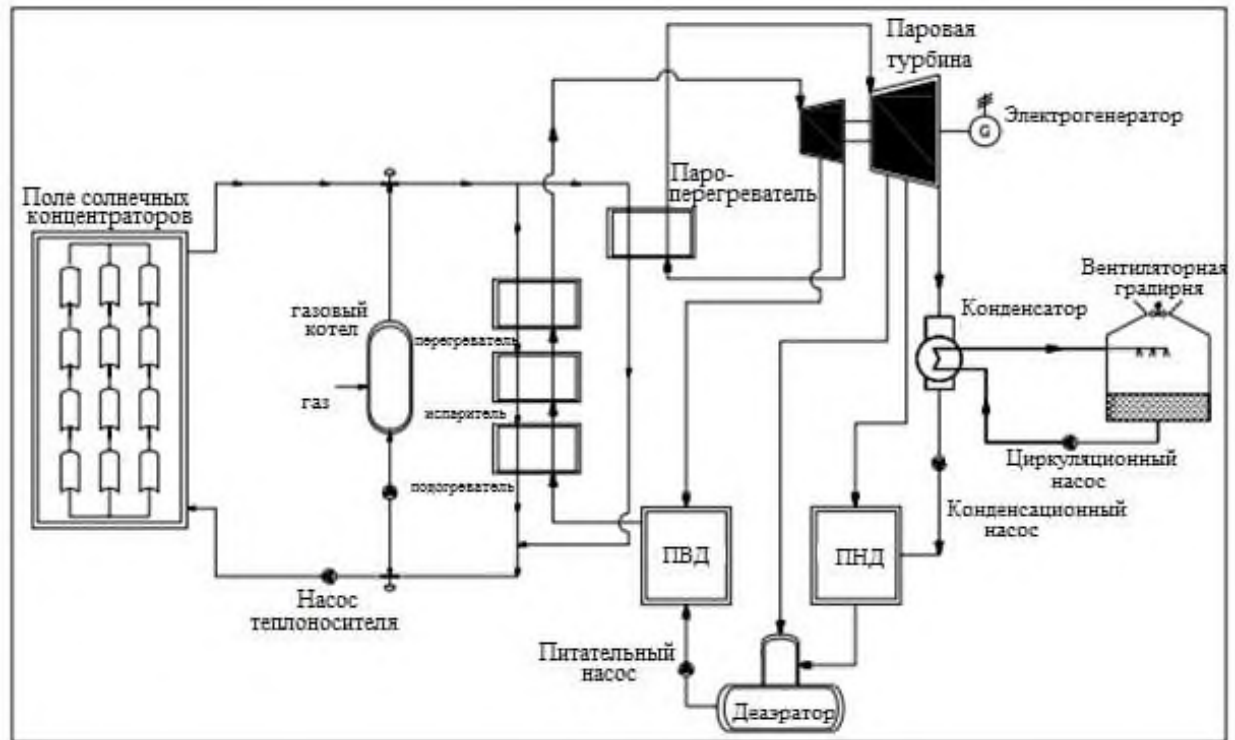


Рисунок 1.2 – Схема установки SEGS [6]

Некоторые электростанции также гибридируются по комбинированному циклу [9]. Электростанция, основанная на комбинировании солнечного цикла (ИСКЦ) в основном состоит из трех блоков: солнечного поля, газовой турбины комбинированного цикла (ПГУ) и котла-утилизатора (КУ). Солнечный коллектор используется для нагрева минерального масла либо синтетического теплоносителя. Тепловая энергия масла используется для выработки пара, который применяется в обычной электростанции, работающей по циклу Ренкина [9]. Солнечный коллектор состоит из рядов концентрационных коллекторов. Эти коллекторы представляют собой цилиндрический тип ПКК, каждый из которых имеет площадь апертуры A_p [9]. Каждый ряд содержит определенное количество коллекторов, соединенных последовательно, в которых рабочая жидкость равномерно распределена (рисунок 1.3).

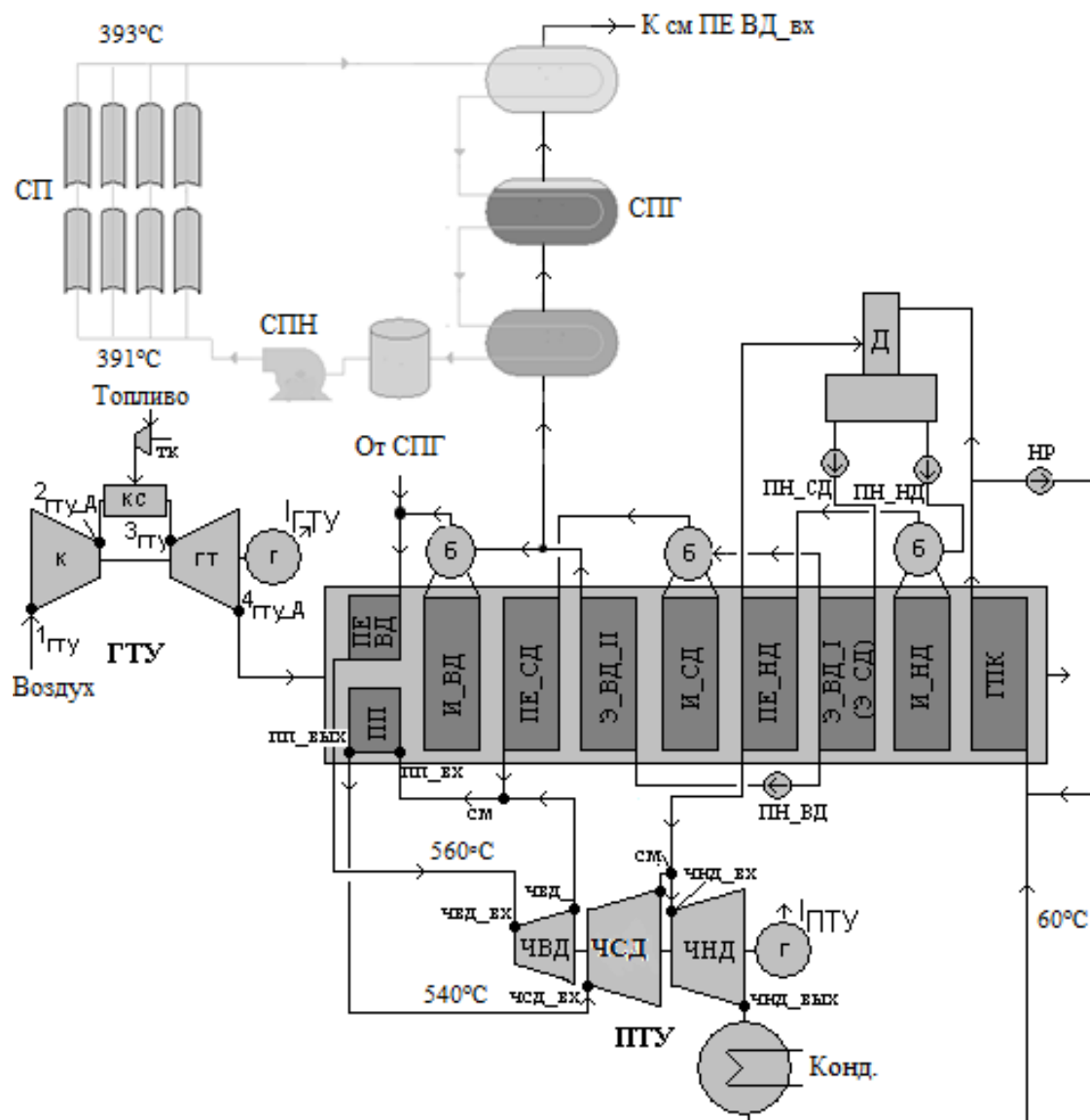


Рисунок 1.3 – Схема интегрированной солнечной системы комбинированного цикла [9]

На электростанции с комбинированным циклом горячие газы, выходящие из газовой турбины, используются для выработки пара для паровой турбины [9]. В установках ИСКЦ дополнительная тепловая энергия от солнечного парогенератора вводится в КУ обычной установки с комбинированным циклом. В солнечных коллекторах производится перегретый пар, который подается в КУ, что позволяет увеличить тепловой КПД парового цикла в ПГУ [9].

Работа [10] содержит анализ гибридного подхода, основанного на сочетании солнечной энергии и энергии биомассы. Схемы электростанции, реализующей данный принцип, показаны на рисунках 1.4 и 1.5. В конфигурации, где резервный котел на природном газе заменен на котел на биомассе, котел на биомассе предназначен для нагрева теплоносителя, поступающего от солнечного коллектора. Для эффективной работы гибридной системы динамические характеристики котла на биомассе должны быть сопоставимы с показателями газовых котлов. Это позволяет оперативно адаптировать режим генерации к вариациям солнечного излучения, характерным для рассматриваемой схемы [10]. Для этой цели котел на биомассе обычно включает в себя систему быстрой резервной подачи природного газа.

Модификация схемы энергоустановки на рисунке 1.4. основана на замене газового резервного котла на котел, работающий на биомассе, что позволяет оптимизировать эксплуатационное управление и сократить капитальные затраты. С другой стороны, основным недостатком этого варианта является более низкая производительность цикла биомассы из-за необходимости использования теплообменников для теплоносителя.

При параллельном подключении солнечного поля и котла на биомассе как солнечная, так и биомассовая системы способны генерировать перегретый пар. Объединение систем позволяет увеличить выработку энергии. Поддержание нормативных параметров пара достигается путем адаптивного управления расходом воды в котле на биомассе: его величина зависит от текущего солнечного излучения и от объема пара, производимого солнечным полем [11]. Режим работы котла гибко подстраивается под вклад солнечной составляющей, что обеспечивает устойчивую выработку электроэнергии [11].



Рисунок 1.4 – Принципиальная технологическая схема электростанции гибридного типа на базе концентрированной солнечной энергии и биомассы [10].

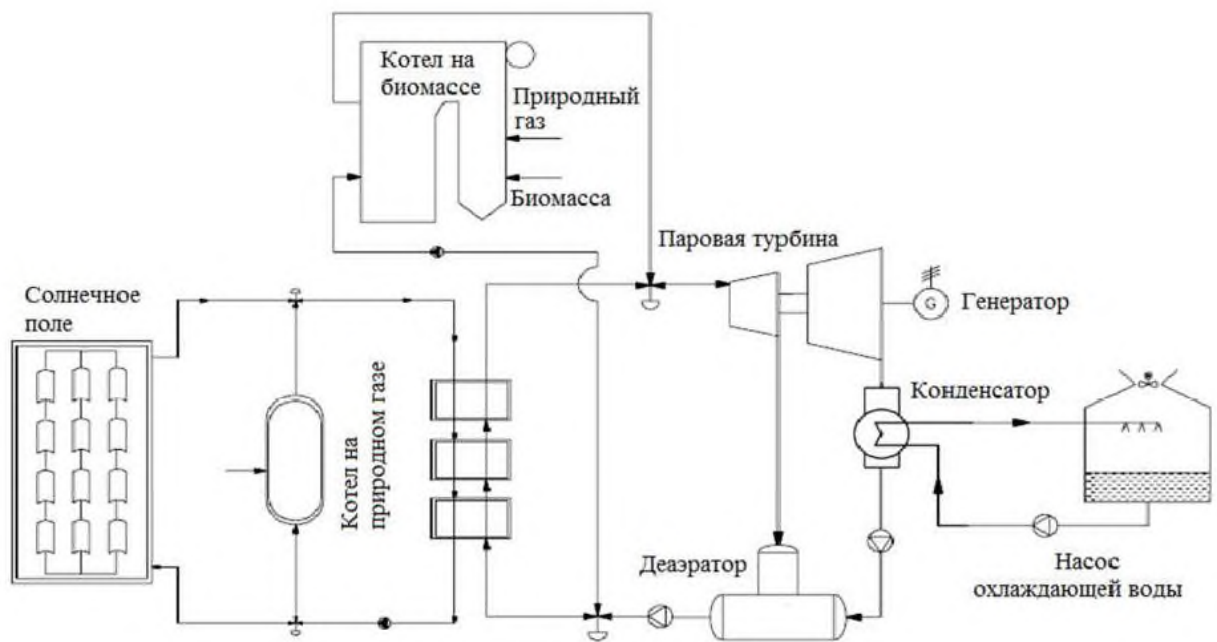


Рисунок 1.5 – Технологическая схема гибридной электростанции с использованием солнечной концентрированной энергии и биомассы с параллельно установленными CSP-панелями и блоками использования биомассы [10]

Основные принципы эксплуатации гибридной энергоустановки сводятся к следующему:

- выработка электроэнергии должна основываться на цикле солнечных концентраторов, так как в данной системе источник энергии (солнечное излучение) является бесплатным, а эксплуатационные затраты минимальны;
- природный газ применяется в котле на биомассе для компенсации дефицита энергии в периоды облачной погоды или перехода между циклами биомассы и солнечных концентраторов;
- сжигание биомассы используется на более протяженных интервалах времени, когда доступ к солнечному ресурсу отсутствует (ночные часы, зимний период).

Гибридизация биомассы позволяет избежать необходимости в дорогостоящей системе аккумулирования тепла в обычных CSP. Основными преимуществами по сравнению с установками на биомассе являются: увеличение доли возобновляемой энергии, которая может быть произведена в регионе, и тот факт, что около 1/3 от общего объема производства зависит от бесплатного надежного источника первичной энергии, что снижает риск, связанный с поставкой биомассы.

Наконец, использование общего оборудования и комбинированная производительность двух технологий приводят к более низким затратам на электроэнергию в гибридных установках, чем простое сложение взвешенных значений затрат на электроэнергию, полученных из независимых вкладов биомассы и CSP в производство.

Крупнейшая на Ближнем Востоке станция концентрированной солнечной энергии Shams One мощностью около 100 МВт вырабатывает солнечную тепловую энергию за счет сфокусированного солнечного света, который концентрируется в параболических коллекторах и нагревает теплоноситель, в результате чего образуется пар высокого давления, приводящий в действие обычную паровую турбину (рисунок 1.6).

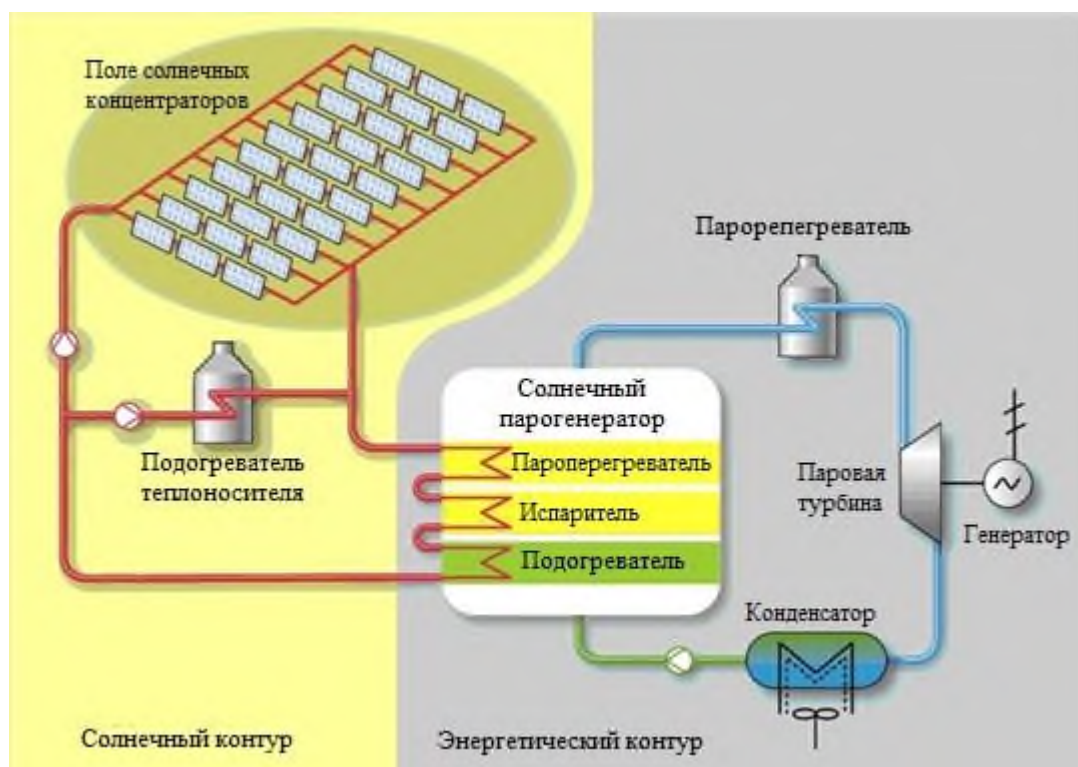


Рисунок 1.6 – Технологическая схема базовой электростанции на основе конфигурации Shams One

Принцип действия данной электростанции: солнечные панели нагревают высокотемпературный теплоноситель (НТФ), который поступает в солнечный парогенератор, где передает свою энергию для выработки и перегрева пара. При недостатке солнечной энергии двухтопливный подогреватель теплоносителя и двухтопливный пароперегреватель дополняют нагрев охлаждающей жидкости и пара соответственно. Перегретый пар поступает в паровую турбину, которая в свою очередь приводит в действие генератор, вырабатывающий электроэнергию. Отработавший пар охлаждается в конденсаторе, конденсируется в воду и возвращается в цикл.

Таким образом, схема демонстрирует гибридный подход, сочетающий солнечную энергию с дополнительным нагревом топлива для стабильной выработки электроэнергии.

В работе [2] представлена установка на биомассе, основанная на газификаторе и двигателе внутреннего сгорания, где газификатор мог бы

работать на треть выше номинального значения, требуемого установкой на биомассе и это увеличение выработки газа может быть использовано для двигателя внутреннего сгорания, когда требуется компенсация энергии ветра. На рисунке 1.7 показана схема предлагаемой системы.

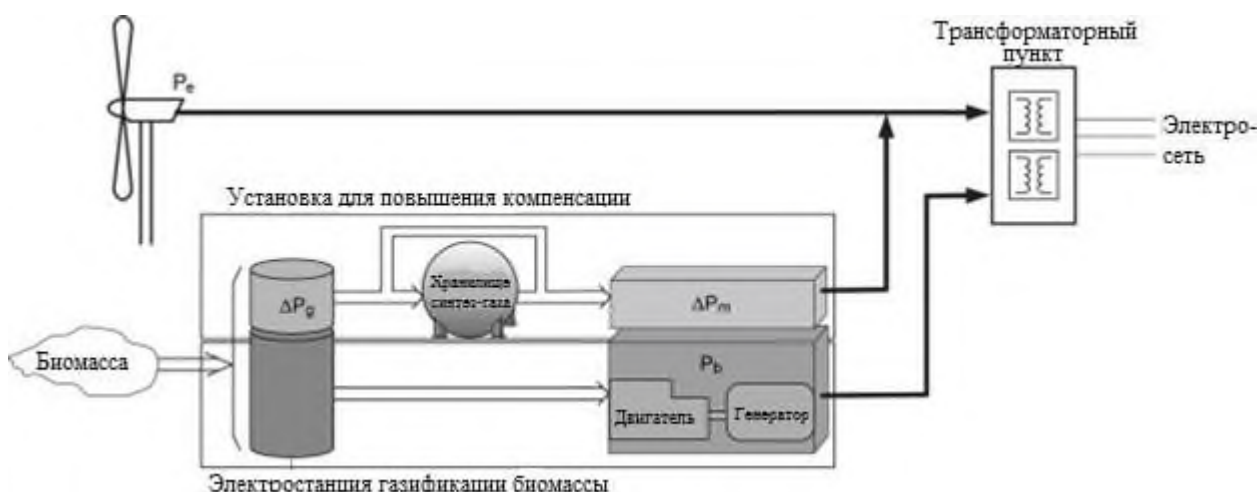


Рисунок 1.7 – Гибридная система ветра и биомассы [2]

Для производства электроэнергии предложена схема использования энергии ветра и биомассы [13]. Выпрямитель используется вместе с инвертором, поскольку инвертор работает от входного источника постоянного тока. В результате объединения энергии, вырабатываемой ветряными электростанциями и системами, работающими на биомассе, была предложена гибридная система производства электроэнергии (Hybrid Renewable Energy System, HRES) (рисунок 1.8). Данная гибридная система может обеспечить более высокую эффективность для удовлетворения спроса на электроэнергию.

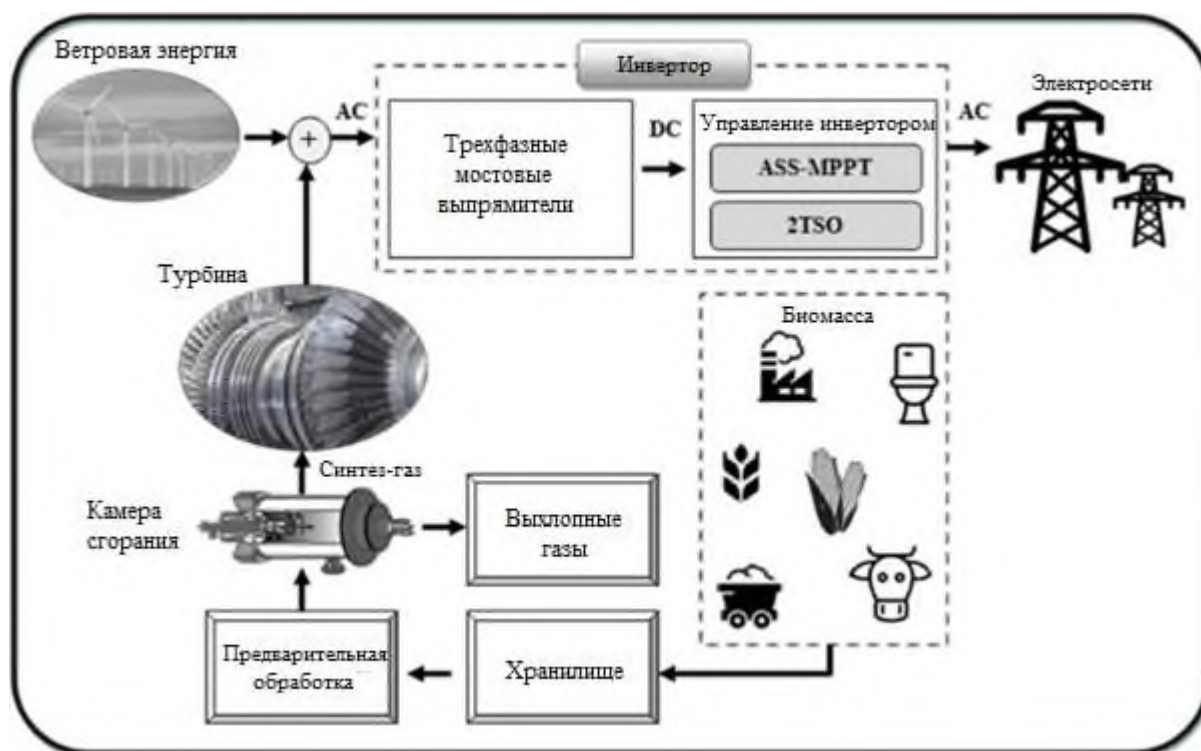


Рисунок 1.8 – Структурная схема гибридной системы производства электроэнергии (HPGS) [13]

Рассмотренные технологические схемы гибридных электростанций, часть из которых реализована на практике, позволяют выработать подход к комбинированию различных видов возобновляемых ресурсов в зависимости от их наличия в данном регионе.

1.2. Виды сырья и способы подготовки к сжиганию

Биомасса является одной из форм возобновляемых источников, которые могут быть преобразованы в твердое, жидкое и газообразное энергетическое топливо, и на основе которого может быть произведена тепловая и электрическая энергии.

На сегодняшний день доля биомассы в мировом производстве первичной энергии составляет порядка 12 %, при этом в государствах с развивающейся экономикой ее вклад достигает 40–50 % от общего объема потребляемой энергии. Применение возобновляемого сырья – в частности,

отходов деревообработки – для выпуска биотоплива способствует росту конкурентоспособности биомассы на рынке энергоресурсов [11].

С экологической точки зрения биомасса считается углеродно-нейтральным источником энергии [5]. Это обусловлено тем, что в ходе роста растений происходит поглощение CO_2 и формирования замкнутого углеродного цикла: объем углекислого газа, усвоенный в процессе вегетации, приблизительно равен объему, выделяемому при полном сгорании биоматериала [5]. Биомасса выступает важным дополнением к уже развитым направлениям возобновляемой энергетики (солнечной и ветровой) и позволяет заметно расширить спектр доступных возобновляемых источников энергии. При этом для раскрытия ее потенциала и снижения нагрузки на экосистему требуется совершенствование технологий обращения с биомассой. Среди ключевых направлений – наращивание продуктивности энергетических культур, модернизация методов сжигания, а также разработка рациональных решений для логистики и складирования биосырья [5].

В качестве сырья для биоэнергетических установок используют разные типы биомассы: энергетические культуры, целенаправленно выращиваемые для получения энергии (например, кукуруза, сахарное сорго, мискантус); отходы лесозаготовительного и деревообрабатывающего сектора; побочные продукты аграрного производства – как животноводческие (навоз КРС, свиней, птицы), так и растительные (солома, стебли кукурузы и подсолнечника, ботва, лузга); органические фракции коммунальных отходов; осадки и активный ил, образующиеся на очистных сооружениях; биомасса водорослей – как микро-, так и макроскопических форм [15].

По генезису биоэнергетические ресурсы классифицируют на природные и антропогенные. К первой группе относят естественные запасы биомассы – лесные массивы, луговые угодья, биомассу водоемов [15]. Вторая группа формируется в результате хозяйственной деятельности людей и жизнедеятельности животных. В ее составе выделяют два подтипа:

специально произведенную биомассу для энергетических целей и побочные продукты технологических процессов (например, остатки производства в пищевой или целлюлозно-бумажной промышленности) [15].

Рассмотрим возможность использования биомассы на примере Республики Татарстан. Наиболее доступными ресурсами в Республике Татарстан для производства топлива из возобновляемых источников сырья являются древесина, солома зерновых культур, шелуха подсолнечника, стебли кукурузы и навоз крупного рогатого скота [5].

Использование древесины, которая традиционно применяется в качестве источника энергии с древних времен, в настоящее время во многих странах регулируется на государственном уровне для сохранения естественных лесных экосистем [16]. Из-за этих правил, введенных на национальном уровне, древесина даже низкого качества (получаемая из веток и сучьев-обрубков) становится менее доступной [17]. Биомасса является возобновляемым источником энергии, поскольку ее количество увеличивается из года в год, она широко распространена по всему миру и имеет низкую стоимость по сравнению с ископаемым топливом. Ресурсы биомассы, из которых производится топливный материал, могут включать древесину и древесные отходы, сельскохозяйственные злаки и отходы, образующиеся в результате их производства, водную биомассу и водоросли [18]. Побочные продукты деревообрабатывающей промышленности, такие как опилки, успешно использовались для производства брикетов с удовлетворительной теплотворной способностью, но в настоящее время большое внимание уделяется другим видам материалов, получаемых из биомассы, таких как солома, лузга подсолнечника, стебли кукурузы и подсолнуха и другие [19].

Процесс получения жидкого биотоплива является более сложным. Жидкое биотопливо производится путем ферментации крахмала или сахара (биоэтанол), из масличных растений (биодизель), из биомассы (диметиловый эфир) и др. [5]. Низкая плотность жидкого биотоплива по сравнению с

дизельным, предполагает использование топливных баков с большим объемом. Биодизель является одним из видов жидкого биотоплива и используется в дизельных двигателях [5]. Он производится из растительных масел, животных жиров и синтетических добавок. Биодизель обладает рядом преимуществ по сравнению с обычным дизельным топливом, таких как более низкая стоимость, меньшие выбросы вредных веществ и возможность использования в обычных дизельных двигателях без модификаций. Однако, производство биодизеля также имеет свои недостатки, такие как необходимость в больших площадях для выращивания растений, высокая стоимость оборудования для переработки и возможность использования только определенных видов масел и жиров [5].

Газообразное биотопливо состоит в основном из метана и углекислого газа в различных пропорциях в зависимости от состава органического вещества, из которого оно было получено [5]. Основными источниками биогаза являются отходы животноводства и сельского хозяйства, сточные воды и органика из бытовых отходов. Биогаз образуется в результате процессов биологического разложения без доступа кислорода (анаэробное сбраживание). Одним из главных преимуществ газообразного биотоплива является его экологичность. Биологическое происхождение этого топлива означает, что при его использовании не происходит выброса парниковых газов, которые являются причиной глобального потепления [5]. Использование газообразного биотоплива также имеет свои недостатки. Одним из них является то, что для производства этого топлива требуется большое количество земли и воды, что может привести к конфликтам с другими видами землепользования. Кроме того, некоторые виды газообразного биотоплива могут быть менее эффективными по сравнению с традиционными видами топлива, такими как природный газ. Газообразное биотопливо является перспективным источником энергии, который может помочь снизить зависимость от ископаемых видов топлива и уменьшить выбросы парниковых газов [5].

Развитие малой энергетики на промышленных или сельскохозяйственных предприятиях более экономически выгодно в условиях постоянного повышения платы за подключение к централизованным сетям или за увеличение мощности [5]. Подключение собственных мини-ТЭС целесообразно в лесообрабатывающей, сельскохозяйственной промышленности, где вместе с выработкой электричества необходимо производство пара для технологических процессов производства. При этом само производство имеет отходы в виде опилок и шелухи семян сельскохозяйственных культур, которые могут быть преобразованы в пеллеты и использоваться для энергетических нужд [5].

В Республике Татарстан ежегодно образуется более 3 200 тыс. тонн растительных сельскохозяйственных отходов, основную часть которых составляют отходы от переработки зерновых культур: пшеницы, ржи, кукурузы, рапса, подсолнечника, перспективные в развитии альтернативной энергетики Республики Татарстан. В таблице 1.1 представлен химический состав и характеристики различных видов твердой биомассы, используемой для получения тепловой и электрической энергии [5].

На маслоэкстракционных заводах в ходе технологических операций формируется значительный объем побочного продукта в виде лузги подсолнечника, которая по масштабам накопления представляет собой крупнотоннажный вторичный ресурс [5]. Лузга подсолнечника может использоваться в энергетическом секторе в качестве топлива, в агропромышленном комплексе для корма скоту и в качестве удобрений почвы [20]. Химический состав высушенной при температуре 110 °С лузги характеризуется следующими показателями: доля углерода достигает 49 %, содержание водорода составляет 5,75 %, суммарная концентрация кислорода и азота – 43,11 %, серы – 0,10 %, доля золы – 2 %. В реальных производственных условиях влажность такого сырья в среднем держится на уровне 10 %. Энергетический потенциал материала выражается в низшей теплотворной способности, находящейся в диапазоне 14,5–16,5 МДж/кг. При

этом зольный остаток, образующийся при сжигании лузги, обладает средней температурой плавления, что важно учитывать при подборе оборудования для термической утилизации. С точки зрения экологической безопасности лузга подсолнечника демонстрирует заметные преимущества: в процессе горения она выделяет сравнительно небольшой объем летучих органических соединений, благодаря чему рассматривается как перспективный вариант альтернативного топлива с пониженным негативным воздействием на атмосферу [21].

Таблица 1.1 – Химический состав и характеристики различных видов биомассы [21].

Наименование показателя	Подсолнечная лузга	Стебли кукурузы	Солома	Древесина
Влажность W, %	8,4	16,5	15	40
Зольность на сухую массу A, %	2,7	7	4,5	1,0
C, %	50,1	45,5	45	51,0
S, %	0,14	0,2	0,01	-
H, %	6,3	5,5	5,8	6,1
N, %	2,36	0,3	0,4	0,6
O, %	41,4	41,5	39	42,1
Теплота сгорания, МДж/кг	15,4	16,7	11,7	10,2

Низшая теплота сгорания соломы как рабочего топлива в среднем составляет 11,7 МДж/кг. Допустимый диапазон влажности соломы составляет 10–23%, при этом наиболее оптимальным значением считается 15%, а зольность составляет от 4,5 до 6,1%. Содержание хлора и калия в соломенной биомассе примерно на порядок выше, чем для древесной щепы. Наибольшее содержание хлора в соломе наблюдается непосредственно

после уборки урожая. Низкая температура плавления золы соломы обусловлено высоким содержанием щелочных металлов [21]. В отличие от древесины, солома представляет собой отход, на утилизацию которого требуются относительно высокие затраты. Среднегодовой сбор соломы озимых культур в России в 2001-2008 гг. составил 38 млн т. В государствах с развитым животноводством, например в Дании, около 36,5% собираемой соломы направляется на нужды животноводства. Таким образом, для энергетического использования доступно около 24 млн т. соломы озимых культур. По элементарному составу и теплотворным характеристикам солома не имеет существенных отличий от древесины, хотя ее теплота сгорания ниже, чем у сухой древесной биомассы [22].

Отходы, образующиеся при уборке кукурузы на зерно, имеют достаточно хорошие топливные характеристики, сопоставимые с древесным топливом [5]. Биотопливо на основе кукурузы может использоваться в котельном оборудовании, рассчитанном на сжигание твердого топлива. Зольность кукурузы является основным фактором качества для производства биотоплива и зависит от технологии уборки урожая. Чем дольше биомасса контактирует с почвой, тем больше золы содержится в кукурузной ботве [5]. Зольность кукурузы составляет 3,5% [5]. По показателям плавкости золы кукуруза близка к древесной биомассе и создает более благоприятные условия для сжигания. Для сравнения: температура плавления древесной золы составляет около 1200 °С, а зольный остаток стеблей кукурузы плавится при 1100 °С. Элементный состав кукурузы практически не отличается от соломы, поэтому их теплотворная способность сопоставима. Свойства биомассы зависят от региона выращивания, почвы, используемых удобрений, времени сбора урожая и погодных условий. Наибольшее влияние на теплотворную способность кукурузной биомассы оказывает влажность [23]. После обмолота кукурузы и подсолнечника на зерно стебли не срезаются, а остаются на зиму в поле. За зимний период влажность стеблей снижается до 20–25%, после чего

высохшие остатки убираются. Низшая теплота сгорания таких стеблей достигает 13,6 МДж/кг при зольности 4–10% [21].

Подготовка растительной биомассы к использованию в качестве топлива в энергетических котлах предполагает создание искусственных структурированных комплексов блоков, брикетов, гранул для последующего сжигания [24].

Гранулированное топливо характеризуется меньшими потерями при транспортировке, хранении и переработке. Такая форма подготовки топлива улучшает технологические, экономические и экологические параметры его применения.

Гранулы представляют собой двухфазные или трехфазные структурные образования, имеющие пористое строение. Гранулы могут либо состоять исключительно из гранулируемого вещества (или веществ), либо включать наряду с ним еще и связующее вещество, скрепляющее исходные частицы гранулируемого продукта [25].

Гранулообразование включает в себя два этапа: формование и структурирование гранулы [26]. На этапе формования исходному гранулируемому материалу придают форму, которую он должен иметь в гранулированном виде [26]. На этапе структурирования в теле гранулы окончательно формируются связи между образующими ее частицами (кристаллами), и возникает гетерофазная структура, обеспечивающая требуемые потребительские свойства гранулированного продукта [26].

Для реализации стадий формования и структурирования необходимо обеспечить взаимодействие частиц гранулируемого вещества – чаще всего это делается за счет подвода механической энергии в гранулируемый слой. Она сообщается слою гранулируемого вещества [26]:

- рабочими органами грануляторов (лопастями, тарелками, движущимися частями барабанов, лент, дисков, валками, бегунами и т.д.),

- теплоносителями в виде кинетической и потенциальной энергии (гранулирование в псевдоожиженном, вихревом, фонтанирующем и других слоях).

Гранулы представляют собой прессованные изделия различной формы и размеров, получаемые из сыпучих материалов под высоким давлением [27].

Процесс гранулирования включает в себя следующие этапы: подготовительный и основной. На подготовительном этапе осуществляется дробление исходного материала, очистка от примесей, доведение до необходимой влажности, добавление связующих веществ при необходимости. Основной этап заключается в формовании гранул под высоким давлением, фиксация формы и структуры.

Для реализации процесса гранулирования необходимо обеспечить достаточное давление прессования, равномерное распределение материала, оптимальную влажность сырья, стабильность процесса формования.

Исходное сырье при гранулировании должно соответствовать следующим требованиям: влажность 8-12%, размер частиц до 3-5 мм.

Таким образом, гранулирование является эффективным методом переработки растительных отходов сельского хозяйства в компактный вид, обеспечивающий удобство транспортировки, хранения и использования конечного продукта в качестве топлива.

1.3. Математические модели технологических схем гибридных электростанций

Математические модели технологических схем гибридных электростанций описаны в научной литературе и разработаны для определения показателей эффективности электростанции в зависимости от внешних условий.

Авторами [9] разработана математическая модель с использованием доступного программного обеспечения для анализа термодинамических

характеристик установки ИСКЦ и формулирования некоторых условий проектирования. Расчеты были основаны на вкладе солнечной энергии и энергии газовой турбины в тепловой КПД установки ИСКЦ в соответствии с рисунком 1.3 [9].

В парогазовых установках отработавшие газы, выходящие из газовой турбины, направляются в котел-утилизатор, где их тепловая энергия преобразуется в пар, приводящий в действие паровую турбину [9]. В схемах интегрированных солнечно-комбинированных циклов (ИСКЦ) дополнительное тепло, поступающее от солнечного парогенератора, подается в котел-утилизатор базовой ПГУ. Солнечный коллектор генерирует перегретый пар, который направляется в КУ, за счет чего повышается тепловой КПД парового контура установки [9].

Оценка влияния, которое оказывает интеграция концентрированной солнечной энергетики (КСЭ) с парогазовым циклом, проводится на базе эталонной ПГУ, выступающей основой для конфигурации исследуемой системы ИСКЦ. На первом этапе анализа проверялась возможность построения модели эталонной комбинированной установки [28]. Далее рассматривается схема объединения комбинированного цикла с солнечным коллектором. В определенные периоды времени ИСКЦ функционирует в режиме обычного ПГУ. Расчетная модель как для ИСКЦ, так и для парогазового комбинированного цикла (ПКК) реализована в среде Mathcad [29]. В ее основе лежат уравнения массового и энергетического балансов, составленные для каждого элемента электростанции в отдельности. Данная модель позволяет проводить моделирование работы силовой установки при различных проектных и эксплуатационных режимах [29].

Важнейшими факторами для исследования ИСКЦ являются производство электроэнергии и эффективность [29]. Производство электроэнергии в ПГУ определяется путем расчета суммы энергии, производимой газовой турбиной N_{GT} и паровой турбиной N_{ST} :

$$N_{net} = N_{GT} + N_{ST}. \quad (1.1)$$

Тепловой КПД эталонной ПГУ в данном исследовании рассчитывается как отношение энергии, производимой генераторами газовой и паровой турбин N_{net} , к тепловой энергии Q_f [29]:

$$\eta_{th} = \frac{N_{net}}{Q_f} = \frac{N_{net}}{m_f \cdot LHV}. \quad (1.2)$$

Сумма электрической энергии генератора газовой турбины N_{GT} и паровой турбины в режиме ИСКЦ N_{ST-sol} рассчитывается по выражению

$$N_{net-sol} = N_{GT} + N_{ST-sol}. \quad (1.3)$$

Тепловой КПД ИСКЦ рассчитывается как отношение производимой энергии к тепловой, вырабатываемой с использованием топлива и солнечного поля $Q_{sol,th}$:

$$\eta_{ISCC} = \frac{N_{net-sol}}{Q_f + Q_{sol,th}} = \frac{N_{net}}{m_f \cdot LHV + Q_{sol,th}}, \quad (1.4)$$

где m_f – массовый расход топлива; LHV – низшая теплота сгорания топлива; $Q_{sol,th}$ – тепло, поглощаемое водой/паром (рассчитывается по [30]).

Однако тепловой КПД не является лучшим параметром для оценки производительности электростанций ИСКЦ, поскольку он уменьшается по мере увеличения вклада Солнца [32]. Топливо, сэкономленное благодаря солнечному вкладу, может быть оценено с использованием отношения HR :

$$HR = \frac{Q_f}{N_{net-sol}} = \frac{N_{net}}{m_f \cdot LHV}. \quad (1.5)$$

Солнечный вклад в ИСКЦ позволяет увеличить энергию, вырабатываемую «эталонным» комбинированным циклом с ископаемым топливом. Поэтому необходимо оценить долю электрической энергии от солнечного источника для сравнения эффективности преобразования солнечной энергии в ИСКЦ [9]. Рассчитываются два инкрементных коэффициента конверсии солнечной энергии в электрическую в рамках ИСКЦ [9]:

$$\eta_{inc.,sol.,rad} = \frac{N_{net-sol} - N_{net-sol}}{Q_{sol,inc}} = \frac{\Delta N_{st-sol}}{DNI \cdot A_{sf}}, \quad (1.6)$$

$$\eta_{inc.,sol.,th} = \frac{N_{net-sol} - N_{net-sol}}{Q_{sol,th}} = \frac{\Delta N_{st-sol}}{Q_{sol,th}}, \quad (1.7)$$

где $Q_{sol,inc}$ – солнечное излучение; $Q_{sol,th}$ – полезное собранное солнечное тепло; ΔN_{st-sol} – увеличение выходной мощности цикла на установке ИСКЦ по сравнению с установкой ПГУ (нетто-солнечное электричество); DNI – прямое нормальное облучение, Вт/м².

Кроме того, рассматривается солнечная фракция, которая определяется как отношение выработки электроэнергии с учетом солнечного тепла к общей выработке электроэнергии ИСКЦ [9]:

$$SF = \frac{\Delta N_{st-sol}}{N_{net-sol}}. \quad (1.8)$$

Эффективность солнечного поля можно сравнить с использованием его теплового КПД [9]:

$$\eta_{sol_field} = \frac{Q_{sol,th}}{DNI \cdot A_{sf}}. \quad (1.9)$$

Поскольку на режим эксплуатации электростанции ИСКЦ значительное влияние оказывают погодные условия, например температура окружающей среды и солнечная радиация, оценка производительности системы производится на почасовой основе. Чтобы упростить процесс расчета и подчеркнуть влияние солнечной радиации на производительность системы, температура окружающей среды устанавливается равной 25°C и остается постоянной при моделировании с постоянной скоростью ветра 5 м/с [9].

Силовая система ИСКЦ работает как газовая турбина комбинированного цикла, когда солнечная энергия недоступна или значение солнечной инсоляции ниже минимального значения для работы солнечного контура.

Для оценки реальных преимуществ системы необходимо знать годовые результаты деятельности ИСКЦ. Для оценки годовой производительности было проведено моделирование на один год. Предполагается, что солнечный коллектор работает в среднем по 11 часов в периоды наличия солнечного излучения в течение всего года. Среднемесячная солнечная тепловая энергия и среднесуточная солнечная тепловая энергия представлены на рисунке 1.9. Максимальная солнечная тепловая энергия, собранная солнечным полем, составляет 809,591 МВт·ч/день в июне, минимальная – 232,3823 МВт·ч/день в декабре [9].

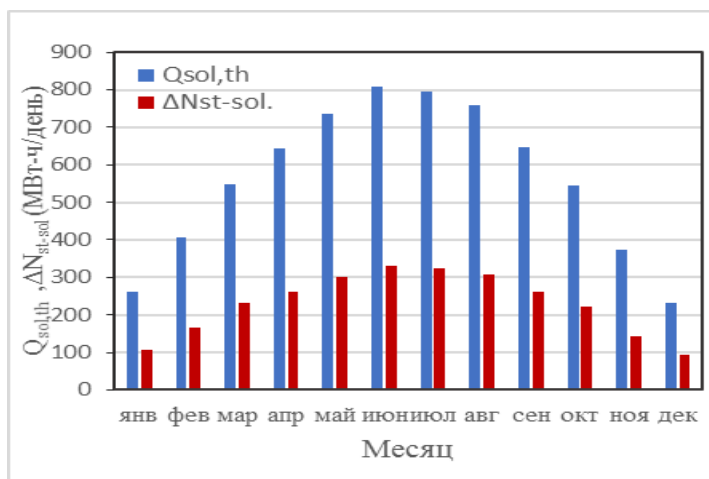


Рисунок 1.9 – Среднемесячная чистая генерируемая солнечная энергия и собранная солнечная тепловая энергия

Авторами [10] было установлено, что первым параметром, который необходимо учитывать при проектировании гибридной электростанции с параллельными установками CSP и биомассы (рисунок 1.4), является мощность, поскольку как экономические, так и энергетические показатели станции чувствительны к масштабным факторам. В общих чертах, более крупные электростанции выигрывают от более высокой энергоэффективности и используют преимущества растущей экономии за счет масштаба. Крупные электростанции испытывают серьезные затруднения при организации надежного и бесперебойного снабжения биомассой, связанные с поддержанием стабильных объемов поставок. Для целей этого анализа была выбрана электростанция мощностью 10 МВт в качестве примера баланса между производительностью электростанции и производства биомассы на базе данного энергетического комплекса. Для электростанции мощностью 10 МВт была выбрана паровая турбина с давлением пара 63 бар.

Для оценки выработки электроэнергии была разработана упрощенная модель. Тепловое производство в солнечном поле было смоделировано с использованием программы Solar Advisor Model (SAM), разработанной Национальной лабораторией возобновляемых источников энергии

Министерства энергетики США. Квазистационарная модель использовалась для расчета выработки солнечного поля на почасовой основе. В зависимости от значений тепловой мощности, производимой для солнечного поля, мощность, требуемая от нагревателей на природном газе и котла на биомассе, была рассчитана для устойчивой выработки в цикле Ренкина 10 МПа. Различия в производительности в течение года зависят от непроизводительных нагрузок и пороговых значений для минимальной работы котла на биомассе и вспомогательных нагревателей, которые указаны на уровне 25% от номинальной работы.

Динамические характеристики различных первичных энергетических ресурсов в данной работе не рассматриваются. Кроме того, работа с полной нагрузкой учитывается для всех часов в году, и потери производительности из-за работы с частичной нагрузкой должны быть включены в будущие модели. В таблице 1.2 описаны системные входные данные, рассмотренные для моделирования.

Почасовой расчет авторами [10] был выполнен для модельного года с $DNI = 2000 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$. Чтобы замкнуть контур и проверить баланс тепла и массы в модели, объемный расход определяется с использованием следующего выражения:

$$V_{HTF} = \frac{Q_{SF} \cdot A_{SCA} \cdot L_{loop} \cdot N_{loop}}{\Delta h_{HTF} \cdot \rho(T_{lm})}, \quad (1.10)$$

где V_{HTF} - объемный расход HTF в солнечном поле; Q_{SF} - тепло, собираемое в солнечном поле, на основе почасовых данных; A_{SCA} - длина отверстия солнечного коллектора, 5,75м; L_{loop} - длина контура, 600 м; N_{loop} - количество контуров, 30; Δh_{HTF} - увеличение энтальпии теплоносителя (HTF); $\rho(T_{lm})$ - плотность HTF при средней логарифмической температуре в солнечном поле.

Таблица 1.2 – Входные значения для моделирования гибридной установки на солнечной энергии и биомассе

Метеорологические данные	
DNI	2000 кВт · ч/м ²
Солнечное поле	
Количество контуров	30
Длина апертуры солнечных коллекторов	5,75 м
Длина контура	600,00 м
Тип коллектора	ET-150
Солнечный приемник	Schott PTR 70
Вспомогательные газовые нагреватели	
Эффективность	88%
Теплотворная способность топлива (природный газ):	10 500 ккал/кг
Котлы на биомассе	
Эффективность	88%
Теплотворная способность топлива (биомасса)	2800 ккал/кг
Теплообменники	
Эффективность	100%
Подача пара в турбину	
Температура	375 °С
Давление	63 бар
Расход при номинальном значении (100%)	44,52 т/ч

Конфигурация поля солнечных коллекторов разделена на несколько контуров, которые представляют собой массивы блоков солнечных коллекторов. Технические подробности можно увидеть в [31]. Длина контура - это оптимальная длина, необходимая для повышения температуры теплоносителя с 292 °С до 392 °С в контуре. Количество циклов было увеличено, чтобы максимизировать выработку солнечного поля и компенсировать снижение производительности цикла Ренкина.

Чтобы упростить моделирование котлов на природном газе, было учтено, что они будут использоваться только летом, когда солнечная энергия вырабатывает большую часть выходной мощности, а потребности в вспомогательных нагревателях для поддержания рабочих температур минимальны. Котлы на биомассе используются так же, как и котлы на природном газе, но поскольку их параметры меняются медленнее, данный котел будет использоваться в периоды пониженного солнечного излучения.

Тепловая энергия, производимая в этих системах, рассчитывается как разница между выработкой солнечной энергии и потребностями в полной нагрузке. Топливо, необходимое для получения энергии, может быть рассчитано при условии производительности 88% для обеих систем в точках полной нагрузки. Потребности во вспомогательном топливе определяются следующим выражением:

$$m_p = \frac{Q_n - Q_c}{\eta_k Q_p^H}, \quad (1.11)$$

где Q_n - полезная теплота, необходимая для производства энергии в номинальном режиме работы установки, ; Q_c - теплота, воспринятая солнечным коллектором; η_k - производительность котла на биотопливе, значение которого установлено на 82,83%; Q_p^H - низшая теплотворная способность биомассы.

Это значение необходимо для оценки расхода топлива, необходимого для нагрева *HTF*, который не может быть нагрет в солнечном поле.

Весь рассматриваемый диапазон производительности основан на балансе пара и описывается по следующей формуле [32]:

$$\eta_R = \frac{E_p}{m(h_2 - h_1)}, \quad (1.12)$$

где E_p - произведенная электроэнергия; m - массовый расход пара в котле; h_2 - энтальпия пара на выходе из котла; h_1 - энтальпия пара на входе в котел; η_R - КПД цикла Ренкина.

Результаты, полученные в результате расчетов, проведенных сотрудниками Мадридского политехнического университета, приведены в таблице 1.3, которые показывают максимальную мощность CSP в летний период (3218 кВт·ч в июле), в течение которого установка на биомассе полностью остановлена. Напротив, доля биомассы достигает более 91% в общей выработке энергии в зимние месяцы, которая будет оставаться относительно стабильной в течение всего года на уровне 5500-7000 кВт·ч.

Таблица 1.3 – Расчетная ежемесячная выработка электроэнергии на основе сжигания биомассы, CSP и природного газа для гибридной установки мощностью 10 МВт

	CSP, кВт·ч	Биомасса, кВт·ч	Природный газ, кВт·ч	Общая выработка, кВт·ч
Январь	434	5811	0	6245
Февраль	711	5061	0	5773
Март	1963	4806	0	6769
Апрель	1942	4629	0	6571
Май	2604	4417	0	7021
Июнь	3064	1750	1485	6299
Июль	3218	0	2415	5634
Август	2927	0	2558	5485
Сентябрь	2120	4514	0	6634
Октябрь	1109	5409	0	6519
Ноябрь	391	5630	0	6021
Декабрь	95	2869	0	2964
Годовой показатель	20579	44897	6459	71934

В работе [2] представлена математическая модель гибридной системы, состоящей из ветряных установок и установок на биомассе в соответствии с рисунком 1.7, с номинальными мощностями P_e и P_b , соответственно. Доля компенсируемой мощности f определяется соотношением:

$$f = \frac{P_c}{P_e} = \frac{\Delta P_b}{P_e}, \quad (1.13)$$

где P_c - мощность компенсации, обусловленной избыточной мощностью электростанции на биомассе, ΔP_b .

Связь доли f с мощностью биомассовой установки выражается уравнением:

$$f = \frac{r_g \cdot P_b}{P_e}. \quad (1.14)$$

где r_g - коэффициент увеличения мощности газификатора, задается производителем; рекомендуемый диапазон значений – 0,2–0,3.

При снижении мощности сверх возможностей газификатора требуется дополнительный газ для двигателя внутреннего сгорания. Объем запаса газа определяется балансом времени компенсации t_c и времени пополнения t_r согласно уравнению:

$$t_c - t_r = 24, \quad (1.15)$$

где время измеряется в часах.

Расход газа для второго двигателя и поток от газификатора описываются уравнениями (1.16) и (1.17) соответственно.

$$\varphi_m = q \cdot f \cdot P_e, \quad (1.16)$$

$$\varphi_g = q \cdot r_g \cdot P_b, \quad (1.17)$$

где q - энергетический эквивалент газа, используемого двигателем, который принят равным 2000 кВт·ч, что соответствует теплотворной способности (ННВ) 5 МДж/м³ при КПД двигателя 36 %. [33, 34].

Если прямой компенсации недостаточно ($f \cdot P_e > r_g \cdot P_b$), объем газа из хранилища рассчитывается по уравнению (1.18), а требуемый объем хранилища – по (1.19).

$$\varphi_g = q \cdot (f \cdot P_e - r_g \cdot P_b), \quad (1.18)$$

$$V_c = q \cdot (f \cdot P_e - r_g \cdot P_b), \quad (1.19)$$

При этом нецелесообразно увеличивать объем хранилища, восполняемый в некомпенсационный период. Модернизация газификатора позволяет оптимизировать подачу газа. Расчет необходимого объема газа рассчитывается по формуле:

$$V_r = \varphi_g \cdot t_r = q \cdot r_g \cdot P_b \cdot t_r, \quad (1.20)$$

Минимальный объем хранилища выводится из подстановки выражений (1.19) и (1.20) в (1.15) и представлен уравнением:

$$V_{lim} = \frac{24 \cdot q \cdot r_g \cdot P_b \cdot (f \cdot P_e - r_g \cdot P_b)}{f \cdot P_e}. \quad (1.21)$$

Контур объема соответствует точкам пересечения кривых V_r и V_c при суммарном времени 24 часа. Дополнительное соотношение (1.22) следует из (1.19) и (1.21).

$$f \cdot P_e \cdot t_c = 24 \cdot r_g \cdot P_b, \quad (1.22)$$

$$\text{если } P_b \leq f \cdot \frac{P_e}{r_g}$$

Уравнения (1.20) и (1.21) являются ключевыми для проектирования компенсационной ветви системы. Третий элемент – двигатель внутреннего сгорания для компенсации – рассчитывается исходя из максимальной доли f , определяемой распределением вероятностей снижения ветровой мощности. Его номинальная мощность ΔP_m связана с максимальной компенсационной нагрузкой уравнением:

$$\Delta P_m = f_{\max} \cdot P_e. \quad (1.23)$$

Таким образом, тройной коэффициент компенсации, определяемый как произведение доли энергии, вырабатываемой ветропарком, подлежащей компенсации, на номинальную мощность парка, умноженную на количество компенсационных часов, зависит от характеристик установки на биомассе (мощность и избыточные размеры) и представляет собой компромисс между размером ветропарка и параметрами биомассовой установки.

Выводы по первой главе

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.

На практике реализованы схемы гибридной электростанции с использованием солнечной энергии и биомассы и проведены расчеты отдельных аппаратов, а комплексный метод оценки эффективности электростанции пока не разработан. Он должен быть основан на математическом моделировании технологической схемы на основе системного подхода с описанием основных процессов, происходящих в ее элементах. В связи с чем целью настоящей работы является повышение эффективности сельскохозяйственного энергетического комплекса за счет автономных гибридных электростанций, работающих с использованием солнечной энергии и биомассы.

Для достижения данной цели поставлены 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 внешних условий.

В качестве объекта исследования выбирается энергетический комплекс, включающий гибридную автономную электростанцию, работающую на доступных возобновляемых энергетических ресурсах солнечной энергии и биомассе – растительных отходах сельскохозяйственного производства.

ГЛАВА II. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

2.1. Источники и объемы образования биотоплива

Биомасса является одной из форм возобновляемых источников и может быть преобразована в твердое, жидкое и газообразное энергетическое топливо, и на основе которого может быть произведена тепловая и электрическая энергии.

В качестве твердой биомассы используют возобновляемое сырье биологического происхождения, не относящееся к ископаемым ресурсам. Значительную часть такой биомассы составляют растительные отходы: солома, пожнивные и иные остатки (включая стебли зерновых, технических культур, подсолнечника, льняную костру, стержни початков кукурузы, ботву картофеля и бобовых), а также побочные продукты заготовки кормов (отходы сенажа и силоса). Существенный ресурс дают отходы животноводства (навоз КРС, свиней, птицы). К числу подходящих видов сырья также относят древесные остатки от лесозаготовки и переработки древесины и другие типы биоматериала [35].

В мире ежегодно образуется огромное количество органических отходов, природная ассимиляция которых невозможна без человеческого вмешательства. Развитие технологий позволяет использовать переработанные органические отходы для производства энергии.

В рамках настоящего исследования в качестве сырьевой базы для биоэнергетики были выбраны отходы агропромышленного комплекса, а именно побочные продукты растениеводства [15]. Ресурсами биоэнергетики являются фактические объемы твердой биомассы, доступные для переработки с получением энергии. Энергетический потенциал биомассы характеризуют двумя величинами. Валовой потенциал соответствует полному объему энергии, содержащейся в биомассе. Технический потенциал

определяет, сколько энергии реально можно выработать из доступного ресурса с учетом возможностей текущего технологического уровня [36].

Методика оценки биоэнергетического потенциала (валового и технического) основана на последовательной проработке ряда универсальных этапов, которые могут быть применимы вне зависимости от специфики рассматриваемых биоресурсов.

На первом этапе выявляют возможные источники биомассы и количественно оценивают объемы ее формирования либо выработки, которые можно использовать в энергетическом цикле.

Второй этап предполагает расчет реально доступной доли биомассы. Здесь учитывают комплекс природно-климатических, ландшафтных, социально-экономических ограничивающих факторов и определяют, какая часть образующихся отходов сельхозпроизводства фактически может быть направлена на энергетические нужды.

На третьем этапе рассчитывают энергетическую ценность выделенной доли биомассы, то есть определяют ее энергосодержание.

Завершающий, четвертый этап сводится к оценке выхода полезной энергии или топлива: рассчитывают, сколько тепловой или электрической энергии либо какого объема энергоносителя реально можно получить с учетом текущего уровня технологий, а также действующих экологических и прочих нормативных ограничений.

Масса ежегодно образующихся органических отходов M_i рассчитывается с использованием статистических данных годового урожая растительных культур N_i на основе экспериментально определенных норм образования отходов (например, соотношения отходов и полезной части растения) L_i :

$$M_i = N_i \cdot L_i, \quad (2.1)$$

здесь i – вид растительных культур.

Расчет валового энергетического потенциала отходов (Q_i) сводится к определению произведения массы отходов M_i и удельного энергосодержания материала (K_i) [36]:

$$Q_i = M_i \cdot K_i. \quad (2.2)$$

Тогда суммарный валовый биоэнергетический потенциал рассматриваемой территории, учитывающий все виды органических отходов сельскохозяйственного производства (обозначены индексом i), определяется как:

$$Q = \sum_{i=1}^n M_i \cdot K_i. \quad (2.3)$$

Коэффициенты соотношения полезной части и отходов по культурам и удельное энергосодержание отходов приведены в таблице 2.1 [37].

Таблица 2.1 – Коэффициенты для расчета массы отходов растениеводства и их энергосодержания

Вид исходной биомассы	Соотношение отходов и полезной части растения, кг/кг	Удельное энергосодержание отходов, ккал/кг
Зерновые культуры: - солома - шелуха	1 0,1	3500 (для сухой соломы) 3250
Подсолнечник на зерно: - стебли - лузга	3,5 0,18	3200 3750

Алгоритм расчетов оценки объемов отходов сельскохозяйственной продукции и их энергосодержания включает последовательное определение следующих величин [38]:

- основные сельскохозяйственные культуры региона и площади под ними;
- урожайность сельскохозяйственных культур (пшеница, рожь, ячмень, овес, кукуруза, рис, рапс, подсолнечник и др.);
- отношение пожнивных остатков к урожайности;
- энергосодержание отходов в зависимости от вида культуры;
- скорость и объем удаления пожнивных остатков, регламентируемые с учетом природоохранных норм и требований к поддержанию плодородия почв;
- доля растительных остатков используемая в качестве подстилки для животных (КРС, лошади, овцы), в выращивании грибов и в иных промышленных отраслях.

В данной работе при оценке потенциала биоэнергетики в качестве ресурсов рассматривались органические отходы однолетних пропашных культур (соломы, лузги подсолнечника и шелухи овса), образующиеся на территории Республики Татарстан [39, 40]. Численные результаты исследования суммарного валового биоэнергетического потенциала муниципальных районов Республики Татарстан представлены на рисунках 2.1 и 2.2.

Таким образом наибольшее количество как по массе, так и по энергетическому содержанию составляет солома. Наибольшее ее количество образуется в Буинском, Спасском и Дрожжановском районах. Общая масса соломы составляет по Республике Татарстан 1 989,21 тыс. тонн, а энергетический потенциал – 29 149,54 ГДж. Вторым по значимости ресурсом являются стебли подсолнечника, которые в большем количестве образуются в Спасском, Муслумовском и Чистопольском районах и имеют массовый и

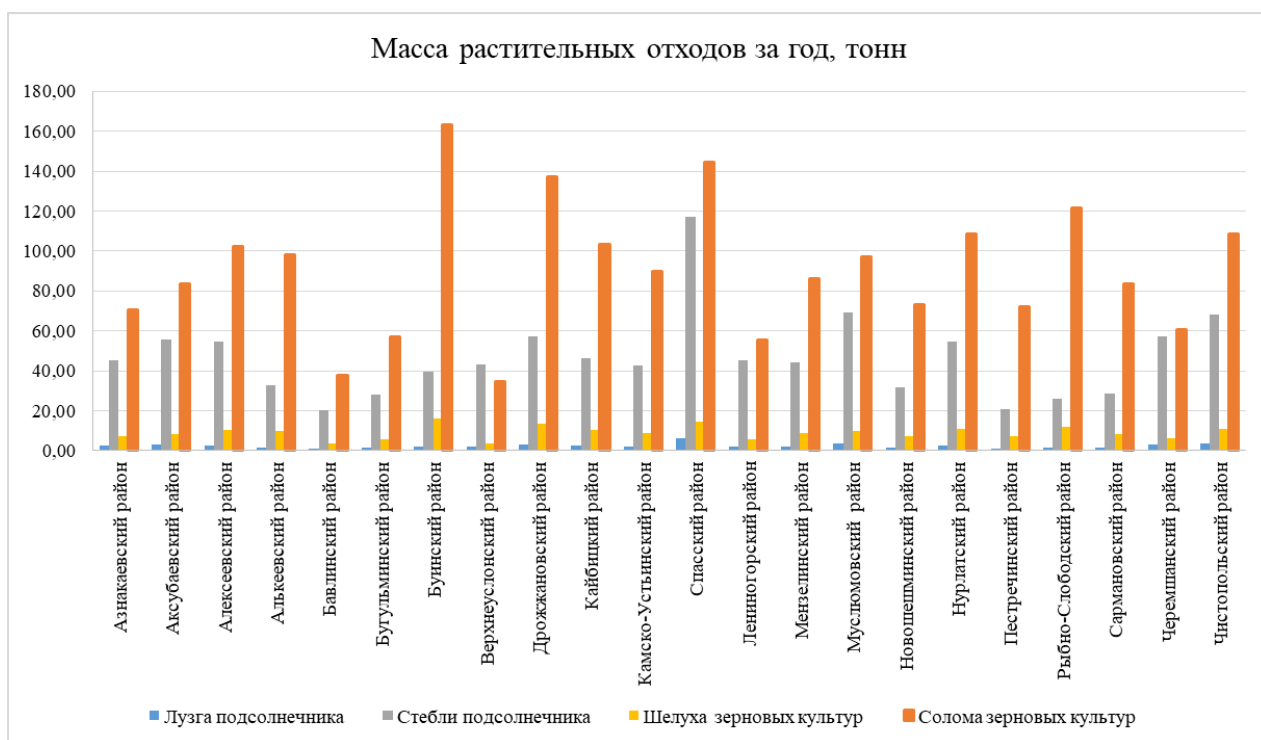


Рисунок 2.1 – Масса растительных отходов, образующихся в течение года на сельских хозяйствах всех категорий



Рисунок 2.2 – Валовый энергетический потенциал растительных отходов, образующихся в течение года на сельских хозяйствах всех категорий

энергетический потенциал соответственно 1 029,93 тыс. тонн и 137 798,8 ГДж. Вторым по значимости ресурсом являются стебли подсолнечника, которые в большем количестве образуются в Спасском, Муслюмовском и Чистопольском районах и имеют массовый и энергетический потенциал соответственно 1 029,93 тыс. тонн и 137 798,8 ГДж. Шелуха зерновых культур (Буинский, Спасский и Дрожжановский районы, суммарный массовый и энергетический потенциалы соответственно 198,92 тыс. тонн и 699,41 ГДж) и лузга подсолнечника (Спасский, Муслюмовский и Чистопольский районы, суммарный массовый и энергетический потенциалы соответственно 52,97 тыс. тонн и 831,62 ГДж) имеют гораздо меньший суммарный энергетический потенциал, но также могут быть использованы в качестве энергетического ресурса.

2.2. Исследование состава и энергетических характеристик растительных отходов

Использование растительной биомассы в чистом виде затруднено ее большим объемом при малом весе. Наиболее эффективным способом подготовки растительной биомассы к использованию в качестве топлива в котлах является создание искусственных структурированных комплексов блоков, брикетов, гранул (пеллет) для последующего сжигания.

При утилизации растительной биомассы необходима подготовка по влажности и фракционному составу. В состав сырьевой смеси для придания гранулам направленно-заданных свойств могут вводиться специально подготовленные горючие компоненты, отвечающие следующим требованиям: пропорции компонентов должны обеспечить заданные прочность и влагоустойчивость, а также экономичность производства; смесь должна обладать хорошей формуемостью [41].

Топливные гранулы - экологически чистое топливо из растительных отходов. В составе гранул отсутствуют токсичные компоненты и

посторонние примеси. В результате переработки исходного сырья в гранулированную форму его объем существенно сокращается, что дает возможность многократно уменьшить затраты, связанные с хранением и перевозкой продукции. В основе технологии производства топливных гранул лежит процесс прессования растительного биотоплива (растительных отходов сельского хозяйства, опилок) под высоким давлением при нагревании с добавлением связующего вещества.

Одним из самых распространенных связующих веществ является лигнин, содержащийся в клетках растений. В качестве связующего вещества так же могут быть использованы отходы сахаропроизводства в виде свекловичной мелассы.

Лигнин представляет собой аморфный ароматический полимер сложной структуры, в котором содержание углерода выше, а кислорода – ниже по сравнению с целлюлозой. Доля лигнина в биомассе растений достигает 30%, что делает его вторым по распространенности природным биополимером, уступающим лишь целлюлозе [42].

В промышленных условиях лигнин выделяют из древесины и иных растительных материалов в ходе сульфатной и сульфитной варок целлюлозы. Сульфатный способ варки преобладает в производстве целлюлозы, однако сфера применения сульфатного лигнина пока остается ограниченной [43]. В процессе сульфатной варки лигнин извлекают из черного щелока путем осаждения с использованием серной кислоты либо диоксида углерода. В высушенном состоянии сульфатный лигнин представляет собой порошкообразный материал коричневого оттенка. Он обладает способностью растворяться в щелочных водных средах, а также в ряде органических растворителей – ацетоне, диоксане, диметилсульфоксиде, пиридине, этиленгликоле и других. Характеристика состава сульфатного лигнина: зольный остаток – 1,0-2,5%; кислоты (в пересчете на серную) – 0,1-0,3%; водорастворимые соединения – 9-11%; смолистые компоненты – 0,3-0,4%; лигнин Класона – 85%. Часть получаемого сульфатного лигнина

утилизируется в энергетических установках на целлюлозных предприятиях [43]. Плотность лигнина находится в диапазоне 1,25–1,45 г/см³.

Меласса – побочный продукт свеклосахарного производства, представляющий собой вязкую сиропообразную массу коричневого или темно-бурого цвета с характерным ароматом жженой карамели [44]. В настоящее время на российских сахарных заводах образуются значительные объемы мелассы, которые зачастую не находят дальнейшего применения. Тем не менее этот продукт обладает высокой ценностью и может служить сырьем для получения хлебопекарных дрожжей, глицерина, ацетона, а также пищевых аминокислот [45, 46].

Меласса содержит 58-60% сахарозы, минеральные вещества и органические несахара (углеводы и продуктов распада белков), также обладает богатым составом различных аминокислот (таблица 2.2) [47]. Плотность мелассы 1,445 г/см³. Зольность составляет 9-10%. Усредненный состав золы мелассы приведен в таблице 2.3 [48].

Таблица 2.2 – Аминокислотный состав мелассы

Аминокислота	Содержание, % к массе мелассы	Аминокислота	Содержание, % к массе мелассы
Тирозин	0,8–0,9	Аспаргиновая кислота	0,2–0,5
Аланин	0,5–2,3	Аргинин + гистидин + лизин	Следы – 0,7
Треонин + глицин	0,2–0,9	Валин + метионин + триптофан	0,4–1,3
Глутаминовая кислота	0,6–1,8	Лейцин + изолейцин	0,6–2,9
Серин	0,7–2,5	-	-

В большинстве случаев мелассу применяют как добавку к комбикорму, а также используют в качестве корма скоту. [49]. Однако благодаря высокой вязкости меласса обладает сильным связывающим действием, поэтому ее

можно использовать в качестве связующего вещества при гранулировании топлива. При этом нет необходимости в предварительном высокотемпературном разогреве мелассы, нет выделений вредных веществ, не возникает трудностей с дозированием или транспортированием. При содержании мелассы 10-20% от гранулируемой массы получают механически прочные, водостойкие и термостойкие гранулы [49].

Таблица 2.3 – Химический состав золы мелассы, вес. % [50]

K_2O	N_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	CO_3	Прочие оксиды
76,4	11,2	3,5	0,5	3,7	0,2	4,5

Увеличение содержания связующего значительно влияет на механические характеристики получаемых гранул. Повышение содержания связующего в шихте с 10 до 20 мас. % способствует резкому увеличению прочности гранул, полученных при оптимальных технологических режимах. Далее, при расходе связующего более 20% прочность при сжатии начинает падать, что, возможно, объясняется пристенным эффектом, то есть образованием пленки на поверхности образца, которая препятствует процессу окисления связующего в объеме изделия. Данное обстоятельство влияет не только на прочность гранул, но и определяет оптимальный расход связующего [50].

Исследование характеристик растительных сельскохозяйственных отходов выполнено на базе травяной биомассы с травянистым (недревесным) стеблем, жизненный цикл которых завершается в конце вегетации.

Разработанные методы оценки характеристик универсальны и применимы к различным типам биосырья: древесине (как твердых, так и мягких пород), травяным видам (просо прутьевидное, леспедеца заостренная), отходам сельхозпроизводства (солома пшеницы, стебли и початки кукурузы, багасса), макулатурным материалам (картон, офисная и

газетная бумага), химически модифицированной биомассе (обработанной кислотами и щелочами), а также к твердой фракции отходов бродильных процессов.

В данной работе проведены исследования характеристик соломы зерновых, шелухи овса и шелухи подсолнуха в чистом виде, а также исследованы характеристики топливных гранул из указанных растительных отходов с добавлением связующего вещества (мелассы). Для этой цели использовались следующие нормативные методы [51].

1. Метод определения рабочей влаги твердого биотоплива высушиванием (ГОСТ 32975.2-2014 (EN 14774-2:2009)) [52].

Для определения содержания влаги пробу биотоплива подвергают сушке в воздушной атмосфере при температуре $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$, продолжая процесс до тех пор, пока масса образца не станет постоянной. На основании зафиксированной потери массы вычисляют процентное содержание общей влаги в материале [52].

Для проведения испытания используется следующая аппаратура:

- сушильный шкаф с электронагревом и терморегулятором, обеспечивающий устойчивую температуру нагрева $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$. оборудованный устройством для подачи воздуха со скоростью от 3 до 5 рабочих объемов печи в час. Скорость потока воздуха должна быть такой, чтобы частицы пробы не улетали с лотка;

- контейнер из фарфора, поверхность которого должна быть чистой и гладкой, чтобы возможность адсорбции/абсорбции влаги была сведена к минимуму;

- весы лабораторные по ГОСТ OIML R 76-1 с пределом допускаемой погрешности ± 0.1 мг;

Подготовка аналитической пробы биотоплива с размером частиц 1 мм и менее осуществляется по ГОСТ 33255-2015. Перед началом определения аналитическую пробу тщательно перемешивают механическим способом.

Испытание проводят параллельно не менее чем в двух навесках [52].

Пустые чистые контейнеры с крышками высушивают при температуре $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$ до постоянной массы и охлаждают до комнатной температуры и взвешивают.

Во взвешенный пустой чистый контейнер для высушивания переносят пробу не менее 200 г, распределяют ее ровным слоем по дну и взвешивают контейнер с навеской и крышкой.

Контейнер с пробой взвешивают и помещают в сушильный шкаф, нагретый до $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Нагрев продолжают до достижения постоянной массы контейнера с пробой. Общая продолжительность высушивания обычно составляет не более 15 ч [52].

Из-за способности высушенных твердых биотоплив поглощать влагу из окружающей среды регламентировано быстрое взвешивание пробы: массу контейнера фиксируют в первые 10–15 секунд после его извлечения из сушильного шкафа, до остывания. Такой подход предотвращает дополнительную сорбцию влаги и обеспечивает достоверность измерений [52].

Массовую долю общей влаги биотоплива, находящегося в рабочем состоянии, W_t^r , %, рассчитывают по следующей формуле [52]:

$$W_t^r = \frac{(m_2 - m_3) + m_4}{(m_2 - m_1) + m_4} \quad (2.4)$$

где m_1 - масса пустого контейнера для высушивания, г; m_2 - масса контейнера с пробой до высушивания, г; m_3 - масса контейнера с пробой после высушивания, г; m_4 - масса влаги, собранной с упаковки, г.

В качестве результата анализа используют среднее значение, полученное по двум параллельным определениям. Расчет ведут с точностью до 0,01 %, далее показатель округляют в соответствии с требованиями методики – до 0,1 % [52].

Результаты определения рабочей влаги твердого биотоплива в чистом виде и в виде гранул с добавлением связующего вещества представлены в таблице 2.4. В качестве связующего использовалась свекловичная меласса в концентрации 1:3.

На рисунках 2.3-2.5 представлены топливные гранулы из разных сортов твердого биотоплива после высушивания.



Рисунок 2.3 – Гранула
из соломы



Рисунок 2.4 – Гранула
из шелухи овса



Рисунок 2.5 – Гранула
из шелухи
подсолнечника

Таблица 2.4 – Рабочая влага твердого биотоплива

Вид твердого биотоплива	W_t^r , %
Солома	16,5
Шелуха овса	17,0
Лузга подсолнечника	15,8
Гранула из соломы	25,06
Гранула из шелухи овса	25,54
Гранула из лузги подсолнечника	29,08

Анализ полученных результатов показывает, что гранулы имеют меньшее значение влажности по сравнению с исходным веществом, что можно объяснить содержанием связующего вещества в гранулах.

2. Метод определения зольности твердого биотоплива (ГОСТ 32988 – 2014 (EN 14775:2009)) [53].

Зольность позволяет оценить долю минеральных и иных неорганических веществ, присутствующих в биомассе. Данный параметр, совместно с прочими количественными характеристиками, применяют при описании вещественного состава исследуемых проб [53].

Для проведения испытания используется следующая аппаратура:

- тигли для сжигания из кварца такого размера, чтобы толщина слоя равномерно распределенной в них навески топлива не превышала $0,1 \text{ г/см}^2$;
- муфельная печь, обеспечивающая зону постоянной температуры и скорость нагрева в соответствии с требованиями Стандарта;
- весы лабораторные по ГОСТ OIML R 76-1 с пределом допускаемой погрешности $\pm 0,1 \text{ мг}$;
- эксикатор с осушителем.

Для определения зольности используют аналитическую пробу биотоплива, измельченную до размера частиц 1 мм и менее, подготовленную в соответствии с ГОСТ 33255-2015.

Испытания проводят минимум на двух навесках.

Тигель прокаливают в муфельной печи (550 ± 10) не менее 60 мин, затем охлаждают: 5–10 мин на термостойкой пластине и в эксикаторе без осушителя – до комнатной температуры, после чего взвешивают [53].

Перед началом определения зольности аналитическую пробу пробы массой не менее 1 г тщательно перемешивают и помещают на дно тигля, распределяя ее ровным слоем [53]. Взвешивают тигель с навеской. Порция пробы должна быть предварительно высушена в соответствии с ГОСТ 32975.3-2014 (EN 14774-3:2009).

Тигель с навеской помещают в холодную муфельную печь. Затем нагревают печь следующим образом [53]:

- на первом этапе температуру плавно доводят до $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30–50 минут, что соответствует скорости нагрева в диапазоне $4,5\text{--}7,5 \text{ }^{\circ}\text{C/мин}$. Достигнутый уровень температуры выдерживают на протяжении 60 минут для полного удаления летучих компонентов из образца;

- на втором этапе продолжают равномерное повышение температуры до значения $(550 \pm 10) ^\circ\text{C}$ в течение 30 минут, что соответствует скорости нагрева около $10 ^\circ\text{C}/\text{мин}$). Температурный режим на этом уровне сохраняют не менее 120 минут.

Тигель с образовавшимся зольным остатком извлекают из печи. Охлаждение проводят в два этапа: сначала тигель выдерживают на подложке из термостойкого материала в течение 5-10 минут, затем переносят в эксикатор без осушающего агента и оставляют до достижения комнатной температуры. После этого выполняют взвешивание тигля [53].

При визуальном осмотре золы видно, что сажа не образуется.

Зольность из сухой пробы A^d (%) рассчитывают по формуле

$$A^d = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - W^a} \quad (2.5)$$

где m_1 - масса пустого тигля, г; m_2 - масса тигля с навеской пробы, г; m_3 - масса тигля с зольным остатком, г; W^a - массовая доля влаги в аналитической пробе, %, которая определяется по ГОСТ 32975.3- 2014 (EN 14774-3:2009).

Методика предусматривает вычисление результатов испытаний с точностью 0,01 % с последующим округлением до 0,1 %. В качестве окончательного результата используют среднее арифметическое значение, полученное по двум параллельным определениям [53].

На рисунках 2.6-2.8 представлены образовавшаяся зола после сжигания топливных гранул из разных сортов твердого биотоплива.



Рисунок 2.6 – Зольный остаток гранулы из соломы



Рисунок 2.7 – Зольный остаток гранулы из шелухи овса



Рисунок 2.8 – Зольный остаток гранулы из шелухи подсолнечника

Результаты определения зольности твердого биотоплива представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Зольность твердого биотоплива

Вид твердого биотоплива	A^d , %
Солома	3,83
Шелуха овса	5,56
Лузга подсолнечника	3,83
Гранула из соломы	5,83
Гранула из шелухи овса	7,65
Гранула из лузги подсолнечника	8,28

Для всех исследованных видов биомассы зольность гранул возросла по сравнению с зольностью исходных веществ, что объясняется наличием минеральной негорючей части в связующем веществе.

3. Метод определения выхода летучих веществ твердого биотоплива (ГОСТ 32990-2014 (EN 15148:2009)) [54].

Выход летучих веществ находят как потерю массы навески при нагревании биотоплива без доступа воздуха (в стандартных условиях) за вычетом потерь, обусловленных влажностью топлива [54].

Для проведения испытания используется следующая аппаратура:

- муфельная печь с электрообогревом, с зоной постоянной температуры $(900 \pm 10) ^\circ\text{C}$;
- цилиндрический тигель из кварцевого стекла (внутренний диаметр тиглей 22 мм) с хорошо подогнанной крышкой (диаметр основания крышки 21 мм);
- весы лабораторные по ГОСТ OIML R 76-1 с пределом допускаемой погрешности $\pm 0,1$ мг.

Муфельную печь с постоянно установленной зачехленной термопарой нагревают до $(900 \pm 10) ^\circ\text{C}$. Подставку с пустыми закрытыми тиглями размещают в зоне печи, где температура поддерживается постоянной [54].

Анализ выполняют на аналитической пробе биотоплива (крупность частиц должна быть не более 1 мм), подготовка которой соответствует ГОСТ 33255-2015. Перед проведением определения пробу перемешивают, после чего доводят до воздушно-сухого или сухого состояния по ГОСТ 32975.3-2014.

Определение массовой доли влаги в пробе проводят одновременно с основным испытанием по ГОСТ 32975.3-2014.

Подставку с пустыми тиглями (с крышками) помещают в муфельную печь, разогретую до $(900 \pm 10) ^\circ\text{C}$, и выдерживают 7 мин ± 5 с. Затем подставку извлекают из печи; тигли охлаждают сначала на воздухе на термостойкой пластине, затем в эксикаторе до температуры окружающей среды.

Взвешивают остывший пустой тигель с крышкой, помещают в него навеску пробы биотоплива массой $(1,0 \pm 0,1)$ г, закрывают крышкой и снова взвешивают. Для всех взвешиваний применяют весы с пределом допускаемой погрешности $\pm 0,1$ мг. Равномерность слоя навески на дне тигля достигается легким постукиванием тигля о чистую твердую поверхность [54].

Тигель (тигли) с навеской, закрытый крышкой, помещают на холодную подставку, затем переносят в муфельную печь, закрывают дверцу печи и оставляют на 7 мин ± 5 с [54].

После выдержки в печи подставку с тиглями вынимают и охлаждают в регламентированном порядке. Сначала тигли выдерживают на термостойкой пластине, пока их температура не снизится до уровня на 30–50 °С выше комнатной. Затем переносят в эксикатор и продолжают охлаждение до комнатной температуры, что позволяет минимизировать риск поглощения влаги и искажения результатов [54].

Остывший тигель (тигли) взвешивают.

Выход летучих веществ из сухой пробы V^d , %, вычисляют по формуле

$$V^d = \left[\frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - W^a \right] \left(\frac{100}{100 - W^a} \right), \quad (2.6)$$

где m_1 - масса пустого тигля с крышкой, г; m_2 - масса тигля с крышкой и навеской пробы до нагревания, г; m_3 - масса тигля с крышкой и нелетучим остатком после нагревания, г; W^a - массовая доля влаги в аналитической пробе, определяемая по ГОСТ 32975.3, %.

Итоговый результат испытания устанавливают как среднее арифметическое двух параллельных определений [54]. Промежуточные значения рассчитывают с точностью до 0,01 %, а окончательное значение округляют до 0,1 %. Все полученные результаты приводят к сухому состоянию топлива [54].

Результаты определения выхода летучих твердого биотоплива представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Выход летучих твердого биотоплива

Вид твердого биотоплива	V^d , %
Солома	77,5
Шелуха овса	78,4
Лузга подсолнечника	73,5
Гранула из соломы	62,11
Гранула из шелухи овса	66,63
Гранула из лузги подсолнечника	67,46

Выход летучих для всех исследованных видов гранул биотоплива ниже, чем для исходного вещества, что можно объяснить воздействием связующего, имеющего меньший выход летучих.

4. Определение теплотворной способности биотопливных гранул.

Теплотворная способность твердого топлива по его элементарному составу определяется по формуле Д. И. Менделеева [55]. Она позволяет приблизительно определить низшую теплотворную способность (Q_H), которая учитывает тепло, выделяющееся при полном сгорании топлива, без учета теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания.

При расчете теплотворной способности по формуле Менделеева сумма процентного состава элементов должна равняться 100 %.

Полный баланс рабочей массы топлива:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%, \quad (2.7)$$

где C^p – содержание углерода в рабочем топливе, %; H^p – содержание водорода в рабочем топливе, %; O^p – содержание кислорода в рабочем топливе, %; S^p – содержание общей серы в рабочем топливе, %; N^p – содержание азота в рабочем топливе, %; A^p – зольность топлива, %; W^p – содержание влаги в рабочем топливе, %.

Для твердого и жидкого топлива низшая теплотворная способность рассчитывается по формуле:

$$Q_H^p = 339C^p + 1025H^p - 109(O^p - S_L^p) - 25W^p. \quad (2.8)$$

В первой главе был рассмотрен элементарный состав биомассы (лузги подсолнечника, соломы, стеблей кукурузы, древесины) и гранулированного биотоплива с добавлением мелассы. В соответствии с проведенными исследованиями по определению рабочей влажности проведен расчет низшей теплотворной способности указанной биомассы. Результаты расчета приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Теплофизические характеристики биотопливных гранул

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
Теплота сгорания, Q_H^p , МДж/кг	11,15	10,69	11,09

Гранулы из лузги подсолнечника обладают наибольшей теплотворной способностью (11,15 МДж/кг). Для повышения энергетической ценности требуется предварительная сушка, так как гранулы из лузги подсолнечника имеют высокую влажность и зольность. Гранулы из шелухи овса имеют наименьшую теплотворность (10,69 МДж/кг) из-за повышенного содержания зольности и пониженного содержания углерода. Гранулы из соломы имеют

низкую зольность и влажность, что обеспечивает высокую теплотворную способность (11,09 МДж/кг).

Выбор вида биомассы зависит не только от содержания горючих элементов сырья, но и от уровня влажности и зольности, которые напрямую влияют на теплотворную способность топлива. Снижение этих показателей даже при неизменном содержании горючих элементов позволяет повысить энергетическую эффективность топлива.

2.3 Механические свойства топливных гранул из лузги подсолнечника

Биоэнергетика демонстрирует значительный потенциал в решении энергетических задач. Однако эффективное использование растительных отходов в качестве топлива требует их предварительной переработки в удобные для транспортировки и хранения формы. Производство топливных гранул и брикетов представляет собой оптимальное решение данной проблемы, однако их широкое применение ограничено недостаточной изученностью механических характеристик [36, 56].

На рисунке 2.9 представлен участок схемы топливоподготовки, где готовые биотопливные гранулы подвергаются максимальным механическим воздействиям, таким как вертикальные напряжения при хранении гранул в бункере, удары при падении гранулы из бункера на регулятор дальности заброса на колосниковую решетку, вибрационные нагрузки от привода, неровности пути и стыков колосников [57].

Рассмотрим главные факторы, влияющие на прочность гранулы.

Влажность сырья. Высокая влажность делает гранулу мягкой и снижает ее прочность. Перед прессованием лузгу часто подсушивают до уровня влажности 8-12%.

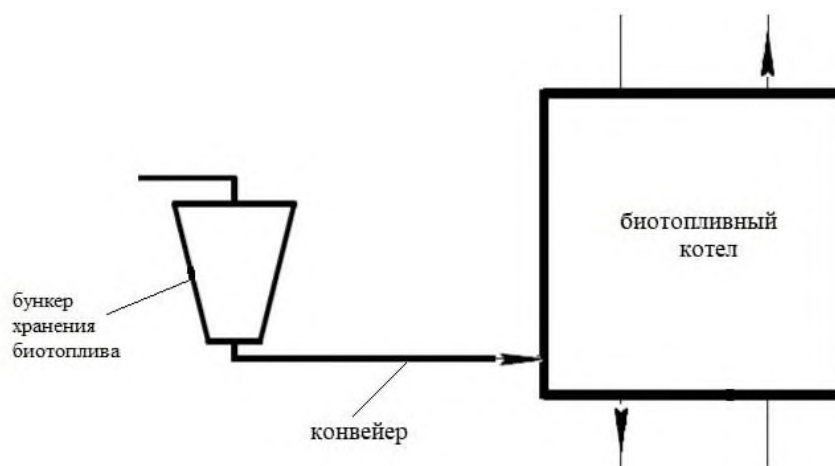


Рисунок 2.9 – Схема топливоподготовки

Давление и температура прессования. Чем выше давление в грануляторе (экструдере), тем плотнее и прочнее получается гранула. Температура также влияет на плавление легкоплавких компонентов и спекание.

Размер частиц лузги. Более мелкий помол позволяет получить более плотную и однородную структуру гранулы, что повышает ее прочность.

Время хранения (созревания). После производства гранула может немного набирать прочность за счет окончательного формирования связей и высыхания.

Для обеспечения целостности гранул на всем пути от бункера хранения до котла, необходимо провести последовательную оценку всех механических воздействий.

Оценка вертикальных напряжений $\sigma_v(z)$ при хранении гранул важна для предотвращения их разрушения, так как именно они вызывают уплотнение и деформацию нижних слоев. Методология расчета, основанная на теории сыпучих сред и формуле Янссена, была разработана для расчета давлений в контейнерах с учетом трения о стенки [36, 58].

$$\sigma_v(z) = \frac{\rho_{\text{насыпн}} \cdot g \cdot D}{(4 \cdot \mu \cdot K)} \left[1 - \exp\left(\frac{-4 \cdot \mu \cdot K \cdot z}{D}\right) \right], \quad (2.9)$$

где D – эквивалентный диаметр контейнера; μ – коэффициент трения по стенке; K – коэффициент бокового давления; z – глубина контейнера; $\rho_{\text{насыпн}}$ – насыпная плотность с учетом пустот, g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$).

Рассчитанное вертикальное напряжение σ_v должно быть меньше предела прочности на сжатие гранулы σ_{crush} с запасом прочности. Обычно коэффициент запаса прочности выбирается в диапазоне от 1,5 до 3 и более, чтобы учесть следующие факторы: динамические нагрузки при загрузке; неоднородность материала; погрешности в определении параметров; дополнительные напряжения от вибраций.

Плотность наполнения контейнера топливными гранулами рассчитывается в следующей последовательности.

1. Объем одной гранулы ($V_{\text{гранулы}}$), м^3 :

$$V_{\text{гранулы}} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h, \quad (2.10)$$

где d – диаметр топливной гранулы, м; h – длина топливной гранулы, м.

2. Плотность материала гранулы ($\rho_{\text{матер}}$), кг/м^3 :

$$\rho_{\text{матер}} = \frac{m}{V_{\text{гранулы}}}, \quad (2.11)$$

где m – масса топливной гранулы, кг.

Плотность материала гранулы представляет собой плотность самого спрессованного материала без учета воздушных зазоров в бункере хранения.

3. Масса гранул, которая могла бы поместиться в бункер хранения, без учета пустот вычисляется по следующей формуле, кг:

$$M_{\text{макс}} = N_{\text{макс}} \cdot m, \quad (2.12)$$

где $N_{\text{макс}}$ - максимальное количество гранул в контейнере (без пустот), шт.:

$$N_{\text{макс}} = \frac{V_{\text{конт}}}{V_{\text{гранулы}}}, \quad (2.13)$$

где $V_{\text{конт}}$ – объем контейнера, м³ (принимается 2,3 м³).

Теоретическая плотность наполнения контейнера топливными гранулами без пустот равна плотности самих гранул. Однако для определения действительной плотности наполнения контейнера необходимо учитывать пустоты. Для цилиндрических гранул, насыпанных хаотично, коэффициент наполнения (объемная доля гранул) обычно составляет приблизительно 60-75% от объема контейнера, занятого гранулами, а 25-40% – воздухом. Возьмем среднее значение 65%.

Насыпная плотность ($\rho_{\text{насыпн}}$) будет равна плотности материала, умноженной на коэффициент наполнения, кг/м³:

$$\rho_{\text{насыпн}} = \rho_{\text{матер}} \cdot 0,65. \quad (2.14)$$

Масса гранул в контейнере, кг:

$$M = \rho_{\text{насыпн}} \cdot V_{\text{конт}}. \quad (2.15)$$

Реальная насыпная плотность может отличаться в зависимости от конкретной формы гранул (например, скругленные края или острые), их влажности и способа загрузки в контейнер (засыпаны свободно или утрамбованы).

В формуле (2.9) $\mu \approx 0,364$ - коэффициент трения по стенкам из стали;
 $K = 0,5$ - коэффициент внутреннего трения, для выбранного контейнера:
 $D = 1,31$ м, $h = z = 1,53$ м, влажность до 15%.

В таблице 2.8 приведены расчетные значения плотности наполнения контейнера топливными гранулами и вертикальных напряжений, действующих при хранении гранул в бункере хранения.

Таблица 2.8. - Характеристики гранул из различных видов сырья и их насыпные свойства для расчета напряжений в бункере хранения

Наименование	Гранулы из лузги подсолнечника	Гранулы из шелухи овса	Гранулы из соломы
Диаметр гранулы, см	2	14	16
Длина гранулы, см	2	2,6	2,55
Масса гранулы, грамм	2,5	2	2
Объем одной гранулы, м ³	$6,283 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$5,12 \cdot 10^{-6}$
Плотность материала гранулы, кг/м ³	398	500	391
Масса гранул в контейнере (максимальная), кг	915	1 150	898
Насыпная плотность, кг/м ³	259	325	254
Масса гранул в контейнере, кг	595	748	585
Вертикальные напряжения, действующие на гранулы, Па	2 618	3 286	2 568

Для более точного определения предельного напряжения проведены испытания на сжатие на испытательной машине УТС-110М при нагружении гранул со скоростью нагружения 2 мм/мин.

При нагружении вдоль оси цилиндра топливной гранулы из лузги подсолнечника, длиной 0,03 м и диаметром 0,015 м на графике нагружения (рисунок 2.10) максимальное значение силы $F_{max} = 87$ Н, при перемещении 10,2 мм = 0,01 м, следовательно предел прочности гранулы $\sigma_{crush} = 492638$ Па $\approx 0,5$ МПа (площадь поперечного сечения $S = 1,766 \cdot 10^{-4}$ м²).

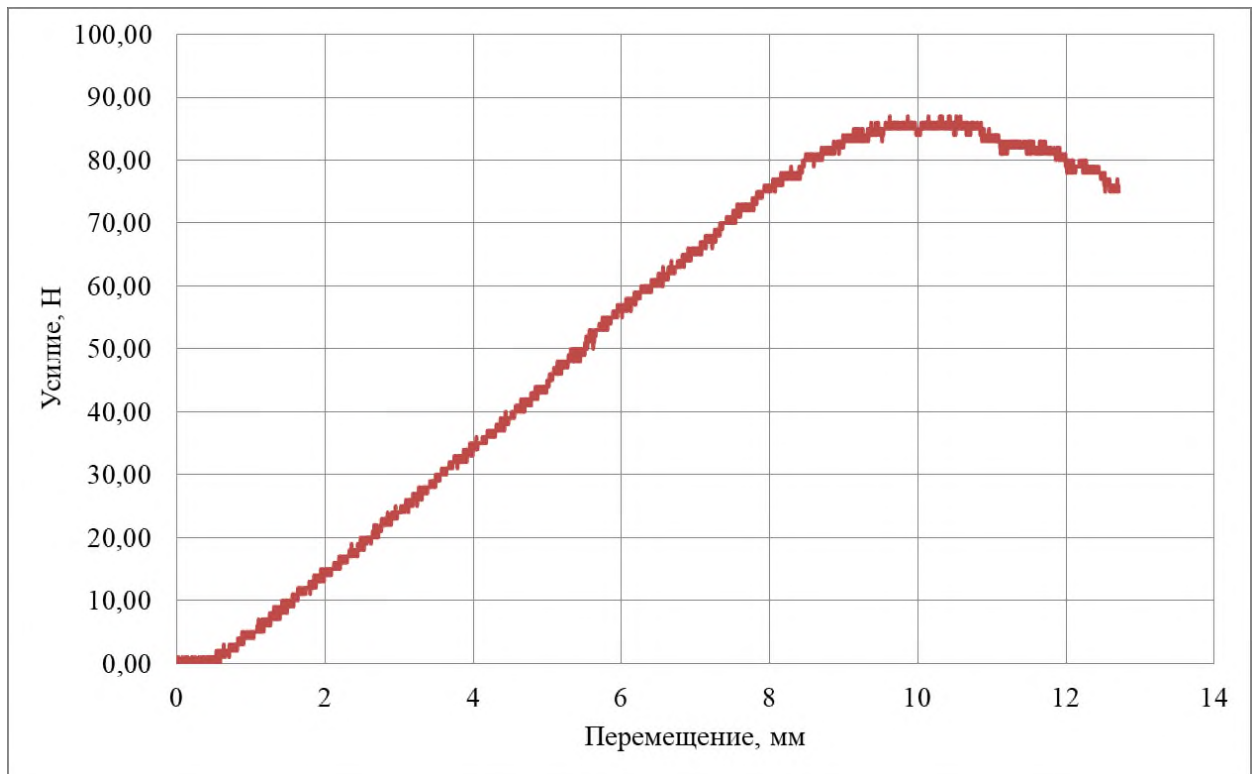


Рисунок 2.10 – Диаграмма сжатия при продольном нагружении цилиндрической гранулы из лузги подсолнечника

При нагружении вдоль оси цилиндра топливной гранулы из шелухи овса, длиной 0,023 м и диаметром 0,014 м на графике нагружения (рисунок 2.11) максимальное значение силы $F_{max} = 163$ Н, предел прочности гранулы составил $\sigma_{crush} = 0,64$ МПа (площадь поперечного сечения $S = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м²).

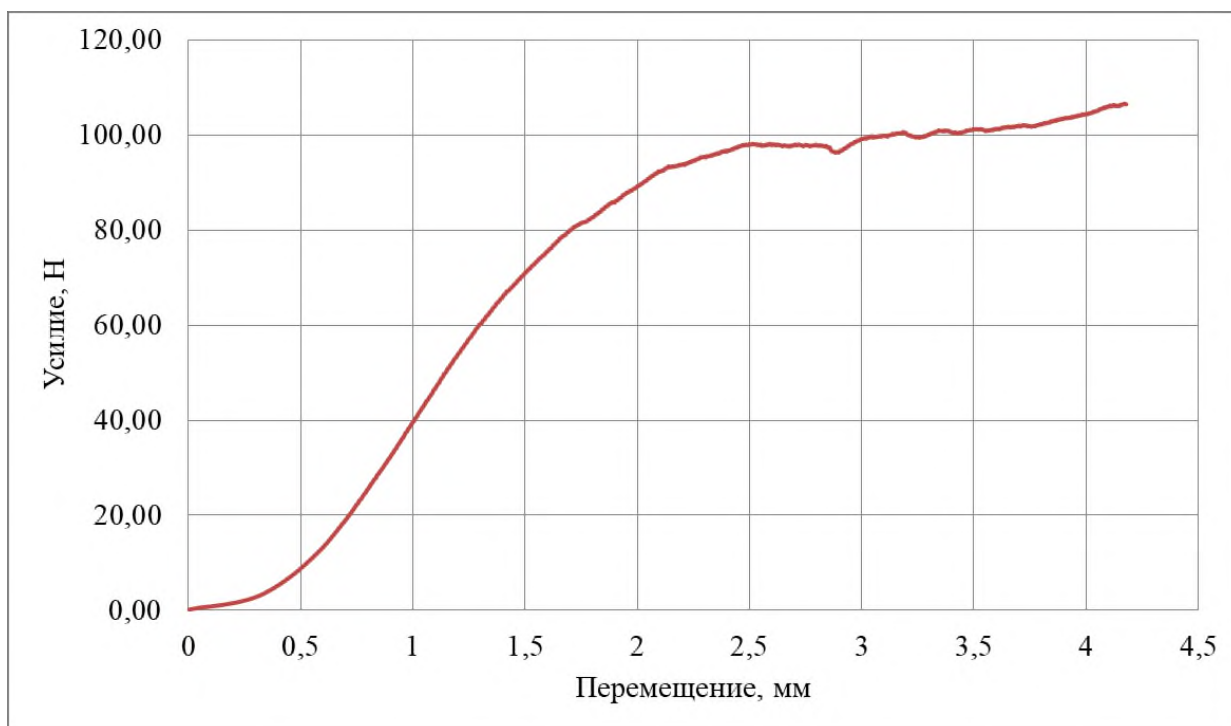


Рисунок 2.11 – Диаграмма сжатия при продольном нагружении цилиндрической гранулы из шелухи овса

При нагружении вдоль оси цилиндра топливной гранулы из соломы, длиной 0,027 м и диаметром 0,016 м на графике нагружения (рисунок 2.12) максимальное значение силы $F_{max} = 82,53$ Н, предел прочности гранулы составил $\sigma_{crush} = 0,4$ МПа (площадь поперечного сечения $S = 2 \cdot 10^{-4}$ м²).

Поскольку топливные гранулы из соломы имеют меньшую плотность и более пористую структуру, за разрушающую силу принимается значение, при котором перемещение составляет 30% первоначальной длины.

Для определения допускаемого напряжения производится расчет для наихудшего случая.

Коэффициент запаса $S_F = 2$.

Допускаемое напряжение определяется следующим образом:

$$[\sigma]_{max} = \frac{\sigma_{crush}}{S_F}, \quad (2.16)$$

$$\sigma_v(z) < [\sigma]_{max}.$$

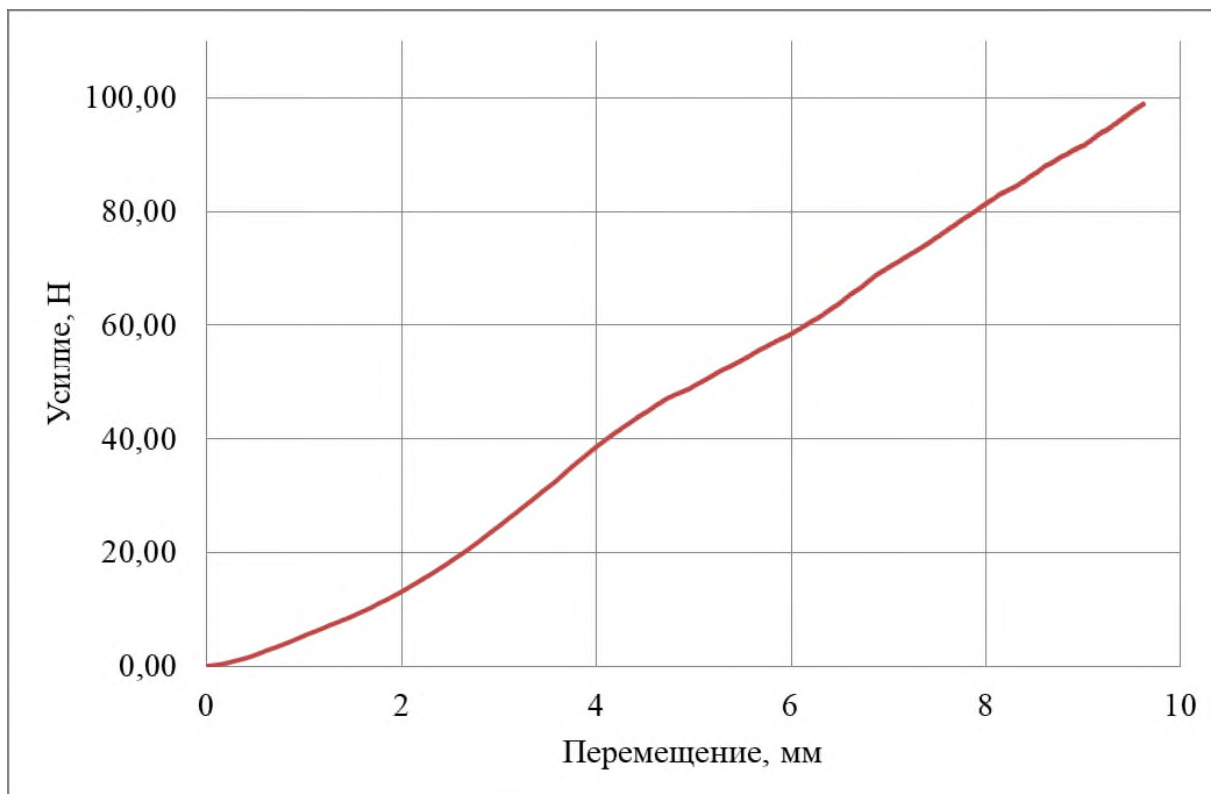


Рисунок 2.11 – Диаграмма сжатия при продольном нагружении цилиндрической гранулы из соломы

Данное условие прочности для всех видов топливных гранул выполняется с большим запасом.

Чтобы гарантировать целостность гранул на всем пути от контейнера до котла, необходимо провести последовательную оценку всех механических воздействий.

В типовых схемах топливоподачи топливные гранулы из бункера хранения поступают в топку путем свободного падения на колосниковую решетку. В момент удара о решетку возникает риск разрушения гранул, приводящий к образованию мелкой фракции и пыли.

Расчет энергии удара при падении с высоты позволяет определить, превышает ли кинетическая энергия, приобретаемая гранулой при падении, энергию, необходимую для ее разрушения [59, 60].

Скорость в момент удара (V), м/с:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad (2.17)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, h – высота падения гранулы.

Кинетическая энергия удара определяется по формуле (E_{kin}), Дж:

$$E_{kin} = \frac{m \cdot V^2}{2}, \quad (2.18)$$

где m – масса гранулы.

Энергия разрушения гранулы (E_{crush}) – это работа, которую нужно совершить, чтобы сжать и разрушить гранулу. Для предварительной оценки энергии разрушения гранулы часто используют упрощение:

$$E_{crush} = \frac{F_{crush} \cdot \Delta l}{2} \quad (2.19)$$

где F_{crush} – сила разрушения (из испытаний на сжатие), Дж, Δl – удлинение (укорочение) до разрушения, мм.

По проведенным испытаниям, описанных при оценке вертикальных напряжений, определим энергию разрушения гранулы как площадь под кривой «нагрузка-перемещение».

Топливные гранулы не разрушаются при падении, если выполняется условие:

$$E_{kin} < E_{crush}.$$

Для надежности коэффициент запаса должен быть не менее 3-5. То есть максимальная допустимая E_{kin} должна быть в 3-5 раз меньше E_{crush} .

При перемещении от бункера до топки котла на гранулы воздействуют дополнительные нагрузки: вибрационные, сила трения, соударения гранул

друг с другом. Источником вибрационных нагрузок являются вибрации от привода, неровности пути, стыки колосников [61].

Коэффициент перегрузки (n) – это отношение максимального ускорения при вибрации к ускорению свободного падения (g).

$$n = \frac{a_{\text{виб}}}{g}. \quad (2.20)$$

Динамическая вибрационная сила ($F_{\text{виб}}$) – это дополнительная сила, действующая на гранулу из-за вибраций.

$$F_{\text{виб}} = G \cdot n, \quad (2.21)$$

где $G = m \cdot g$ – сила веса гранулы.

Для горного и транспортного оборудования n может достигать 2-4. Для плавно работающего конвейера в помещении можно принять $n = 1,5 - 2,0$ для консервативной оценки.

Вибрационная сила действует циклически и может направлена в любую сторону (вниз, добавляя нагрузку, или вверх, разгружая гранулу).

Силы трения возникают между гранулами и полотном, а также между самими гранулами при движении [62].

Сила трения ($F_{\text{тр}}$), которая препятствует сдвигу, Н:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N, \quad (2.22)$$

где μ – коэффициент трения скольжения гранулы о материал полотна; N – нормальная сила, прижимающая гранулу к полу, Н. Для гранулы на поверхности контейнера нормальная сила будет определяться по формуле:

$$N = G + F_{\text{виб}}. \quad (2.23)$$

Значения коэффициента трения (μ) для гранулы, состоящей из лузги подсолнечника и мелассы, движущейся по полотну из различных материалов:

стали - $\mu_{ст} \approx 0,3 - 0,5$;

чугуну - $\mu_{чуг} \approx 0,4 - 0,6$;

грануле - $\mu_{гр} \approx 0,5 - 0,7$.

Пусть

$$N_{max} = G \cdot n, \quad (2.24)$$

$$F_{трmax} = \mu_{ст} \cdot N_{max}. \quad (2.25)$$

Сила трения действует на площадь контакта гранулы с полотном, создавая касательное напряжение.

Энергия соударений гранул друг с другом на несколько порядков ниже энергии удара при падении с высоты 400 мм. Ею можно пренебречь, так как вклад от соударения гранул в разрушение незначителен по сравнению с вибрациями и падением с высоты.

Условие прочности для гранул должно выполняться для наихудшего сочетания нагрузок. Суммарное нормальное напряжение σ в теле гранулы (от веса вышележащих слоев и вибраций) не должно превышать предела прочности σ_{crush} , Па, с запасом.

$$\sigma = \sigma_{weigh} + \sigma_{vib} \leq \frac{\sigma_{crush}}{k}, \quad (2.26)$$

где σ_{weigh} - напряжение от веса вышележащих гранул, Па; σ_{vib} - дополнительное напряжение от вибраций, Па, можно оценить как:

$$\sigma_{vib} = \frac{F_{vib}}{S_{контакта}}. \quad (2.27)$$

Примем слой гранул на колосниковой решетке равным 10 см, площадь контакта – 0,00001 м².

Касательное напряжение τ от силы трения не должно превышать предела прочности на сдвиг τ_{crush} , Па.

$$\tau_{crush} = \frac{F_{тр}}{S_{контакта}} \leq \frac{\tau_{crush}}{k}. \quad (2.28)$$

Предел прочности на сдвиг (τ_{crush}) для хрупких материалов часто связан с пределом прочности на сжатие:

$$\tau_{crush} \approx (0.5 - 0.7) \cdot \sigma_{crush}. \quad (2.29)$$

Величины динамической вибрационной силы и максимальной силы трения, а также суммарные напряжения и пределы прочности для исследуемых материалов сведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9. – Прочностные параметры гранул из различных видов сырья

Наименование	Гранулы из лузги подсолнечника	Гранулы из шелухи овса	Гранулы из соломы
Допускаемое напряжение на гранулы, Па	250 000	320 000	200 000
Кинетическая энергия удара, Дж	0,0101	0,00806	0,00806
Энергия разрушения гранулы, Дж	0,4335	0,815	0,4127
Динамическая вибрационная сила, Н	0,049	0,039	0,039

Продолжение таблицы 2.9.

Наименование	Гранулы из лузги подсолнечника	Гранулы из шелухи овса	Гранулы из соломы
Максимальная сила трения, Н	0,0196	0,0469	0,0469
Суммарное нормальное напряжение, кПа	5,16	4,22	4,15
Предел прочности на сдвиг, кПа	300	384	240

Силы трения не опасны при движении топливных гранул от бункера хранения до топки котла.

Основная нагрузка на гранулы возникает при падении из бункера на конвейер. Она на порядки превышает нагрузки от вибраций и трения на конвейере.

Для обеспечения целостности гранул необходимо минимизировать высоту падения и использовать амортизирующие элементы в местах пересыпов, контролировать вибрационные нагрузки и оптимизировать параметры хранения топливных гранул.

Исследование механических свойств позволяет оптимизировать процесс производства и использования биотопливных гранул, обеспечивая их надежность и эффективность при эксплуатации.

Выводы по второй главе

Проведенный анализ массового и энергетического потенциала образования сельскохозяйственных отходов подтверждает значительный потенциал биомассы как возобновляемого источника энергии. Биомасса – неископаемый материал биологического происхождения, который может быть трансформирован в твердое, жидкое и газообразное топливо, и использован для производства тепловой и электрической энергии.

Результаты исследования показали, что для Республики Татарстан лидирующим ресурсом по массе (1 989,21 тыс. тонн) и энергетическому потенциалу (29 149,54 ГДж) является солома, второй по значимости ресурс (1 029,93 тыс. тонн; 137 798,8 ГДж) – стебли подсолнечника, меньшим потенциалом обладают шелуха зерновых и лузга подсолнечника (198,92 тыс. тонн и 699,41 ГДж, 52,97 тыс. тонн и 831,62 ГДж соответственно), но также пригодны для энергоиспользования.

Полученные данные позволяют обоснованно планировать размещение малых автономных электростанций на растительных отходах в составе энергетических комплексов и оптимизировать логистику сбора и переработки биомассы.

Таким образом, биомасса представляет собой важный возобновляемый ресурс, способный внести существенный вклад в энергобаланс региона. Системная оценка ее потенциала дает возможность для эффективного внедрения биоэнергетических технологий в практику.

Исследование теплофизических свойств подтверждает перспективность переработки растительной биомассы в топливные гранулы как оптимальное решение для энергетического использования растительных отходов.

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 и гранул 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. Оптимальная концентрация мелассы составляет 10-20 % от массы гранулируемой смеси.

Экспериментальное исследование показывает, что гранулирование исходного сырья уменьшает рабочую влагу топлива (табл. 2.4), добавление

связующего увеличивает зольность гранул за счет минеральных компонентов мелассы (табл. 2.5), а также снижает выход летучих у гранул (табл. 2.6), что влияет на характеристики горения.

Оптимизация состава гранул (подбор связующего, контроль влажности и зольности) позволяет создавать конкурентоспособное топливо, снижающее нагрузку на экосистему и повышающее энергетическую автономность регионов.

Проведенное исследование механических свойств топливных гранул из лузги подсолнечника позволяет сделать следующие выводы.

Прочностные характеристики гранул полностью соответствуют требованиям эксплуатации в системах топливоподачи так как предел прочности гранул при сжатии обеспечивает необходимый запас надежности при всех видах механических воздействий.

Вертикальные напряжения при хранении топливных гранул в контейнере рассчитаны по формуле Янссена с учетом насыпной плотности, трения о стенки и геометрии контейнера. Полученные значения напряжения 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 свидетельствует о безопасности хранения.

Условия хранения гранул в контейнерах безопасны с точки зрения вертикальной нагрузки. Расчетные напряжения в слоях топлива существенно ниже допустимых значений даже при максимальном заполнении бункеров топливохранилища.

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, в то время как энергия разрушения при поперечном сжатии – 0,04335 Дж, 0,815 Дж и 0,4127 Дж соответственно. Таким образом, условие прочности выполняется с запасом более 4,4, что считается достаточным.

Вибрационные и динамические нагрузки учтены через коэффициент перегрузки. 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.

Трение и вибрация в системе топливоподачи оказывают минимальное влияние на целостность гранул. Возникающие при этом напряжения существенно ниже предельных значений прочности материала.

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.

Таким образом, топливные гранулы обладают необходимыми механическими характеристиками для промышленного применения в качестве альтернативного источника энергии.

ГЛАВА III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

3.1 Методология моделирования технологических схем

Автономная гибридная электростанция – энергоустановка комбинированной выработки электроэнергии и тепла, интегрирующая несколько источников генерации (параболические солнечные коллекторы, биомассовый котел), представляет собой единый технический комплекс разнородных элементов оборудования со сложной схемой технологических связей. Учитывая многообразие элементов оборудования технологической схемы и число их параметров, нужно разработать такую модель технологической схемы, с помощью которой можно будет одновременно оптимизировать схему и проводить поиск оптимальных параметров.

Для определения наиболее подходящих структурных соединений элементов оборудования в технологическую схему установки, проверки их технической выполнимости, экономической оценки каждой из них целесообразно использовать методологию системного подхода, а именно – математическое моделирование.

Математическое моделирование такой схемы требует многоуровневого подхода: составление математического описания, алгоритмизация математического описания, проверка адекватности модели [63].

Составление балансовых уравнений является основной составляющей математического моделирования технологических схем. При исследовании объектов, взаимосвязи между параметрами которых описываются дифференциальными уравнениями, часто возникают значительные вычислительные сложности. В связи с этим дифференциальный подход, как правило, применяют при детальном изучении отдельных узлов или модулей энергетической установки.

При моделировании ТЭЦ как единой системы, предпочтительным становится переход к обобщенным алгебраическим соотношениям. Такой подход позволяет существенно упростить расчеты, хотя неизбежно ведет к определенному снижению точности [64].

Уравнения для всей установки и ее внешних связей имеют следующий вид:

1) уравнения баланса для каждого k -го элемента оборудования

$$\sum_{j=1}^{J_k-N_k} (\gamma Gh)_j + \sum_{n=1}^{N_k} (\gamma P)_n = 0; \quad (3.1)$$

где G – расход энергоносителя, P – мощность электрической или механической связи, h – энтальпия энергоносителя, γ – коэффициент, учитывающий потери энергии связующего потока в окружающую среду.

2) уравнения баланса расходов для каждого l -го энергоносителя k -го элемента оборудования

$$\sum_{j=1}^{J_{kl}} G_j = 0; \quad (3.2)$$

3) уравнение гидравлического баланса для каждого l -го энергоносителя k -го элемента оборудования

$$(p' - \Delta p - p'')_{kl} = 0 \quad (3.3)$$

или

$$(p' + \Delta p - p'')_{kl} = 0; \quad (3.4)$$

4) уравнение изменения энтальпии l -го энергоносителя k -го элемента оборудования

$$(h' - \Delta h - h'')_{kl} = 0 \quad (3.5)$$

или

$$(h' + \Delta h - h'')_{kl} = 0 \quad (3.6)$$

$$(k = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, K, J_{kl} = 1, 2, \dots, L_k, n = 1, 2, \dots, N_k),$$

где p и h – давление и энтальпия энергоносителя на исходящей и входящей связи элемента оборудования, Δp и Δh – изменение давления и энтальпии процессов в элементах оборудования.

Взаимосвязи между параметрами и технологическими характеристиками компонентов энергоустановки могут быть нелинейными, многофакторными и взаимозависимыми. Выявление и формализация этих связей требует сопряженного выполнения теплового, гидравлического расчета и оценки прочностных характеристик.

Все характеристики процессов и конструкций для типового ряда элементов заданного класса оборудования можно выразить в явной аналитической форме через функциональные зависимости и итерационными методами посредством последовательного приближения к решению в зависимости от одних и тех же параметров связей (граничные условия и межэлементные взаимодействия) и конструктивных параметров установки (геометрия, материалы, номинальные характеристики). Для каждого типоразмера оборудования удастся выделить ограниченный набор результирующих характеристик, через которые формализуются взаимосвязи граничных параметров процессов в отдельных элементах, учитываются технологические ограничения (допустимые диапазоны режимов, прочностные запасы), рассчитываются приведенные затраты на эксплуатацию и обслуживание установки.

Таким образом, сложная многопараметрическая система сводится к компактному набору ключевых показателей, обеспечивающих

унифицированное описание разнородных элементов, согласованное моделирование взаимосвязанных процессов, оптимизацию технико-экономических показателей установки в целом.

3.2 Описание технологической схемы гибридной электростанции

Гибридная электростанция [65], предназначенная для выработки тепловой и электрической энергии из твердого биотоплива с использованием солнечной энергии, (рисунок 3.1.) работает следующим образом. В контуре солнечных параболических коллекторов 1 синтетическое масло подогревается до 160-400 °С за счет солнечного излучения в зависимости от времени года. Затем подогретое масло направляется в котел на биотопливе для дополнительного нагрева до 400°С. Тепловая энергия синтетического масла передается воде для получения перегретого пара в многоступенчатой системе теплообмена. Пар из теплообменника направляется в паровую турбину 4 для выработки электрической энергии.

В периоды повышенной солнечной активности, когда теплоноситель в трубках-поглотителях нагревается до температуры 390-400 °С 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 трехступенчатый теплообменник для получения пара. В ночной период и в условиях погодных-климатических 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 брикетирование биотоплива. Во время транспортировки биотопливных брикетов от экструдера 14 до бункера хранения 15 осуществляется их сушка.

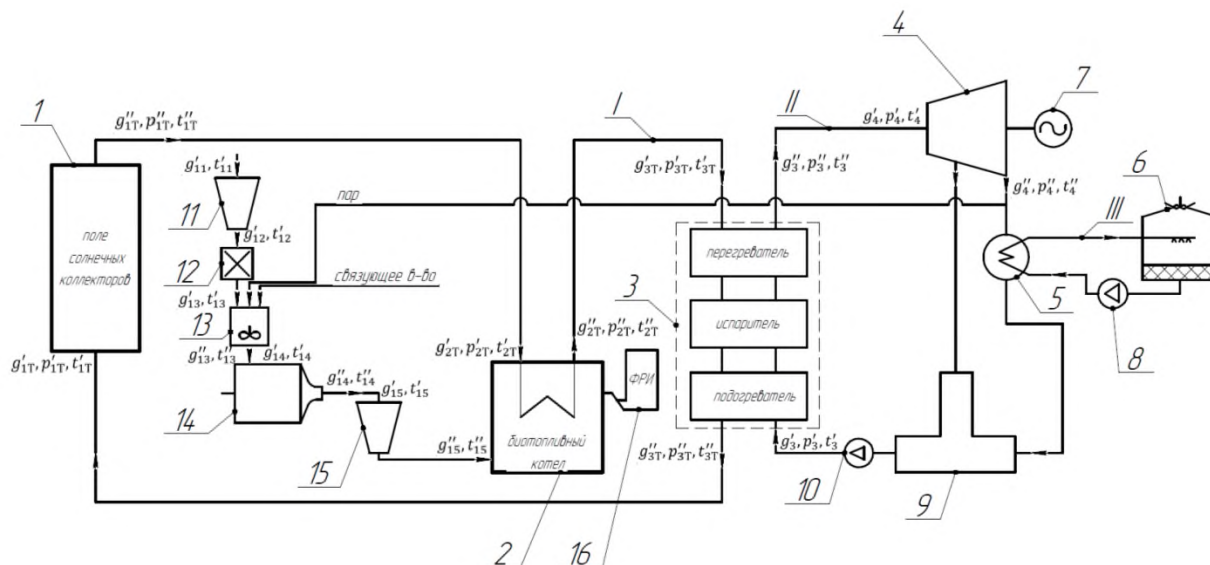


Рисунок 3.1 – Схема выработки тепловой и электрической энергии из твердого биотоплива с использованием солнечной энергии: 1 - солнечный параболический коллектор, 2 – биотопливный термомасляный котел, 3 – теплообменник, 4 -паровая турбина, 5 – конденсатор, 6 - вентиляторная градирня , 7 – электрогенератор, 8 - насос, 9 - деаэратор, 10 - питательный насос, 11 - бункера сырья, 12 - измельчитель, 13 - смеситель, 14 - экструдер, 15 - бункер хранения брикетированного биотоплива, 16 – фильтр рукавный импульсный

Согласно требованиям к качеству окружающей среды, закрепленным в Федеральном законе от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [66], содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе должно оставаться в пределах установленных предельно допустимых концентраций (ПДК). При сжигании отходов сельского хозяйства образуются дымовые газы, содержащие летучую золу – мелкодисперсные твердые частицы,

выброс которых без очистки приводит к превышению ПДК взвешенных веществ в приземном слое атмосферы. Для соблюдения НКО за котлом предусматривается установка рукавного фильтра 16.

В разработанной модели необходимо описать основные процессы, происходящие в аппаратах технологической схемы: нагрев теплоносителя в трубках солнечного коллектора; подготовку биотоплива (измельчение, смешение компонентов, экструзия), сжигание биотоплива в котле и дополнительный нагрев теплоносителя; теплообмен в многоступенчатом теплообменнике.

3.3 Математическое описание элементов технологической схемы автономной гибридной электростанции

3.3.1 Энергетический баланс параболического желобчатого коллектора

Во многих исследовательских работах были разработаны физические модели для изучения характеристик теплопередачи и тепловых характеристик солнечных приемников, которые являются основными компонентами параболических желобчатых концентраторов [67]. В этих моделях приемник разделен на несколько сегментов, и баланс тепловой энергии применяется к каждому элементу, то есть к теплоносителю, поглотителю и стеклянной оболочке. Полученные дифференциальные уравнения вычисляются с помощью численного моделирования методом конечных разностей или конечного объема [68].

Сложность теплового моделирования приемников варьируется от стационарной 1D-модели с равномерным солнечным тепловым потоком на трубку-поглотитель [69] до нестационарной 3D-модели с неоднородным тепловым потоком [70], и многие из разработанных моделей были проверены на соответствие данным измерений [71]. В ходе исследований были изучены и сравнены оптические и тепловые характеристики различных технологий

приемников, например, Solel UVAC3, Schott 2008 PTR-70 и Schott 2011 PTR-70 [72]. Кроме того, в некоторых исследованиях оценивалась производительность приемника при использовании различных типов теплоносителя, таких как Syltherm 800, Therminol VP-1, воды, воздуха и расплавленной соли [72, 74]. Кроме того, было исследовано влияние геометрических параметров приемника на эффективность теплопередачи [75, 76, 77]. В исследовательской работе [78] проведено сравнение 1D- и 3D-моделей и показано, что 1D-модели продолжают демонстрировать удовлетворительные результаты.

В исследовании [79] проанализированы различные типы солнечных концентраторов, функционирующих с применением теплоносителя: концентраторы башенного типа, параболоцилиндрические установки и плоские закрытые трубчатые коллекторы. Плоские закрытые солнечные трубчатые тепловые коллекторы в основном используются в частном домостроении: их конструктивные особенности позволяют монтировать оборудование на кровлях жилых зданий, обеспечивая локальную генерацию тепловой и электрической энергии для удовлетворения бытовых потребностей.

Концентраторы башенного типа включают в себя вертикальную башню, на вершине которой размещен резервуар для нагрева рабочего тела. В качестве теплоносителя могут использоваться вода, масло, воздух либо расплавленная соль в жидкой фазе. Вокруг башни располагается поле гелиостатов (зеркал), которые перенаправляют и концентрируют солнечный поток на приемник в верхней части башни. К резервуару подведены два трубопровода, по одному из которых подается охлажденный теплоноситель, по второму отводится нагретый, который затем направляется в теплоаккумулирующие емкости. Такие резервуары позволяют сохранять запас тепловой энергии после прекращения солнечного облучения и поддерживать работоспособность системы в темное время суток. Альтернативным решением является монтаж на башне ресивера для нагрева

воздуха, который далее поступает в газотурбинную установку. Предварительный подогрев воздушного потока способствует повышению общей энергоэффективности комплекса. В составе воздухонагревателя используется пористый элемент, выполняющий функцию теплообменной насадки [80].

Параболоцилиндрические концентрационные установки относятся к нагревательным системам и имеют форму изогнутой полукруглой параболы с отражающим покрытием. В фокусе параболы закреплена трубка темного цвета, внутри которой циркулирует теплоноситель (вода, масло, воздух). В процессе эксплуатации температура теплоносителя в такой системе может достигать 400 °C [81].

Мощность параболической солнечной концентрационной установки в 4-5 раз выше мощности солнечного концентратора башенного типа. Параболические солнечные концентраторы отличаются высокой мощностью, компактностью и простотой обслуживания [82].

На рисунке 3.2 представлено поперечное сечение параболического желобчатого коллектора, который изготавливается путем сгибания листа отражающей поверхности в параболическую форму.

Теплоноситель, циркулирующий через металлический трубчатый поглотитель черного цвета, размещается вдоль фокальной линии приемника. Трубка-поглотитель закрывается стеклянной оболочкой, а пространство между приемником и крышкой заполняется вакуумом или воздухом для уменьшения конвективных потерь тепла [83].

Когда прямое солнечное излучение отражается экраном, большая часть этой энергии поглощается трубкой-поглотителем, которая передает это полезное тепло жидкости. Модель приемника основана на балансе энергии в каждой секции стеклянной оболочки, трубки-поглотителя и жидкости. Следовательно, должны быть известны различные коэффициенты теплопередачи.

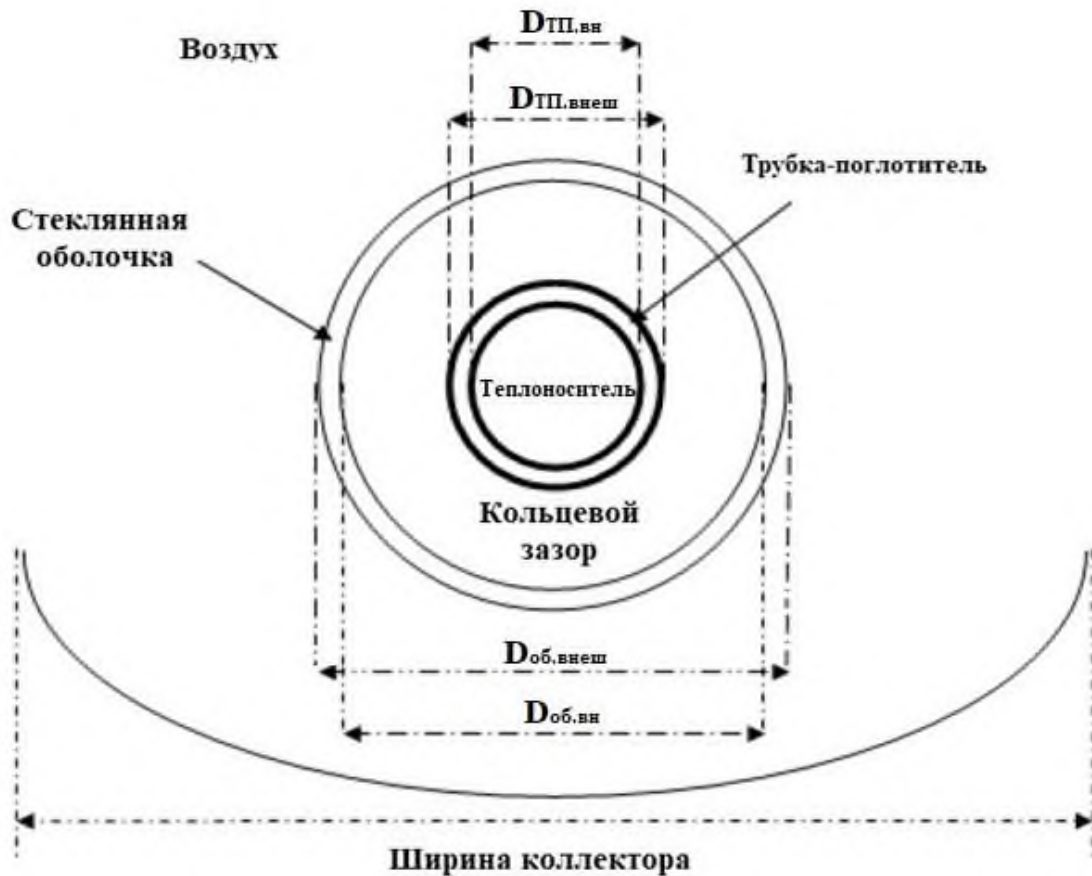


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема параболического желобчатого коллектора

Располагаемая солнечная энергия ($Q_{\text{солн}}$) рассчитывается как:

$$Q_{\text{солн}} = A \cdot E, \quad (3.6)$$

где A – площадь апертуры, м^2 ; E – солнечная инсоляция, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Уравнение энергетического баланса приемника:

$$Q_{\text{солн}} \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot (\theta) = Q_{\text{п}} + Q_{\text{пот}}, \quad (3.7)$$

где $\eta_{\text{опт}}$ – оптический КПД коллектора, указывается в технических характеристиках; (θ) – модификатор угла падения, зависит от угла падения солнечных лучей на поглощающую поверхность солнечного коллектора θ .

Полезный прирост энергии ($Q_{\text{п}}$) в системе солнечных коллекторов может быть рассчитан следующим образом:

$$Q_{\text{п}} = D_{\text{м}} \cdot c_{\text{р1Т}} \cdot (T''_{1\text{Т}} - T'_{1\text{Т}}), \quad (3.8)$$

где $D_{\text{м}}$ – массовый расход теплоносителя, кг/с, $T'_{1\text{Т}}$ – температура теплоносителя на входе в коллектор, К; $T''_{1\text{Т}}$ – температура теплоносителя на выходе из коллектора, К; $c_{\text{р1Т}}$ – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг · К).

Потери в системе солнечных коллекторов от излучения и конвекции учитываются по следующей формуле [84]:

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{кон}}, \quad (3.9)$$

где $Q_{\text{изл}}$ – тепловые потери солнечного коллектора за счет излучения, Дж; $Q_{\text{тепл}}$ – потери солнечного коллектора за счет теплопроводности, Дж; $Q_{\text{кон}}$ – потери солнечного коллектора за счет конвективного теплообмена с окружающей средой, Дж.

Тогда потеря энергии за счет излучения определяется как:

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon_{\text{абс}} \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_{\text{абс}}^4 - T_{\text{неба}}^4), \quad (3.10)$$

где $\varepsilon_{\text{абс}}$ – коэффициент эмиссии абсорбера солнечного коллектора, принимается в диапазоне 0,05 ÷ 0,1; A – площадь солнечного коллектора, м²; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м² · К); $T_{\text{абс}}$ – температура абсорбера солнечного коллектора, К, принимается равной температуре

теплоносителя в трубках; $T_{\text{неба}}$ – температура небосвода над солнечным коллектором, K , принимается равной температуре окружающей среды.

Потеря энергии за счет теплопроводности и конвективного теплообмена рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{кон}} = A \cdot U_L \cdot (t_{\text{абс}} - t_{\text{окр}}), \quad (3.11)$$

где U_L – коэффициент тепловых потерь за счет конвекции и теплопередачи при заданной скорости ветра, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot K)$, определяется техническими характеристиками солнечного коллектора; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, K .

Тепловой КПД параболического желобчатого коллектора рассчитывается по формуле [85]:

$$\eta_{\text{СК}} = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{солн}}}. \quad (3.12)$$

Температура на выходе из коллектора определяется по следующей формуле:

$$t''_{1T} = t'_{1T} + \frac{Q_{\text{солн}} \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot (\theta) - Q_{\text{пот.}}}{D_{\text{м}} \cdot c_{\text{р1T}}}. \quad (3.13)$$

Температура на выходе из солнечного коллектора является искомой величиной в данном блоке расчетов и зависит от свойств теплоносителя, интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды.

Технические характеристики параболического солнечного коллектора EUROTROUGH общей длиной 150 м представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Технические характеристики парболического солнечного концентратора

Название	Значение
Коэффициент тепловых потерь, U_L , Вт/(м ² · К)	5,5
Площадь апертуры, A , м ²	577
Оптический КПД, $\eta_{\text{опт}}$	0,77
Наружный диаметр трубки-поглотителя, $D_{\text{ТП.вн}}$, м	0,07
Внутренний диаметр трубки-поглотителя, $D_{\text{ТП.внеш}}$, м	0,065
Коэффициент загрязнения	0,97

Результаты расчета параболического солнечного коллектора при интенсивности солнечного излучения, характерной для Республики Татарстан, представлены в таблице 3.2.

3.3.2 Термомасляный биотопливный котел

Термомасляный котел на биотопливе представляет собой высокотехнологичную энергоустановку, обеспечивающую эффективный высокотемпературный теплообмен за счет циркуляции органического или синтетического масла. В качестве топлива используются возобновляемые биоресурсы: древесные отходы (щепа, опилки, кора), гранулы (пеллеты), лузга, торф, отходы сельского хозяйства и прочие виды биомассы.

На рисунке 3.4 представлена схема работы термомасляного биотопливного котла [86]. Биотопливо автоматически подается на колосниковое полотно ленточного типа и поступает в топочную камеру, где происходит контролируемое сжигание биомассы при оптимальных параметрах горения. Система воздухоподачи (дымосос/вентилятор) обеспечивает достаточную тягу и полноту сгорания топлива.

Таблица 3.2 - Результаты расчета параболического солнечного коллектора

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентяб.	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Солнечная инсоляция, E , кВт/м ²	1,45	2,47	3,85	4,92	5,77	6,19	5,99	4,79	3,49	2,25	1,68	1,39
Угол наклона, θ	71	63	50	35	20	11	17	29	44	57	69	74
Температура окружающей среды, $t_{\text{окр}}$, K	261,00	260,00	270,55	274,90	294,15	296,15	298,15	293,80	283,85	273,85	269,10	263,35
Располагаема я солнечная энергия, $Q_{\text{солн}}$, кВт	836,65	1425,19	2221,45	2838,84	3329,29	3571,63	3456,23	2763,83	2013,73	1298,25	969,36	802,03
Полезный прирост энергии, $Q_{\text{п}}$, кВт	541,87	960,96	1515,89	1978,28	2318,52	2481,78	2405,18	1931,53	1376,94	874,38	630,46	511,26

Продолжение таблицы 3.2.

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентяб.	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Потери от излучения и конвекции, $Q_{\text{пот}}, \text{кВт}$	102,35	136,44	194,63	207,62	245,03	268,37	256,12	196,62	173,63	125,27	115,95	106,31
Температура масла на выходе из солнечного коллектора, t''_{1T}, K	435,36	463,8	504,63	512,84	535,74	547,3	541,83	509,81	494,02	457,77	449,11	439,48
Температура масла на выходе искомая, $t''_{1T}, ^\circ\text{C}$	162,36	190,8	231,63	239,84	262,74	274,3	268,83	236,81	221,02	184,770	176,110	166,48
Тепловой КПД	0,648	0,674	0,682	0,697	0,696	0,695	0,696	0,699	0,684	0,674	0,650	0,637

Тепло от сгорания топлива передается через теплообменник (обычно трехходовой конструкции из жаростойкой стали) теплоносителю.

Циркуляция теплоносителя осуществляется циркуляционным насосом, что обеспечивает принудительное движение горячего масла по замкнутому контуру. Термомасло, поступающее из котла, направляется в многоступенчатый теплообменник, где передает тепловую энергию для нагрева воды и генерации пара. Охлажденное после теплоотдачи масло возвращается в котел, обеспечивая непрерывность теплового потока.

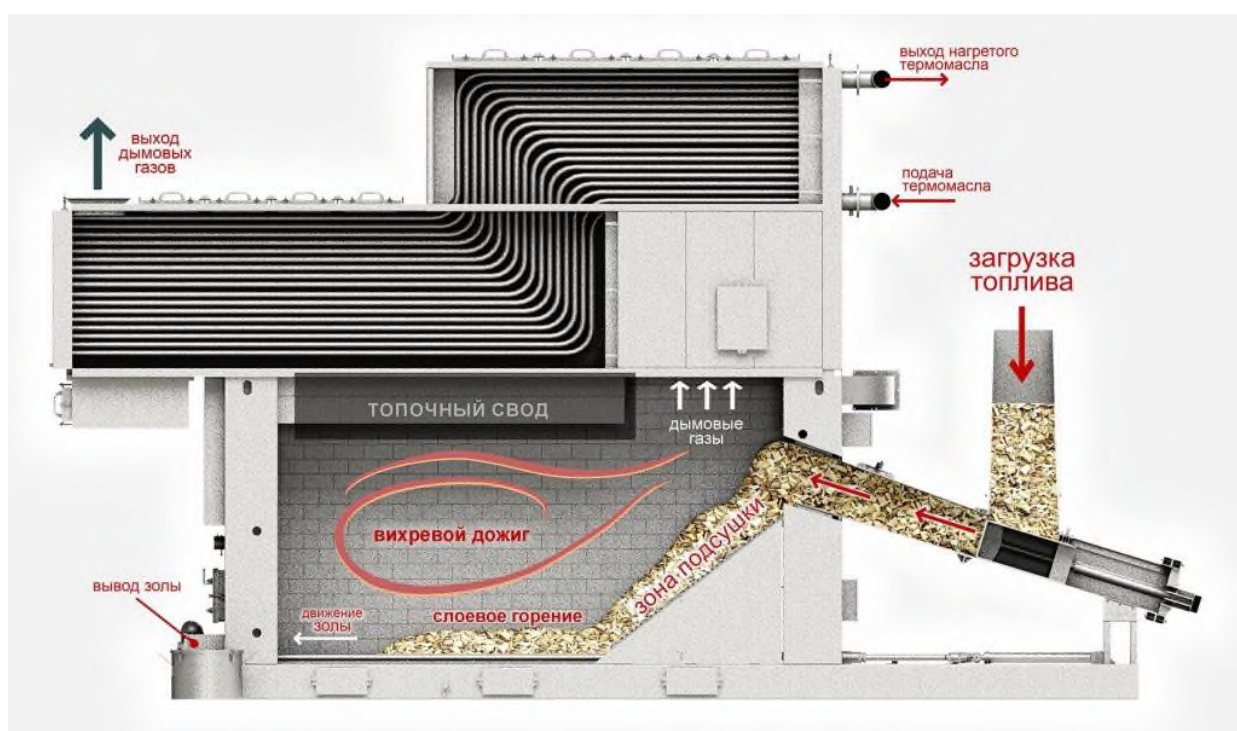


Рисунок 3.4 – Схема работы термомасляного биотопливного котла

В приемный бункер поступают гранулы, свойства которых исследованы в главе 2, влажностью от 15 до 65% методом механизированной подачи. Из него гидравлический толкатель подает топливо на наклонные колосники топки с определенными параметрами скорости и заданными временными промежутками.

В топочной камере шурующая водоохлаждаемая планка перемещает топливо по колосникам. В процессе перемещения происходит слоевое

горение и формируется газовая смесь. Несгораемая зольная составляющая топлива продвигается к фронтальной части топки, сбрасывается в зольный короб и оттуда удаляется наружу специальным шнековым транспортером. Образовавшиеся в результате горения дымовые газы поступают в вихревую зону топки, где полностью сжигаются углеводородные компоненты газов.

Образовавшаяся газовая смесь поступает в термомасляный теплообменник и нагревает теплоноситель (термическое масло) до требуемой температуры, далее уносится с помощью дымососа через дымовую трубу наружу. На выходе из теплообменника установлены взрывные клапаны и контрольные приборы для обеспечения безопасной эксплуатации.

В таблице 3.3 представлены технические характеристики термомасляного котла ТМУ-МТ на биотопливе.

Таблица 3.3 – Технические характеристики термомасляного биотопливного котла

Вид топлива	кора, торф, уголь, щепа, опилки, брикеты, гранулы, дрова
Влажность топлива, %	до 55 (до 65 с рекуператором)
Мощность, МВт	от 1,0 до 6,0
Рабочее давление, max, МПа	до 8
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	6790 × 1930 × 4400

Теплоноситель, предварительно нагретый в поле солнечных коллекторов, поступает в биотопливный котел для нагрева до 400 °С за счет сжигания биотопливных гранул из растительных отходов сельского хозяйства. Подогретый теплоноситель поступает в многоступенчатую систему теплообмена для производства пара, который направляется в паровую турбину.

Выбор теплоносителя существенно влияет на эксплуатационные характеристики станции. Теплоноситель для высокотемпературных

солнечных коллекторов представляет собой жидкость, которая передает тепловую энергию солнца от солнечного коллектора потребителю тепла.

Наиболее популярными теплоносителями для систем солнечной энергетики являются синтетические углеводородные масла [87].

Также в качестве теплоносителя могут быть использованы наножидкости, такие как смесь нанопорошков кремниевой кислоты, одностенных и многостенных углеродных нанотрубок в технических растворах диэтилового эфира, глицерина, воды. Сотрудниками ТТУ имени М.С. Осими были проведены исследования теплофизических свойств данных смесей [88, 89].

При выборе теплоносителя необходимо руководствоваться его физическими характеристиками: вязкость, теплоемкость, точка замерзания, точка кипения, температура вспышки.

Например, в холодном климате солнечным системам требуются теплоносители с низкой температурой замерзания. Теплоносители, подверженные воздействию высоких температур, при жарком климате, должны иметь высокую температуру кипения [90]. Вязкость и теплоемкость определяют необходимую энергию для перекачивания теплоносителя по трубопроводам. Теплоноситель с низкой вязкостью и высокой удельной теплоемкостью легче перекачивать, поскольку он обладает меньшим гидравлическим сопротивлением и передает больше тепла.

Теплофизические свойства теплоносителей, применяемых в солнечных коллекторах представлены в таблице 3.4 [91].

Эксплуатация гибридной электростанции при низких температурах возможна только с теплоносителями, которые обладают низкой температурой замерзания, низкой вязкостью, что облегчает перекачку теплоносителя насосом, особенно при низких температурах, когда жидкость может загустеть, высокой теплоемкостью, что позволяет эффективнее передавать тепло.

Таблица 3.4 – Теплофизические свойства теплоносителей

Теплоноситель	Теплоемкость, Дж/кг·°С	Плотность, кг/м³	Температура застывания, °С	Температура кипения, °С
Эвтектическая смесь бифенил/ дифенил оксида (Therminol VP-1)	2180 (при 400 °С)	694	< -100	400
Раствор диэтилового спирта и 0,2% порошка кремниевой кислоты	2550 (при 250 °С)	680	< -100	250
Раствор жидкого диэтилового эфира + (0,1-0,5)% ОСУНТ	2700 (при 250 °С)	665	< -100	377
Раствор жидкого диэтилового эфира + 0,3% МСУНТ	2500 (при 160 °С)	665	< -100	377

Расчет котла при работе на биотопливе, свойства которого подробно описаны в главе 2, проводились по нормативному методу [92].

Расчет объемов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания выполняют на 1 кг твердого топлива при нормальных условиях (0°С и 101,3 кПа).

Определение объемов и массы воздуха и продуктов сгорания при сжигании твердых топлив в атмосферном воздухе осуществляют с использованием формул, приведенных ниже [93].

Теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сгорания топлива (коэффициент избытка воздуха $\alpha=1$), м³/кг [92]:

$$V_0^H = 0,0889 (C^r + 0,375S_{p+0}^r) + 0,265H^r + 0,0333O^r, \quad (3.14)$$

где C^r – содержание углерода в топливе, %; S_{p+0}^r – содержание серы в топливе, %; H^r – содержание водорода в топливе, %; O^r – содержание кислорода в топливе, %.

Теоретические (минимальные) объемы продуктов сгорания, полученные при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха ($\alpha=1$) [92]:

азота:

$$V_{0,N_2}^H = 0,79V_0^H + 0,8 \frac{N^r}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (3.15)$$

трехатомных газов:

$$V_{RO_2}^H = 1,866 \frac{C^r + 0,375S_{p+0}^r}{100} \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (3.16)$$

водяных паров:

$$V_{0,H_2O}^H = 0,111H^r + 0,0124W_t^r + 0,016V_0^H, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (3.17)$$

где W_t^r – рабочая влажность топлива, %.

Коэффициент избытка воздуха для слоевых топочных устройств при сжигании топливных гранул из отходов сельского хозяйства составляет $\alpha=1,4$ [93]. Тогда расчет объемов продуктов сгорания осуществляется по следующим формулам:

объем водяных паров:

$$V_{H_2O}^H = V_{0,H_2O}^H + 0,016 (\alpha - 1)V_0^H, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (3.18)$$

объем дымовых газов:

$$V_{\Gamma}^H = V_{RO_2}^H + V_{0,N_2}^H + V_{H_2O}^H + (\alpha - 1)V_0^H, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (3.19)$$

объемные доли образовавшихся компонентов:

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}^H}{V_{\Gamma}^H}, \quad (3.20)$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}^H}{V_{\Gamma}^H}, \quad (3.21)$$

$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}^H}{V_{\Gamma}^H}. \quad (3.22)$$

концентрация золы в продуктах сгорания:

$$\mu_{зл} = \frac{A^r \alpha_{уН}}{100 G_{\Gamma}}, \quad (3.23)$$

где A^r – расчетное содержание золы в топливе, %; $\alpha_{уН}$ – доля золы топлива, уносимой газами (0,85); G_{Γ} - масса продуктов сгорания, кг.

Масса продуктов сгорания:

$$G_{\Gamma} = 1 - \frac{A^r}{100} + 1,306 \alpha V_0^H, \text{ кг/кг}. \quad (3.24)$$

Энтальпия газов определяется при температуре уходящих газов ϑ , °С:

$$H_{0,\Gamma} = V_{RO_2}^H \cdot (c\vartheta)_{CO_2} + V_{0,N_2}^H \cdot (c\vartheta)_{N_2} + V_{0,H_2O}^H \cdot (c\vartheta)_{H_2O}, \text{ кДж/кг}. \quad (3.25)$$

где энтальпии 1 м³ влажного воздуха $(c\vartheta)_{\text{в}}$, углекислого газа $(c\vartheta)_{CO_2}$, азота $(c\vartheta)_{N_2}$ и водяных паров $(c\vartheta)_{H_2O}$ определяются по справочным данным [92].

Энтальпия теоретически необходимого количества воздуха при температуре ϑ , °С:

$$H_{0,\text{в}} = V_0^H \cdot (c\vartheta)_{\text{в}}, \text{ кДж/кг}. \quad (3.26)$$

Энтальпия уходящих газов при температуре ϑ :

$$H_{yx} = H_{0,g} + (\alpha - 1) \cdot H_{0,v}, \text{кДж/кг.} \quad (3.27)$$

Энтальпия золы:

$$H_{3л} = 0,01\alpha_{yH}A^p c_{3л}\vartheta, \text{кДж/кг.} \quad (3.28)$$

При составлении теплового баланса котла обеспечивают равенство между располагаемым количеством теплоты Q_p , (теплом, поступившим в котел) и совокупностью полезно использованной теплоты Q_1 и всех видов тепловых потерь Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 и Q_6 [92]. Из полученного баланса определяют коэффициент полезного действия установки и рассчитывают требуемый расход топлива [92].

Тепловой баланс составляется применительно к установившемуся тепловому состоянию котла на 1 кг твердого топлива при 0°C и 101,3 кПа:

$$Q_p + Q_{в.вн} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \text{кДж/кг.} \quad (3.29)$$

где Q_2 – потери тепла с уходящими дымовыми газами, кДж/кг; Q_3 – потери от химической неполноты сгорания топлива, кДж/кг; Q_4 – потери тепла от механического недожога, кДж/кг; Q_5 – потери тепла через стенки котла и трубы в окружающую среду, кДж/кг; Q_6 – потери с физическим теплом удаленных из топки золы и шлака, кДж/кг.

Располагаемое тепло 1 кг твердого топлива определяется по формуле:

$$Q_p = Q_i^r + i_{тл}, \text{кДж/кг,} \quad (3.30)$$

где Q_i^r – низшая теплота сгорания рабочей массы твердого топлива.

Физическое тепло топлива:

$$i_{\text{ТЛ}} = c_{\text{ТЛ}} \cdot t_{\text{ТЛ}}, \quad (3.31)$$

где $c_{\text{ТЛ}}$ – теплоемкость рабочего топлива; $t_{\text{ТЛ}}$ – температура рабочего топлива.

Потери тепла с уходящими газами определяются как разность энтальпий продуктов сгорания на выходе из последней поверхности нагрева и холодного воздуха, % [92]:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p} 100 = \frac{[H_{\text{yx}} - \alpha H_{\text{хв}}](100 - q_4)}{Q_p}, \quad (3.32)$$

где $H_{\text{хв}}$ – энтальпия теоретически необходимого количества воздуха на входе в воздушный тракт.

Потери тепла от химической неполноты сгорания обусловлены суммарной теплотой сгорания продуктов неполного горения, остающихся в уходящих газах, % [92]:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p} 100. \quad (3.33)$$

При сжигании твердых топлив в слоевых топках q_3 определяется по справочным данным [92]. Для твердого биотоплива принимаем значение $q_3 = 0,75$.

Потери тепла от механической неполноты сгорания q_4 определяются недожогом топлива в шлаках, провале и уносе и рассчитываются по формуле, % [92]:

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_p} 100 = \frac{\left(a_{\text{шл}} \frac{\Gamma_{\text{шл+пр}}}{100 - \Gamma_{\text{шл+пр}}} + a_{\text{ун}} \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \right) 32,7 \cdot 10^3 A^r}{Q_p}. \quad (3.34)$$

В справочных данных [92] представлены значения q_4 для слоевых котлов.

Потеря тепла от наружного охлаждения q_5 для стационарных котлов определяется в зависимости от расхода теплоносителя.

Потеря с теплом шлака $q_{\text{бшл}}$ вводится в расчет для всех твердых топлив, однако может не учитываться при условии:

$$q_{\text{бшл}} \leq \frac{Q_i^r}{400}. \quad (3.35)$$

Количество тепла, полезно использованное в котле, определяется по формуле, кДж/кг:

$$Q_k = D_m \Delta H, \quad (3.36)$$

где D_m – массовый расход масла в контуре котла, кг/с; ΔH – разность энтальпий масла на входе и выходе из котла, кДж/кг.

Расход топлива, подаваемого в топку, рассчитывается следующим образом, кг/с:

$$B = \frac{Q_k \cdot 100}{Q_H^p \cdot \eta_k}, \quad (3.37)$$

где η_k – КПД котла, %, который определяется по формуле:

$$\eta_k = 100 - q_1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6. \quad (3.38)$$

На рисунке 3.5 представлена схема работы термомасляного биотопливного котла с указанием параметров топлива и теплоносителя на входе и выходе из него.

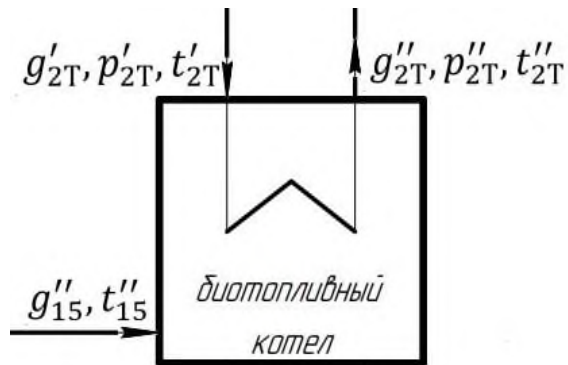


Рисунок 3.5 – Материальный баланс термомасляного биотопливного котла

Энергетический баланс котла записывается в виде:

$$Q_{\text{топлива}} + Q_{\text{ск}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{п.с.}} + \Delta Q_{\text{пот.}} \quad (3.39)$$

В таблице 2.7 представлены теплофизические характеристики биотопливных гранул из лузги подсолнечника, шелухи овса и соломы, по которым был произведен расчет термомасляного котла на биотопливе. Результаты расчета представлены в таблице 3.5.

Расчет термомасляного котла на биотопливных гранулах из лузги подсолнечника, соломы и шелухи овса показал, что все три вида топлива обеспечивают сопоставимую эффективность работы котла. Основные потери теплоты обусловлены механическим недожогом и уходящими газами. С точки зрения тепловой эффективности все три вида биотоплива пригодны для использования в рассматриваемой установке.

Таблица 3.5 - Результаты расчета теоретического расхода воздуха, объемов продуктов сгорания и теплового расчета термомасляного котла на биотопливе

Наименование показателя	Гранулы из лузги подсолнечник а	Гранулы из соломы	Гранулы из шелухи овса
Теоретическое количество сухого воздуха, V_0^H , м ³ /кг (при $a = 1$)	2,98	2,93	2,83
Теоретический объем трехатомных газов, $V_{RO_2}^H$, м ³ /кг (при $a = 1$)	0,58	0,58	0,56
Теоретический объем водяных паров, V_{0,H_2O}^H , м ³ / кг (при $a = 1$)	0,85	0,80	0,79
Теоретический объем водяных паров, V_{0,H_2O}^H , м ³ / кг (при $a = 1,4$)	0,87	0,82	0,81
Теоретический объем азота, V_{0,N_2}^H , м ³ /кг (при $a = 1,4$)	2,36	2,32	2,24
Теоретический объем продуктов сгорания, V_r^H , м ³ /кг (при $a = 1,4$)	5,00	4,89	4,75
Объемные доли трехатомных газов, r_{RO_2}	0,13	0,13	0,13
Объемные доли воды, r_{H_2O}	0,20	0,19	0,19
Энтальпия газов, $H_{0,в}$, кДж/кг	592,34	577,23	560,98
Энтальпия воздуха, $H_{0,в}$, кДж/кг	432,79	426,02	412,06
Энтальпия уходящих газов при $t=110$ С, H_{yx} , кДж/кг	722,17	705,04	684,60
Концентрация золы, $\mu_{зл}$, кг/кг	0,00384	0,00388	0,004

Продолжение таблицы 3.5.

Наименование показателя	Гранулы из лузги подсолнечника	Гранулы из соломы	Гранулы из шелухи овса
Масса продуктов сгорания, G_r , кг/кг	5,97	5,92	5,73
Потеря теплоты топлива с теплотой уходящих газов из котла, q_2 , %	5,41	5,30	5,33
Потеря теплоты с химическим недожогом топлива, q_3 , %	0,75	0,75	0,75
Потеря теплоты с механическим недожогом топлива, q_4 , %	10	10	10
Потеря теплоты через стенки котла в окружающую среду, q_5 , %	1,0	1,0	1,0
Потеря теплоты с физической теплотой шлака, $q_{6\text{шл}}$, % (золой пренебрегаем)	0	0	0
Тепло сгорания топлива, Q_k , кДж/кг	5329,43	5329,43	5329,43
Располагаемая теплота рабочей массы топлива, Q_p^p , кДж/кг	11150,00	11090,00	10690,00
Расход топлива, B , кг/с	0,5770	0,5794	0,6012
Полезно используемая теплота, Q_1 кДж/кг	9236,25	9198,72	8864,12

Продолжение таблицы 3.5.

Наименование показателя	Гранулы из лузги подсолнечника	Гранулы из соломы	Гранулы из шелухи овса
Потери тепла с уходящими дымовыми газами, Q_2 , кДж/кг	603,62	588,20	569,81
Потери от химической неполноты сгорания топлива, Q_3 , кДж/кг	83,625	83,175	80,175
Потери тепла от механического недожога, Q_4 , кДж/кг	1115	1109	1069
Потери тепла через стенки котла и трубы в окружающую среду, Q_5 , кДж/кг	111,5	110,9	106,9
Потери с физическим теплом удаленных из топки золы и шлака, Q_6 , кДж/кг	0	0	0
КПД котла, η_k , %	82,84	82,95	82,92

3.3.3 Многоступенчатая система теплообмена

Пар, поступающий в паровую турбину, образуется в многоступенчатой системе теплообмена, где синтетическое масло отдает тепло воде. Многоступенчатая система теплообмена содержит подогреватель,

испаритель и перегреватель, расположенные последовательно в противотоке к поступающему синтетическому маслу.

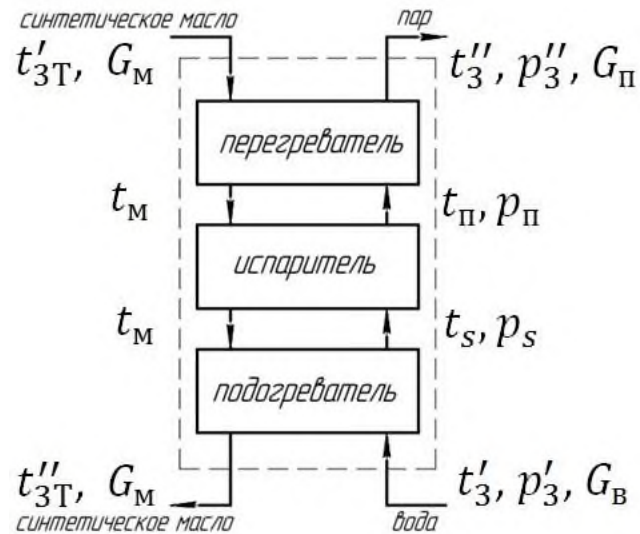


Рисунок 3.6 – Схема многоступенчатой системы теплообмена

Определение параметров синтетического масла, воды и пара базируется на системе уравнений теплового баланса и теплопередачи теплообменных аппаратов.

Многоступенчатая система теплообменников рассчитывается последовательно итерационным методом.

В подогревателе теплообмен происходит без изменения агрегатного состояния сред, соответственно, уравнение теплового баланса имеет вид [94]:

$$Q = G_B \cdot c_B \cdot (t''_B - t'_B) = G_M \cdot c_M \cdot (t''_M - t'_M), \quad (3.40)$$

Уравнение теплового баланса испарителя имеет вид:

$$Q = G_B \cdot (h''_{\Pi} - h'_B) = G_M \cdot c_M \cdot (t''_M - t'_M), \quad (3.41)$$

$$G_B \cdot (h''_{\Pi} - h'_B) = G_B \cdot c_B (t_s - t'_B) + G_B \cdot r, \quad (3.42)$$

где G_B – массовый расход воды (пара) через многоступенчатую систему теплообмена, кг/с; c_B – теплоемкость воды, кДж/(кг·°C); t_B'' – температура воды на выходе из теплообменника, °C; t_B' – температура воды на входе в теплообменник, °C; t_s – температура насыщения воды, °C; r – скрытая теплота парообразования, кДж/(кг·°C); $h_{п}''$ – энтальпия пара на выходе из теплообменника, кДж/(кг·°C); h_B' – энтальпия воды на входе в теплообменник, кДж/кг; G_M – массовый расход синтетического масла через многоступенчатую систему теплообмена, кг/с; c_M – средняя теплоемкость синтетического масла, кДж/(кг·°C); t_M' – температура синтетического масла на входе в многоступенчатую систему теплообмена, °C; t_M'' – температура синтетического масла на выходе из многоступенчатой системы теплообмена, °C.

Уравнение теплопередачи записывается как:

$$Q = k \cdot F \cdot \overline{\Delta t}, \quad (3.43)$$

где Q – тепловая нагрузка, Вт; k – средний коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C); $\overline{\Delta t}$ – среднелогарифмический температурный напор, °C; F – площадь рабочей теплообменной поверхности, м².

Коэффициент теплопередачи для цилиндрической системы определяется по формуле:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1 d_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{нар}} \right)^{-1}, \quad (3.44)$$

где α_1 – средний коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубок, Вт/(м²·°C); α_2 – средний коэффициент теплоотдачи от синтетического масла к наружной поверхности трубок, Вт/(м²·°C); $\lambda_{ст}$ – теплопроводность материала трубки, Вт/(м·°C); $d_{вн}$ – внутренний диаметр

трубок теплообменника, м; $d_{\text{нар}}$ – наружный диаметр трубок теплообменника, м.

Среднелогарифмический температурный напор вычисляется по соотношению:

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t'_M - t''_B) - (t'_B - t''_M)}{\ln \frac{t'_M - t''_B}{t'_B - t''_M}}. \quad (3.45)$$

Определение режима течения жидкости сводится к нахождению числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}, \quad (3.46)$$

где w – скорость течения жидкости, м/с; l – длина трубы, м; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Скорость течения жидкости в трубном и межтрубном пространстве принимается в первом приближении по рекомендациям для конкретных жидкостей [95].

Коэффициент теплоотдачи определяется из выражения для критерия Нуссельта:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}, \quad (3.47)$$

где Nu – безразмерный критерий подобия – критерий Нуссельта; λ – коэффициент теплопроводности того теплоносителя, для которого определяется коэффициент теплоотдачи, Вт/(м · °С); l – определяющий геометрический размер (диаметр трубы), м.

Определение коэффициента теплоотдачи при изменении агрегатного состояния нагреваемой жидкости (кипении) на поверхности нагрева, погруженной в большой объем жидкости [96]:

$$\alpha = 0,075 \cdot \left[1 + 10 \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{п}}} - 1 \right)^{-\frac{2}{3}} \right] \cdot \left(\frac{\lambda^2 \cdot \rho}{\mu \cdot \sigma \cdot T_{\text{н}}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot q^{\frac{2}{3}}, \quad (3.48)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – плотность пара, кг/м³; $T_{\text{н}}$ – температура насыщения (кипения), °С; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м; q – удельная тепловая нагрузка, Вт/м².

Критическая тепловая нагрузка, при которой пузырьковое кипение переходит в пленочное, определяется по уравнению [97]:

$$q_{\text{кр}} = 0,14 \cdot r \cdot \sqrt{\rho_{\text{п}}} \cdot (g \cdot \rho \cdot \sigma)^{0,25}, \quad (3.49)$$

где r – удельная теплота испарения, Дж/кг.

Критерий Нуссельта для различных жидкостей внутри труб для ламинарного режима течения:

$$Nu = 0,15 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,33} Pr_{\text{ж}}^{0,33} (Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}}) \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25} \varepsilon_l, \quad (3.50)$$

где $Re_{\text{ж}}$ – критерий Рейнольдса, определенный по средней температуре жидкости; $Pr_{\text{ж}}$ – критерий Прандтля, определенный по средней температуре жидкости; $Pr_{\text{с}}$ – критерий Прандтля, определенный по средней температуре стенки; $Gr_{\text{ж}}$ – критерий Грасгофа; ε_l – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы (при $l/d \geq 50$ $\varepsilon_l = 1$) [98].

Критерий Нуссельта при поперечном обтекании шахматного пучка труб при $Re > 10^3$:

$$Nu_{\text{ж}} = 0,4 Re_{\text{ж}}^{0,6} Pr_{\text{ж}}^{0,36} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25}. \quad (3.51)$$

Величина поверхности теплообмена определяется из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{k \Delta t}. \quad (3.52)$$

При проектировании кожухотрубчатых теплообменных аппаратов необходимо рассчитать геометрические параметры, определяющие поверхность теплообмена: число труб, схему их компоновки в трубной решетке, диаметр корпуса устройства, количество ходов в трубном и межтрубном пространствах, а также габариты патрубков для входа и выхода рабочих сред. Число труб определяют расчетным путем по формуле [98]:

$$n = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{расч}} \cdot l}, \quad (3.53)$$

где $d_{\text{расч}}$ – расчетный диаметр трубы; l – длина трубы, выбранной по ГОСТ 53677-2009.

Варианты размещения труб в трубных решетках включают два основных типа схем: ромбическую (по вершинам равносторонних треугольников либо по сторонам правильных шестиугольников); по концентрическим окружностям. При значительной плотности трубного пучка ромбическая схема позволяет минимизировать габариты трубной решетки, что обеспечивает компактность конструкции [98].

Расчет количества труб для каждой из схем выполняется по уравнениям [98]:

$$n = 3a(a - 1) + 1; \quad (3.54)$$

$$b = 2a - 1, \quad (3.55)$$

где n – общее количество труб; a – количество труб на стороне наибольшего шестиугольника; b – количество труб на диагонали наибольшего шестиугольника.

Шаг труб S задают в интервале $1,3 \dots 1,5d_n$, но не допускают его снижения ниже $d_n + 6$ мм [98].

Количество труб определяют так, чтобы значения a и b были целыми [98].

Внутренний диаметр корпуса аппарата рассчитывают по уравнениям для одноходовых аппаратов

$$D_b = S(b - 1) + 4d_n, \quad (3.56)$$

где S – шаг труб; n – число труб.

Расчетное значение диаметра корпуса округляется до ближайшего размера диаметра [99], после чего необходимо рассчитать скорость движения жидкостей в трубном и межтрубном пространстве теплообменного аппарата.

Скорость течения жидкости в трубном пространстве определяется по формуле:

$$w = \frac{4G}{\pi \cdot d_{BH}^2}. \quad (3.57)$$

где G – массовый расход теплоносителя, кг/с

Скорость течения жидкости в межтрубном пространстве определяется по формуле:

$$w = \frac{G}{f}, \quad (3.58)$$

где f – площадь проходного сечения, м^2 .

По полученным значениям скорости движения жидкостей повторно рассчитываем число Рейнольдса, коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплоотдачи. Необходимо провести уточненный расчет поверхности теплопередачи.

При расчете системы теплообменников искомой величиной является температура теплоносителя на выходе из подогревателя, которая зависит от конструкции теплообменников и режима течения сред в них.

Коэффициент полезного действия многоступенчатой системы теплообмена определяется по формуле:

$$\eta_{\text{МСТ}} = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{м}}}, \quad (3.59)$$

где $Q_{\text{в}}$ – тепло, полученное водой, кВт; $Q_{\text{м}}$ – тепло, переданное маслом воде, кВт.

В таблице 3.6 представлены расчетные параметры воды, пара и синтетического масла в каждой ступени многоступенчатой системы теплообмена.

Таблица 3.6 – Параметры воды, пара и синтетического масла в многоступенчатой системе теплообмена

Наименование параметра	Подогреватель	Испаритель	Перегреватель
Температура воды (пара) на входе, °С	104	120,212	120,212
Температура воды (пара) на выходе, °С	120,212	120,212	192
Скорость движения воды (пара), м/с	0,263	0,81	11,297

Продолжение таблицы 3.6.

Наименование параметра	Подогреватель	Испаритель	Перегреватель
Температура синтетического масла на входе, °С	126,28	140,52	388,19
Температура синтетического масла на выходе, °С	140,52	388,19	400
Скорость движения синтетического масла, м/с	0,276	0,255	0,612
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	241,44	123,0	90,96
Средний температурный напор, °С	21,27	96,0	236,72
Количество теплоты, передаваемой теплоносителем, кВт	171,60	5 503,89	201,30
Величина поверхности теплообмена, м ²	303,405	466,1	0,541
Количество труб, шт.	169	1485	19
Внутренний диаметр трубок, м	0,014	0,022	0,036
Внутренний диаметр кожуха, м	0,4	2,1	0,35
Длина трубок, м	4	4	1

Основная тепловая нагрузка приходится на зону фазового перехода, поскольку количество передаваемой теплоты в испарителе максимальное (5 503,89 кВт). Многоступенчатая система теплообмена согласована по мощности, где каждая ступень рассчитана на одинаковые тепловые потоки, но реализованы разными температурными перепадами и скоростями теплоносителей в трубном и межтрубном пространстве.

3.3.4 Паровая турбина

Паровая турбина подбирается с номинальной мощностью, достаточной для обеспечения этого показателя для гибридной электростанции с учетом КПД генератора и других потерь. Также основными факторами при выборе паровой турбины являются параметры пара, поступающего в турбину.

Паровые турбины типа ПТМ и ПТГ производства ООО «ЭЛТА» предназначены для привода электрогенераторов для собственного производства электроэнергии [100].

В таблице 3.7 представлены технические характеристики паровой турбины мощностью 500 кВт, которая может быть установлена на гибридной электростанции.

Таблица 3.7 – Технические характеристики паровой турбины

Наименование	ПТГ-500-25-13/3
Мощность, кВт	500
Номинальное давление пара до турбины, МПа	1,3
Номинальная температура пара до турбины, °С	192
Давление пара после турбины, МПа	0,3
Температура пара после турбины, °С	132
Расход пара, т/ч	9
Габаритные размеры (Д×Ш×В)	2500 × 1650 × 1400 мм

При проектировании технологической схемы необходимо учитывать, что электрическая нагрузка в сети постоянно меняется, а оборудование может выйти из строя на плановый ремонт или из-за аварии. Надежность и

гибкость энергосистемы может быть обеспечена использованием двух паровых турбин в системе гибридной электростанции. Так, при снижении электрической нагрузки одну из турбин можно остановить одну и работать на половине мощности, что экономически выгоднее, чем снижать нагрузку на одну турбину до очень низкого уровня, где ее КПД резко падает. При аварийном останове или плановом ремонте одной из турбин, вторая может продолжать работать, обеспечивая необходимую мощность.

3.3.5 Циркуляционный контур охлаждения воды

Циркуляционный контур охлаждения представляет собой замкнутую систему, которая обеспечивает циркуляцию воды для отвода избыточного тепла от пара, и состоит из конденсатора, вентиляционной градирни и циркуляционного насоса.

Основная функция конденсатора паровой турбины состоит в обеспечении полной конденсации отработавшего в турбине пара. Конденсаторы турбин выбираются по максимальному расходу и параметрам пара на выходе из турбины, а также по среднегодовой температуре и расходу охлаждающей воды. На турбину устанавливается один или два конденсатора (без резерва) [101].

Уравнение теплового баланса для конденсатора имеет вид [102]:

$$Q_k = G_k(h_k - h'_k) = G_b c_p (t''_b - t'_b), \quad (3.60)$$

где G_k – расход пара на конденсатор, кг/с; h_k – энтальпия пара, поступающего в конденсатор, кДж/кг; h'_k – энтальпия конденсата, кДж/кг; G_b – расход охлаждающей воды на конденсатор, кг/с; c_p – теплоемкость воды, кДж/(кг·°C); t'_b – температура охлаждающей воды на входе в конденсатор, °C; t''_b – температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора, °C.

Площадь поверхности охлаждения конденсатора, м^2 , определяется из уравнения теплопередачи [102]:

$$F = \frac{Q_k}{k \cdot \Delta t_{\text{ср}}}, \quad (3.61)$$

где k – средний коэффициент теплопередачи в конденсаторе, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средняя разность между температурами пара и воды для всей поверхности теплообмена конденсатора (среднелогарифмический температурный напор).

По расчетной площади поверхности охлаждения конденсатора определяем марку конденсатора из номенклатуры оборудования.

В таблице 3.8 представлены характеристики конденсатора ХВ 9.1 [103], который может быть использован в предлагаемой схеме гибридной электростанции.

Таблица 3.8 – Технические характеристики конденсатора

Модель	ХВ 9,1
Расход охлаждающей воды, кг/ч	170 000
Расход пара, поступающего в конденсатор, кг/ч	5600
Поверхность охлаждения, м^2	23,1
Давление в конденсаторе, МПа	0,1
Максимальное давление пара, поступающего в конденсатор, МПа	0,3
Давление охлаждающей воды в конденсаторе, МПа	0,3
Температура конденсата при выходе из конденсатора, $^\circ\text{С}$	80
Температура охлаждающей воды при входе, $^\circ\text{С}$	32
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	$1765 \times 810 \times 1140$

Вентиляторные градирни применяются в системах оборотного водоснабжения, требующих устойчивого и глубокого охлаждения воды, при высоких удельных гидравлических и тепловых нагрузках, при необходимости сокращения объема строительных работ, маневренного регулирования температуры охлажденной воды средствами автоматизации. [104].

Открытые градирни серии НМР могут применяться для охлаждения воды в системах промышленного кондиционирования и оборотного водоснабжения [105] гибридной электростанции. Работа градирен НМР осуществляется по принципу «противотока», что обеспечивает максимальную эффективность теплообмена. Воздушный поток создается при помощи осевого вентилятора, расположенного в верхней части градирни. Диапазон температуры охлаждения воды: от 90°С до 23°С.

Технические характеристики градирни представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Технические характеристики вентиляторной градирни

Модель		НМР 5х5
Номинальная мощность двигателя, кВт		02.фев
40/30/24 °С	Мощность, кВт	348
	Расход воды, м3/ч	30
35/30/25 °С	Мощность, кВт	232
	Расход воды, м3/ч	40
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм		1500 × 1500 × 3250
Высота впуска воды, мм		2280

Циркуляционные насосы обеспечивают подачу охлаждающей воды к конденсатору турбины и циркуляцию воды в системах оборотного водоснабжения с градирнями. Число циркуляционных насосов принимается не менее двух с суммарной подачей, равной расчетному расходу

охлаждающей воды. Их производительность выбирают по летнему режиму, когда температура охлаждающей воды высокая и ее расход примерно в два раза больше, чем в зимний период, при низкой температуре воды [106]. Расчетный расход охлаждающей воды для выбора циркуляционных насосов, т/ч:

$$G_{\text{цн}} = k \cdot G_{\text{в}}, \quad (3.62)$$

где k – коэффициент, учитывающий расход воды на маслоохладители, водородо–воздухоохладители; $G_{\text{в}}$ – расход охлаждающей воды через конденсатор, определяемый из теплового баланса конденсатора при максимальном значении расхода пара в конденсатор.

В таблице 3.10 приведены технические характеристики циркуляционного насоса, который может быть установлен в предлагаемой схеме гибридной электростанции.

Таблица 3.10 – Технические характеристики циркуляционного насоса

Название	Насос циркуляционный промышленный DAB BPH 180/360.80 T
Вид насоса	Центробежный
Конструкционный тип	Вертикальный / горизонтальный
Максимальный расход, м³/ч	55
Максимальная потребляемая мощность, кВт	1,67
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	259 × 404 × 404

Водоподготовительная установка (ВПУ) гибридной электростанции предназначена для восполнения потерь пара и конденсата питательной воды.

При расчете производительности водоподготовительных установок для приготовления добавочной питательной воды учитывается, что при номинальной паропроизводительности устанавливаемых котлов внутристанционные потери пара и конденсата не должны превышать 2% [107].

Производительность ВПУ определяется по формуле:

$$G_{\text{ВПУ}} = G_{\text{п}} \cdot 0,02. \quad (3.63)$$

По расчетному значению производительности подбираем блочную модель ВПУ из номенклатуры оборудования, характеристики которой представлены в таблице 3.11 [108].

Таблица 3.11 – Технические характеристики водоподготовительной установки

Модель	ВПУ-1,0
Производительность, м ³	1
Давление воды перед насосом, МПа, не менее	0,025
Давление воды на выходе из насоса, МПа	0,4 -0,6
Температура воды, °С, не более	40
Рабочая среда	Вода
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	1765 × 865 × 1605

3.3.6 Блок подготовки топлива

Блок топливоподготовки (рисунок 3.5) состоит из бункера сырья 1, измельчителя 2, смесителя 3, экструдера 4, бункера хранения 5 биотопливных гранул. Блок топливоподготовки работает следующим

образом: сырье из бункера 1 подается в измельчитель 2, далее измельченное до 1-2 мм сырье поступает в смеситель 3, в который вместе с измельченным биотопливом поступает часть отработавшего пара из паровой турбины для увлажнения топлива и связующее вещество – меласса. Готовая к формованию смесь поступает в экструдер 4, где происходит гранулирование биотоплива. Во время транспортировки биотопливных гранул от экструдера 4 до бункера хранения 5 осуществляется их естественная сушка [65].

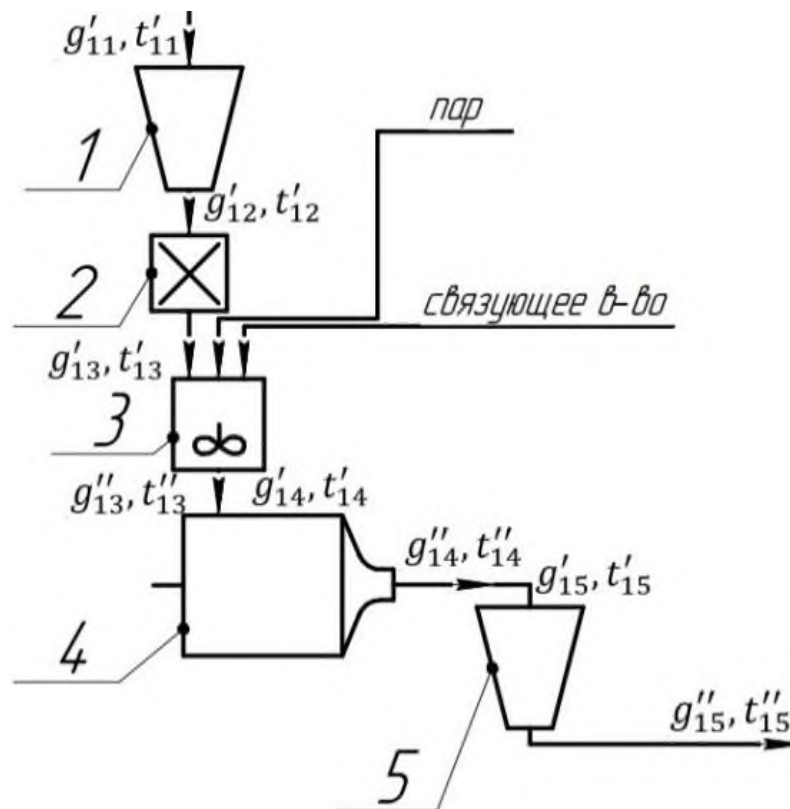


Рисунок 3.5 – Блок подготовки топлива: 1 - бункера сырья, 2 - измельчитель, 3 - смеситель, 4 - экструдер, 5 - бункер хранения гранулированного биотоплива.

Блок подготовки топлива представляет собой комплекс оборудования, обеспечивающего переработку сырья в готовый продукт (биотопливные гранулы). В его состав входят три ключевых агрегата: экструдер, лопастной горизонтальный смеситель и ножевой измельчитель. Подбор

технологического оборудования блока подготовки топлива выполнен на основе комплексных расчетов, учитывающих требуемую производительность системы по отношению к расходу топлива биотопливного котла. Такой подход обеспечивает согласованную работу всех элементов технологической схемы и исключает снижение общей эффективности.

Подбор каждого элемента блока подготовки топлива выполняется по условию:

$$P_{об} \geq k_{рез} \cdot B, \quad (3.64)$$

где: $P_{об}$ – паспортная производительность оборудования, кг/ч; $k_{рез}$ – коэффициент резерва (не более 1,1–1,2); B – расчетный часовой расход топлива, кг/ч.

Для заданных параметров котла рассчитывается требуемая производительность каждого узла с учетом технологических потерь и коэффициента резерва. Из номенклатуры оборудования выбираются модели, удовлетворяющие условию $P_{об} \geq k_{рез} \cdot B$.

Ниже подробно рассмотрены назначение, особенности и технические характеристики (таблицы 3.12 – 3.14) каждого элемента блока подготовки топлива.

Измельчитель ножевой Glater-3 предназначен для мелкого дробления вязких и сухих продуктов (растительного сырья, сыпучих материалов, пластика, деревянной щепы, картона, стройматериалов, промышленных отходов и т.д.) [109].

Принцип работы: сырье загружается в бункер или подается непосредственно в камеру дробления. Продукт разрушается вращающимися ножами. Фракция регулируется калибровочным ситом (в комплекте сита 1, 5 и 10 мм), вылет осколков предотвращается шибером-заглушкой. При

использовании аспирационных установок или фильтр-мешков измельчитель не пылит.

Таблица 3.12 – Основные технические характеристики измельчителя

Название	Измельчитель Glater 3
Производительность, кг/ч	до 1000 кг/час
Частота вращения ротора	2900 об/мин
Скорость ножа (энергия удара)	210 км/ч (900 Дж)
Размеры фракции на выходе	от 80 микрон до 10 мм (регулируется ситом)
Мощность двигателя, кВт	3
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	550 × 600 × 1450

Лопастной горизонтальный смеситель ГС-1000 предназначен для изготовления гранул путем смешивания сыпучих продуктов (травы, сена, соломы и т.д.), а также сухих и жидких (до 15 % от общей массы) компонентов [110].

Таблица 3.13 – Основные технические характеристики смесителя

Название	Лопастной горизонтальный смеситель ГС-1000
Производительность, кг/ч	до 1000 кг/час
Время смешивания, мин.	2-5
Мощность двигателя, кВт	1,5-15
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	2200 × 1100 × 1300

Принцип работы: измельченное растительное сырье загружается в цилиндрический корпус смесителя. Вращающийся вал с радиально закрученными лопастями создает интенсивное перемешивание. Лопасты, отклоненные от оси вращения, обеспечивают равномерное распределение компонентов, однородность смеси до 95–98 %, предотвращение расслоения фракций даже при разнице в плотности и размере частиц. Также в процессе смешивания вводятся связующее вещество и часть отработанного пара из турбины (до 15 % от общей массы). По завершении цикла смесь саморазгружается рабочими органами через выгрузочное отверстие.

Экструдер серии ЭМ-1000Био предназначен для производства гранул путем экструдирования измельченного растительного сырья (пшеницы, ржи, ячменя, кукурузы, гороха) [111].

Таблица 3.14 – Основные технические характеристики экструдера

Название	ЭМ – 1000Био
Производительность, кг/ч	800-1100
Давление, МПа	15-25
Мощность двигателя, кВт	93,5
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	2680 × 2065 × 1460

Принцип работы: сырье (влажная смесь измельченных растительных отходов со связующим веществом) загружается в приемный бункер с ворошителем, который предотвращает зависание материала. Шнек перемещает сырье вдоль ствола экструдера, одновременно уплотняя и перемешивая его. В процессе движения сырье подвергается механическому воздействию (сжатие, сдвиг), термическому воздействию (нагрев за счет трения), воздействию высокого давления (15–25 МПа). Смесь продавливается через матрицу (фильеру) с отверстиями заданного размера.

При выходе из матрицы из-за резкого падения давления происходит испарение влаги. Готовый продукт охлаждается, осушается естественным способом и затвердевает при транспортировке в бункер хранения гранулированного биотоплива.

3.3.7 Общая система уравнений

Взаимосвязи между параметрами и технологическими характеристиками компонентов энергоустановки сводятся к компактному набору основных показателей, обеспечивающих унифицированное описание разнородных элементов и согласованное моделирование взаимосвязанных процессов. Расчеты выполнены с использованием авторской программы для ЭВМ «Расчетный модуль для определения энергетических показателей гибридной электростанции», в которой учтены ограничения и допущения математической модели [112].

Уравнение энергетического баланса параболического солнечного коллектора имеет вид:

$$A \cdot E \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot (\theta) = D_{1T} \cdot c_{p1T} \cdot (T_{1T}'' - T_{1T}') + \\ + \varepsilon_{\text{абс}} \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_{\text{абс}}^4 - T_{\text{неба}}^4) + A \cdot U_L \cdot (T_{\text{абс}} - T_{\text{окр}}) \quad (3.65)$$

где $\eta_{\text{опт}}$ – оптический КПД, A – площадь апертуры, м^2 ; E – солнечная инсоляция, $\text{Вт}/\text{м}^2$; (θ) – модификатор угла падения; D_{1T} – массовый расход теплоносителя, $\text{кг}/\text{с}$; T_{1T}' – температура теплоносителя на входе в коллектор, К ; T_{1T}'' – температура теплоносителя на выходе из коллектора, К ; c_{p1T} – 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, K , принимается равной температуре окружающей среды; U_L – коэффициент тепловых потерь за счет конвекции и теплопередачи при заданной скорости ветра, $Вт/(м^2 \cdot K)$, задается техническими характеристиками солнечного коллектора; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, K .

Ключевым показателем расчета энергоустановки в целом является температура на выходе из солнечного коллектора, которая определяется по следующей формуле:

$$T_{1T}'' = T_{1T}' + \frac{A \cdot E \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot (\theta) - \varepsilon_{\text{абс}} \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_{\text{абс}}^4 - T_{\text{неба}}^4) - A \cdot U_L \cdot (T_{\text{абс}} - T_{\text{окр}})}{D_{1T} \cdot c_{p1T}}. \quad (3.66)$$

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

$$B = \frac{D_{1T} [c_{p2T} \cdot (t_{2T}'' - t_{1T}'') - c_{p1T} \cdot (t_{1T}'' - t_{1T}')] }{Q_{\text{н}}^p \cdot \eta_{\text{к}}}, \quad (3.67)$$

где c_{p2T} – теплоемкость синтетического масла в трубопроводах котла, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$; t_{2T}'' – температура синтетического масла на выходе из котла, $^\circ C$; t_{1T}' – температура синтетического масла на выходе из многоступенчатой системы теплообмена, $^\circ C$; $Q_{\text{н}}^p$ – располагаемое тепло 1 $кг$ твердого топлива, $кДж/кг$; $\eta_{\text{к}}$ – КПД котла, %.

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

$$t'_{1T} = t''_{3T} = t'_{3T} - \frac{G_B \cdot c_B (t_s - t'_3) + G_B \cdot r + G_{\Pi} \cdot (h''_3 - h'_3)}{G_M \cdot c_M}. \quad (3.68)$$

где $G_B = G_{\Pi}$ – массовый расход воды (пара) через многоступенчатую систему теплообмена, кг/с; c_B – теплоемкость воды, кДж/(кг·°C); t'_3 – температура воды на входе в теплообменник, °C; t_s – температура насыщения воды, °C; r – скрытая теплота парообразования, кДж/(кг·°C); h''_3 – энтальпия пара на выходе из перегревателя теплообменника, кДж/(кг·°C); h'_3 – энтальпия воды на входе в перегреватель теплообменника, кДж/кг; G_M – массовый расход синтетического масла через многоступенчатую систему теплообмена, кг/с; c_M – средняя теплоемкость синтетического масла, кДж/(кг·°C); t'_{3T} – температура синтетического масла на входе в многоступенчатую систему теплообмена, °C.

Электрический КПД гибридной электростанции не является лучшим параметром 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:

$$\eta_{ЭС} = \eta_{СК} \cdot \eta_K \cdot \eta_{МСТ} \quad (3.69)$$

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

Математическая модель имеет следующие ограничения:

- температура синтетического высокотемпературного масла не должна превышать температуры кипения, $t'_{3T} < t_{кип}$;

- температура пара на выходе из многоступенчатой системы теплообмена не должна превышать требуемую температуру пара на входе в паровую турбину, $t_3'' < t_4'$;

- давление пара на выходе из многоступенчатой системы теплообмена не должно превышать требуемого давления пара на входе в паровую турбину, $p_3'' < p_4'$;

- объем бункера хранения гранулированного биотоплива, определяющий нагрузку на топливные гранулы, не должен превышать трехчасового запаса топлива при работе котла с номинальной производительностью;

- влажность биотопливных гранул на входе в топку котла не должна превышать 60%.

Математическая модель имеет следующие допущения:

- модификатор угла падения (θ) зависит от угла падения θ . В исследовании угол падения принимается равным 0° , а соответствующее значение модификатора угла падения равным 1.

- в каждой ступени многоступенчатой системы теплообмена (подогреватель, испаритель, перегреватель) свойства воды и синтетического высокотемпературного масла определяются при средней логарифмической температуре поступающих теплоносителей;

- в контуре солнечных коллекторов свойства синтетического высокотемпературного масла определяются при средней логарифмической температуре теплоносителя;

- упрочнение топливных гранул происходит естественным образом при их транспортировке на конвейере от экструдера до бункера хранения.

Выводы по третьей главе

На основе анализа параметров работы элементов технологической схемы автономной гибридной электростанции разработана математическая модель, состоящая из 7 взаимосвязанных между собой уравнений, позволяющая определить расход топлива в котел, температуру синтетического высокотемпературного масла на выходе из солнечного коллектора, температуру синтетического высокотемпературного масла на входе в солнечный коллектор, который также равен температуре синтетического высокотемпературного масла на выходе из многоступенчатой системы теплообмена.

ГЛАВА IV. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

4.1. Определение эффективности работы гибридной электростанции при изменении условий эксплуатации

Для определения необходимой мощности гибридной электростанции необходимо знать нагрузки отдельных энергопотребителей. В сельском хозяйстве можно выделить следующих основных потребителей: жилые дома рабочих и служащих; производственные потребители (животноводческие фермы, теплицы, хранилища сельскохозяйственной продукции, мельницы, гаражи); предприятия АПК (молокозаводы, птицефабрики, маслоэкстракционные заводы) и прочие [5].

В таблице 4.1 представлены основные характеристики нагрузок сельскохозяйственных потребителей [5].

Таблица 4.1 – Электрические нагрузки сельскохозяйственных потребителей

Объект	Дневной максимум нагрузки, кВт	Вечерний максимум нагрузки, кВт	Установленная мощность, кВт
Коровник привязного содержания с механическим доением, уборкой навоза и электронагревом на 1000 коров	10	10	20-30
Кормоцех фермы КРС на 800-1000 голов	50	50	130
Зернохранилище с передвижными механизмами вместимостью 1000...2000 т.	20	10	60

Продолжение таблицы 4.1

Объект	Дневной максимум нагрузки, кВт	Вечерний максимум нагрузки, кВт	Установленная мощность, кВт
Семеновохранилище вместимостью 1000 т.	80	80	100
Склад минеральных удобрений	12	1	16
Склад нефтепродуктов и гараж	20	10	45
Административное здание на 15-25 рабочих мест	15	8	-
Жилой дом	4,1	7	-
Собственные нужды гибридной электростанции	100	115	115
ИТОГО			496

Суммарная нагрузка энергопотребления для всех указанных в таблице 4.1 потребителей 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 [5].

На рисунке 4.1 представлена принципиальная схема энергетического комплекса сельскохозяйственного предприятия.



Рисунок 4.1 – Принципиальная схема энергетического комплекса сельскохозяйственного предприятия

Интеграция гибридной электростанции в инфраструктуру сельскохозяйственного предприятия не только решает задачу энергообеспечения, но и создает условия для повышения общей энергоэффективности хозяйства, снижения углеродного следа и повышения экономической устойчивости производства.

Состав топливных гранул, используемых в качестве топлива, напрямую влияет на эффективность генерации энергокомплекса [113].

На графике (рисунок 4.2) отражена динамика расхода разных видов биотоплива на объекте гибридной генерации, дополненном технологиями концентрированной солнечной энергии (CSP). Данные построены применительно к годовой интенсивности солнечной радиации, типичной для климатических условий Республики Татарстан [5].

Интенсивность солнечного излучения в Республике Татарстан определена в соответствии с данными Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA).

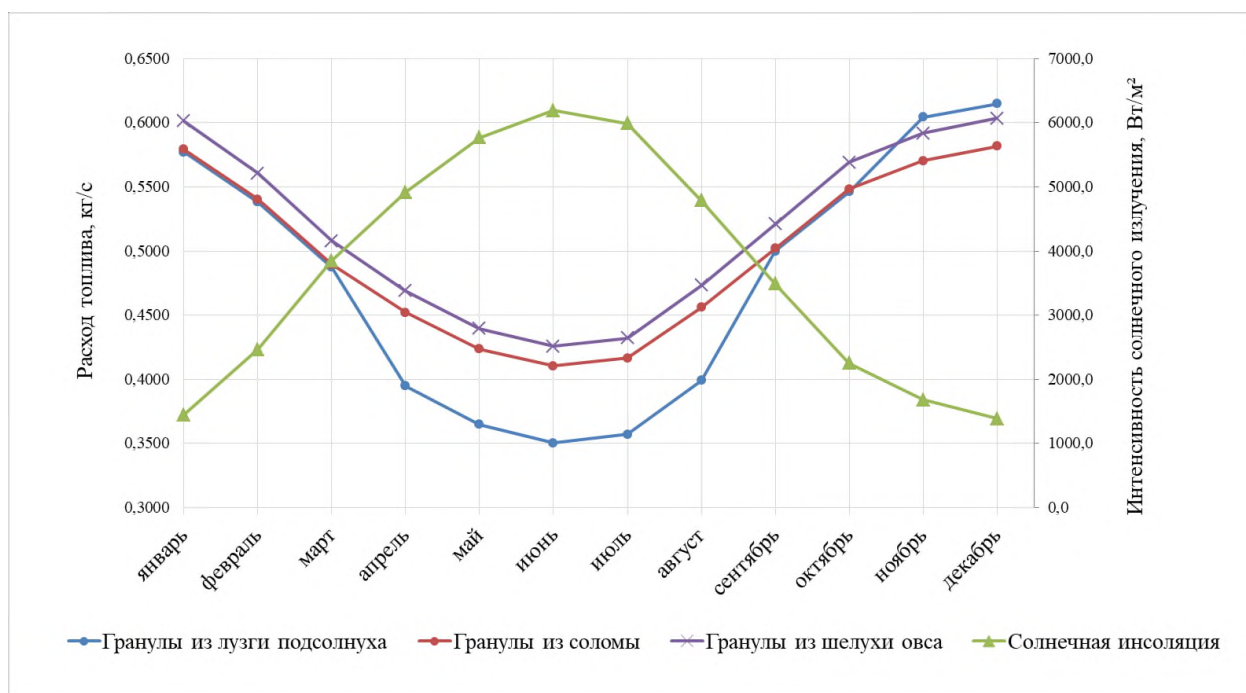


Рисунок 4.2 – Расход топлива при сжигании биотопливных гранул различного состава

Расход топлива имеет выраженную сезонную зависимость: минимум расхода приходится на летние месяцы (июнь–август), что коррелирует с пиком солнечной инсоляции; максимум расхода наблюдается в зимние месяцы (декабрь, январь, февраль), когда интенсивность солнечного излучения минимальна [113]. При использовании гранул из соломы средний расход топлива сокращается с 0,8577 до 0,4975 кг/с в течение года, что обеспечивает снижение суммарного потребления до 15 990,2 тонн. Аналогичный эффект наблюдается при сжигании гранул из шелухи овса: при подключении солнечного контура расход топлива снижается с 0,8901 до 0,5163 кг/с, общий расход биотоплива составляет 16 593,8 тонн в год. В связи с более высокой теплотой сгорания наименьший расход топлива из рассмотренных видов биотоплива оказался у гранул из лузги подсолнуха и составил 0,8542 кг/с. При подключении солнечных коллекторов в контур котла расход топлива снизился до 0,4778 кг/с, а годовое потребление составило 15 358,4 тонн.

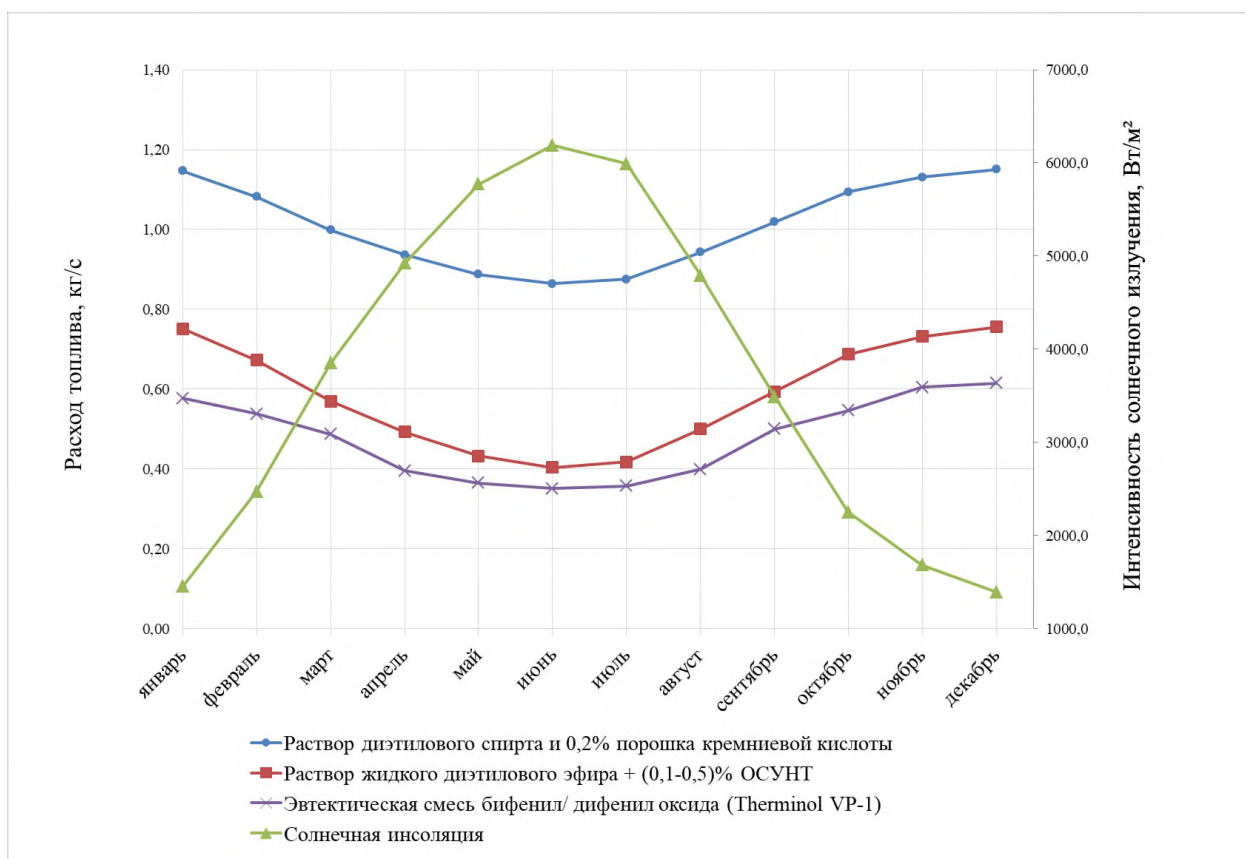


Рисунок 4.3 – Расход топлива при использовании различных теплоносителей в системе солнечного коллектора и термомасляного котла на биотопливе

Расход топлива в термомасляном котле на биотопливе имеет прямую зависимость от теплоемкости теплоносителя, используемом в системе (рисунок 4.3). Чем больше теплоноситель нагревается в системе параболических солнечных коллекторов, тем меньше топлива затрачивается на подогрев теплоносителя в котле [113]. Таким образом, использование раствора диэтилового спирта и 0,2% порошка кремниевой кислоты позволяет снизить расход топлива с 1,3252 до 1,0105 кг/с при общем расходе топлива 31 950,5 тонн в год. При использовании в качестве теплоносителя раствор жидкого диэтилового эфира с добавлением 0,1-0,5% ОСУНТ расход биотоплива снижается с 1,4032 до 0,5839 кг/с. Общий расход топлива в год составит 18 459,4 тонн. Эвтектическая смесь бифенил/дифенил оксида (Therminol VP-1) позволяет уменьшить расход топлива с 0,8542 кг/с до 0,4778 кг/с. Общий расход топлива в год составит 15 358,4 тонн.

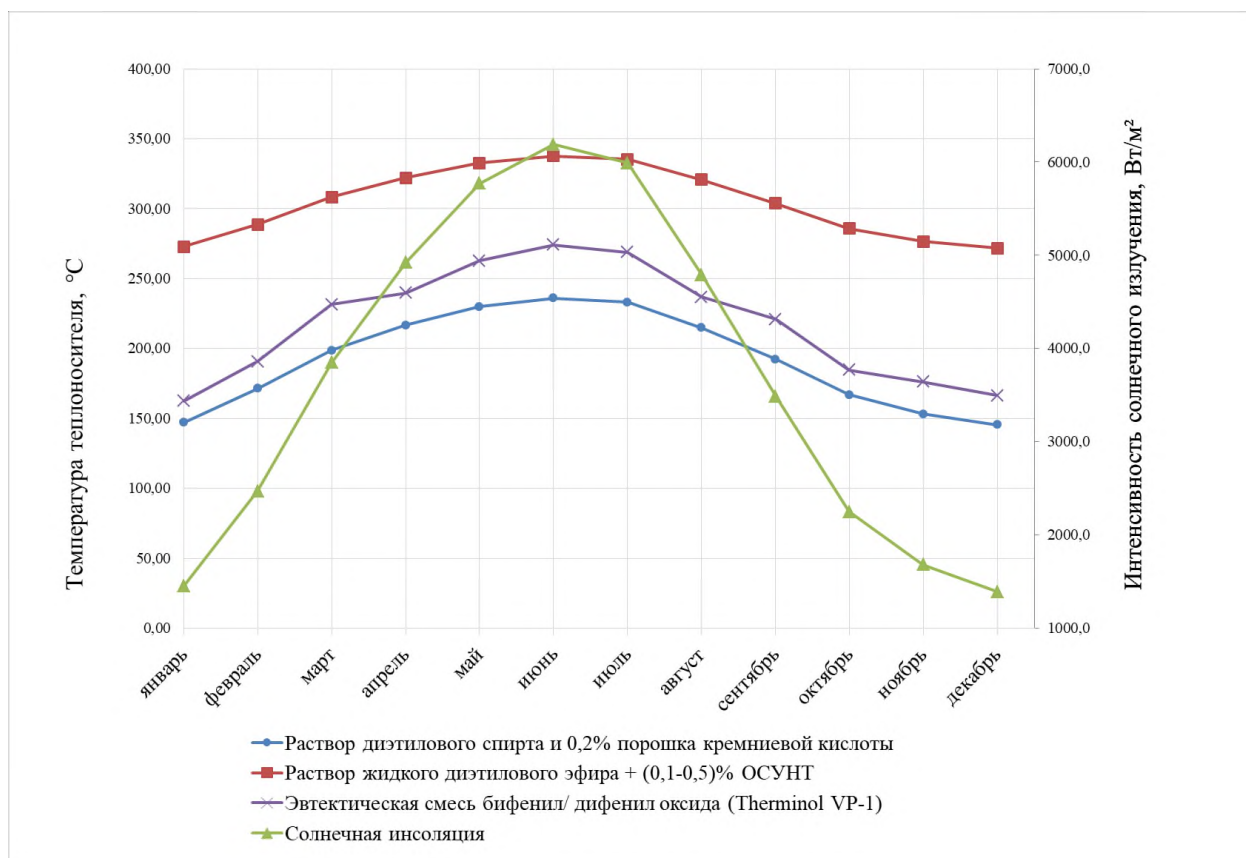


Рисунок 4.4 – Изменение температуры различных теплоносителей в системе солнечного коллектора в зависимости от солнечной инсоляции

Температура теплоносителей имеет прямую зависимость от интенсивности солнечного излучения в течение календарного года (рисунок 4.4.) [113]. Раствор жидкого диэтилового эфира с добавлением 0,1-0,5% ОСУНТ 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% ОСУНТ 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 °С.

В таблице 4.2 представлены численные результаты расчета ежемесячного и годового расхода топлива при сжигании топливных гранул различного состава [113].

Таблица 4.2 – Суммарный расход топлива за год

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	ИТОГО
Гранулы из лузги подсолнечника, тонн	1 545,5	1 441,4	1 305,4	1 057,8	976,9	938,6	956,6	1 069,0	1 339,2	1 462,8	1 618,8	1 646,6	15 358,4
Гранулы из соломы, тонн	1 551,8	1 447,2	1 310,8	1 210,7	1 134,7	1 099,2	1 115,7	1 221,4	1 344,7	1 468,7	1 527,5	1 557,9	15 990,2
Гранулы из шелухи овса, тонн	1 610,4	1 501,9	1 360,2	1 256,4	1 177,5	1 140,7	1 157,8	1 267,5	1 395,5	1 524,2	1 585,1	1 616,7	16 593,8

Годовой расход биотопливных гранул имеет ярко выраженную сезонную зависимость, где максимальный расход топлива наблюдается в зимний период, а минимальный – в летний период. Гранулы из шелухи овса расходуются в наибольшем объеме, что обусловлено их более низкой теплотворной способностью. Гранулы из лузги подсолнечника демонстрируют наименьший годовой расход, что подтверждает их более высокую энергетическую эффективность. Выбор вида биотопливных гранул должен учитывать не только их доступность, но и энергетическую эффективность, которая напрямую влияет на годовой расход.

Эффективность работы гибридной электростанции определялась по рекомендациям [9] и составила 57,73%.

На рисунке 4.5 представлена диаграмма, отражающая помесечный баланс и распределение тепловой энергии от солнечного коллектора и биотоплива.

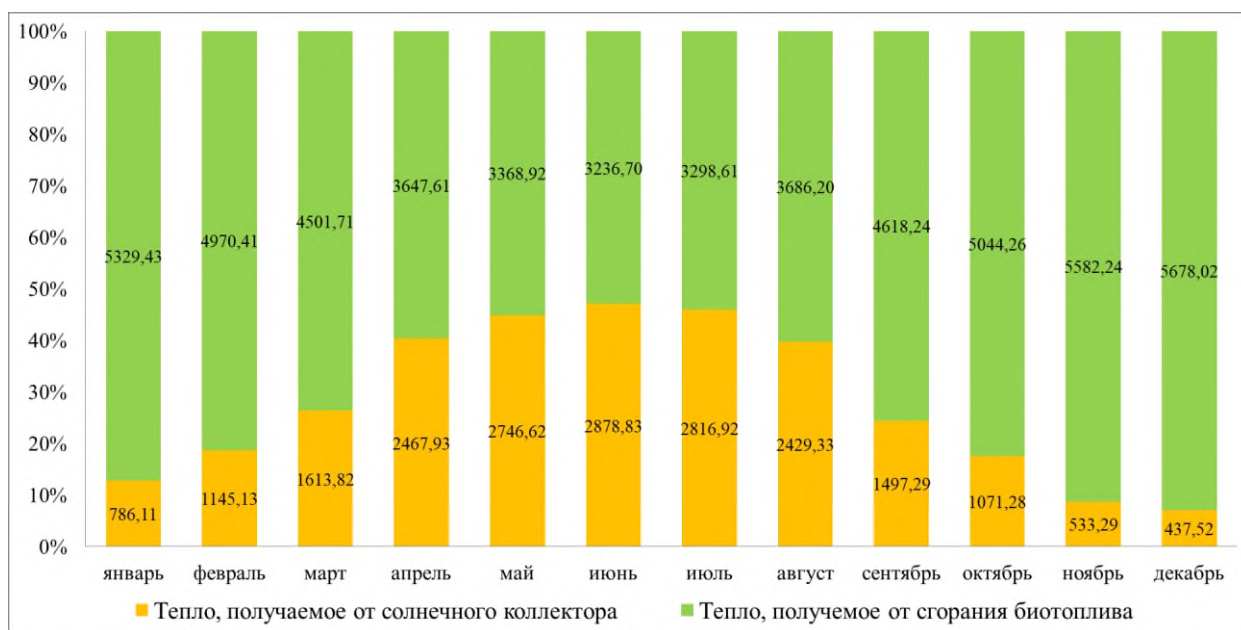


Рисунок 4.5 – Распределение тепловой энергии по источникам

Годовой энергобаланс гибридной электростанции отражает закономерное перераспределение нагрузки между источниками в зависимости от сезона. 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 надежности энергоснабжения.

4.2. Оценка эффективности сельскохозяйственного энергетического комплекса при внедрении малых гибридных электростанций

Для определения себестоимости электроэнергии, генерируемой на гибридной электростанции, необходимо обозначить затраты на эксплуатацию, которые включают в себя следующие показатели [114].

1. Затраты на заработную плату работников станции, рассчитываемые как сумма оплаты труда каждого сотрудника станции (таблица 4.3) за определенный период, тыс. руб.:

$$Z_{\text{пл}} = \sum_{i=1}^N Z_{\text{пл}i}, \quad (4.1)$$

где N – количество сотрудников, чел.; $Z_{\text{пл}i}$ – заработная плата отдельного сотрудника, тыс. руб.

Таблица 4.3 – Заработная плата работников гибридной мини-ТЭС

№	Должность сотрудника	Количество сотрудников, чел.	Оплата труда сотрудника на должности, тыс. руб.
Сменный персонал			
1	Машинист энергоблока	3	80

Тогда затраты на оплату труда сотрудников станции в год составит:

$$Z_{\text{пл}} = 12 \cdot 3 \cdot 80 = 2\,880,00 \text{ тыс. руб.}$$

2. Помимо затрат на заработную плату, необходимо учитывать отчисления по единому социальному налогу, которые составляют:

$$З_{отч} = \frac{З_{пл} \cdot K_{отч}}{100}, \quad (4.2)$$

где $K_{отч}$ – доля отчислений по единому тарифу включающие в себя отчисления в ФНС на обязательное пенсионное, медицинское страхование и страхование на случай болезни и материнства, %.

$$З_{отч} = \frac{2\,880,00 \cdot 30,2}{100} = 869,76 \text{ тыс. руб.}$$

3. Для сохранения работоспособного состояния оборудования необходимо ежегодно проводить его диагностику, техническое обслуживание и ремонт. На амортизационные нужды отчисления закладываются в общую сумму текущих затрат и рассчитывается следующим образом:

$$C_{ao} = \frac{K_{об} \cdot H_{ам}}{100}, \quad (4.3)$$

где $K_{об}$ – стоимость оборудования (таблица 4.4), тыс. руб.; $H_{ам}$ – годовая норма амортизации (таблица 4.5), %.

Общая стоимость оборудования гибридной малой электростанции станции составляет:

$$K_{об} = 107\,059,00 \text{ тыс. руб.}$$

Сумма текущих затрат на эксплуатацию гибридной электростанции определяется по формуле:

$$C_{сум} = З_{пл} + З_{отч} + C_{ao} + C_{ТОиР}, \quad (4.4)$$

где $C_{\text{ТОиР}}$ - затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования гибридной электростанции, которая составляет от 3% до 6% от общего объема первоначальных капитальных затрат.

$$C_{\text{ТОиР}} = K_{\text{об}} \cdot 0,05 = 107\,059,00 \cdot 0,05 = 5\,352,95 \text{ тыс. руб.} \quad (4.5)$$

$$C_{\text{сум}} = 2\,880,00 + 869,76 + 3\,334,17 + 5\,352,95 = 12\,436,88 \text{ тыс. руб.}$$

Себестоимость генерируемой на станции энергии определяется по формуле:

$$C = \frac{C_{\text{сум}}}{N_i}, \quad (4.6)$$

где N_i – количество отпущенной энергии за отчетный период, кВт·ч.

Себестоимость производства электрической энергии будет равна:

$$C_{\text{э}} = \frac{C_{\text{сум}}}{N_{\text{э}}} = \frac{12\,436\,880}{500 \cdot 8760} = 2,84 \text{ руб}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$$

После определения себестоимости производимой энергии на станции становится возможным рассчитать срок окупаемости вложенных средств, рентабельности отпуска электрической энергии со станции, а также значение чистой прибыли, получаемой при продаже продукции энергопотребителям.

Стоимость потребляемой электрической энергии, вырабатываемой гибридной электростанцией, составит:

$$\Pi_{\text{э}} = C_{\text{э}} \cdot Q_{\text{э}} \cdot T_{\text{ТЭС}} \cdot k_{\text{с}}, \quad (4.7)$$

где $k_{\text{с}}$ – коэффициент использования электрической мощности в течение суток.

$$P_3 = 2,84 \cdot 500 \cdot 8\,760 \cdot 0,7 = 8\,707,44 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 4.4 – Стоимость оборудования гибридной электростанции

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования, шт.	Стоимость единицы оборудования, тыс. руб.
1	Блок подготовки топлива	1	2 700,00
2	Солнечные коллекторы	8	500,00
3	Термомасляный котел на биотопливе ТМУ-МТ	1	38 500,00
4	Масло-водяной теплообменник	1	3 000,00
5	Паровая турбина ПГТ-500-25-13/3	2	6 000,00
6	Конденсатор отработавшего пара	2	11 000,00
7	Вентиляторная градирня	1	150,00
8	Циркуляционный насос	2	200,00
9	Водоподготовительная установка	1	225,00
10	Деаэратор ДА-5/4	1	1 500,00
11	Питательный насос	1	900,00
12	Фильтр рукавный импульсный ФРИ (ФРИП)-120-П1-2-1	1	400,00
13	Прочее вспомогательное оборудование, до 20% от стоимости основного оборудования	-	11 555,00
14	Разработка проектной документации, монтажные работы, до 30% от стоимости оборудования	1	21 069,00
	Стоимость оборудования		107 059,00

Таблица 4.5 – Годовая норма амортизации оборудования гибридной электростанции

№ п/п	Наименование оборудования	Нормативный срок эксплуатации, лет	Годовая норма амортизации, %	Отчисления на амортизацию
1	Блок подготовки топлива	20	5	135,00
2	Солнечные коллекторы	15	6,7	33,50
3	Термомасляный котел на биотопливе ТМУ-МТ	40	2,5	962,50
4	Масло-водяной теплообменник	15	6,7	201,00
5	Паровая турбина ПГТ-500-25-13/3	30	3,3	198,00
6	Конденсатор отработавшего пара	15	6,7	737,00
7	Вентиляторная градирня	20	5	7,50
8	Циркуляционный насос	15	6,7	13,40
9	Водоподготовительная установка ВПУ-1.0	15	6,7	15,08
10	Деаэратор ДА-5/4	30	3,3	49,50
11	Питательный насос	15	6,7	60,30
12	Фильтр рукавный импульсный ФРИ (ФРИП)-120-П1-2-1	6	16,7	66,80
13	Прочее вспомогательное оборудование	15	6,7	854,59
	Амортизационные отчисления			3 334,17

По данным АО «Сетевая компания» ориентировочная расчетная стоимость технологического присоединения в соответствии с

утвержденными приказом ФАС России от 30.06.2022 No 490/22 Методическими указаниями по определению размера платы за технологическое присоединение к электрическим сетям, и в соответствии с утвержденными ставками платы за технологическое присоединение в 2026 году на объект энергопотребления 371 кВт в сельской местности со строительством кабельных линий в траншее протяженностью до 2 км составит 22 691 637,66 руб. [115].

Договорная цена отпуска тепловой и электрической энергии будет определяться как средняя по рынку для Республики Татарстан. Так, тариф для электропотребителей составляет $\Pi_{\text{э}} = 4,29$ руб./(кВт·ч) [116].

Стоимость электроэнергии, отпускаемой от централизованной энергосистемы, с учетом платы за подключение к электросетям:

$$C_{\text{центр.э}} = K_{\text{подкл.}} \cdot k_{\text{подкл.}} + \Pi_{\text{э}} \cdot Q_{\text{э}} \cdot T \cdot k_{\text{с}}, \quad (4.8)$$

где $k_{\text{подкл.}}$ – коэффициент, учитывающий амортизационные отчисления на электрическое оборудование, которое составляет 18-30 %.

$$C_{\text{центр.э}} = 22\,691,64 \cdot 0,18 + 4,29 \cdot 500 \cdot 8\,760 \cdot 0,7 = 17\,237,64 \text{ тыс. руб.}$$

Прибыль собственной выработки электроэнергии гибридной мини-ТЭС рассчитывается как разница между затратами на покупку электроэнергии и текущими затратами на эксплуатацию станции:

$$\Pi_{\text{чист}} = (1 - k_{\text{н}}) \cdot (\Pi - C_{\text{сум}}), \quad (4.9)$$

$$\Pi_{\text{чист}} = (1 - 0,2) \cdot (17\,237,64 - 12\,436,88) = 3\,840,61 \text{ тыс. руб.}$$

где $k_{\text{н}}$ – доля прибыли, которая идет на уплату налога на прибыль.

Срок окупаемости для автономных источников энергоснабжения рассчитывается как отношение капитальных затрат к разности между стоимостями энергии, отпускаемой от централизованной энергосистемы (с учетом платы за подключение к электросетям и стоимости самой энергии) и вырабатываемой на объекте:

$$T = \frac{K}{C_{\text{центр.э}} - П_{\text{э}}}, \quad (4.10)$$

$$T = \frac{107\,059,00}{17\,237,64 - 8\,707,44} = 12 \text{ лет } 6 \text{ месяцев.}$$

Таким образом, срок окупаемости при капитальных вложениях, равных 107 059 тыс. руб., составляет 12 лет 6 месяцев для гибридной электростанции на биотопливе номинальной электрической мощностью 500 кВт, при этом в качестве топлива используется сельскохозяйственные отходы местного производства.

Энергетический комплекс Республики Татарстан является одним из самых мощных в России. Основной объем генерации электроэнергии и тепла обеспечивают три крупнейшие компании: АО «Татэнерго», АО «ТГК-16» и ООО «Нижекамская ТЭЦ» (дочернее предприятие ПАО «Татнефть»).

Состав АО «Татэнерго» включает пять электростанций (3 ТЭЦ, 1 ГРЭС, 1 ГЭС), а также три предприятия тепловых сетей. К последним относятся Казанские, Набережночелнинские и Нижнекамские тепловые сети [117].

Установленная электрическая мощность АО «Татэнерго» по состоянию на 01.01.2026 года составила 5 427,9 МВт, установленная тепловая мощность - 7 625 Гкал/час.

Основными видами деятельности АО «Татэнерго» являются производство электрической и тепловой энергии и передача и реализация тепловой энергии на розничном рынке.

Таблица 4.6 – Информация об используемом топливе на электрических станциях АО «Татэнерго» за 2024 год

Наименование электростанции	Вид используемого топлива	Удельный расход условного топлива	Общий расход топлива электростанции за отчетный период
Казанская ТЭЦ-1	Газ	252,4 г/кВт·ч	592 406 тыс. м ³
	Мазут		5 тонн
РК «Горки» (КТЭЦ-1)	Газ		58 728 тыс. м ³
РК «Азино» (КТЭЦ-1)	Газ		113 168 тыс. м ³
	Судовое топливо		1 тонн
Казанская ТЭЦ-2	Газ	227,3 г/кВт·ч	599 833 тыс. м ³
	Мазут		5 тонн
	Уголь		110 тонн
РК «Савиново» (КТЭЦ-2)	Газ		97 823 тыс. м ³
Заинская ГРЭС	Газ	375,7 г/кВт·ч	1 773 772 тыс. м ³
	Мазут		129 тонн
Набережночелнинская ТЭЦ	Газ	315,0 г/кВт·ч	1 428 410 тыс. м ³
	Мазут		2 152 тонн
Тепловая станция ЮЗЧ (КЦ БСИ НЧТЭЦ)	Газ		8 142 тыс. м ³
	Мазут		6 тонн

Топливная база АО «Татэнерго» в 2024 году характеризуется высокой долей природного газа и использованием мазута как резервного или вспомогательного топлива. Эффективность генерации имеет значительные различия между станциями в соответствии с показателями удельного расхода условного топлива: наиболее экономичные - Казанская ТЭЦ-2 (227,3

г/кВт·ч) и Казанская ТЭЦ-1 (252,4 г/кВт·ч), наименее экономичная - Заинская ГРЭС (375,7 г/кВт·ч).

В состав АО «ТГК-16» входят Казанская ТЭЦ-3 и Нижнекамская ТЭЦ (ПТК-1). Данные объекты обеспечивают надежное теплоснабжение и выработку электрической энергии для крупных промышленных предприятий нефтегазохимического кластера Республики Татарстан, а также жилых зон в городах Казань и Нижнекамск [118].

Установленная электрическая мощность АО «ТГК-16» по состоянию на 01.01.2026 года составила 1 669,6 МВт, установленная тепловая мощность компании – 6 136 Гкал/час.

Основными видами деятельности АО «ТГК-16» являются производство электрической и тепловой энергии.

Таблица 4.7 – Информация об используемом топливе на электрических станциях АО «ТГК-16» за 2024 г.

Наименование электростанции	Вид используемого топлива	Удельный расход условного топлива	Общий расход топлива электростанции за отчетный период
Нижнекамская ТЭЦ (ПТК-1)	Газ	295,3 г/кВт·ч / 144,0 кг/Гкал	2 828 964 тыс.куб.м.
	Мазут		60 469 тонн
	Газ топливный углеводородный		161 716 тыс.куб.м.
Казанская ТЭЦ-3	Газ	229,5 г/кВт·ч / 157,4 кг/Гкал	1 171 217 тыс.куб.м
	Мазут		3 261 тонн

Топливная база АО «ТГК-16» в 2024 году характеризуется высокой долей природного газа как основного энергоносителя и существенным использованием мазута в качестве резервного топлива, особенно на Нижнекамской ТЭЦ, а также наличием специфического вида топлива

(углеводородный топливный газ) на Нижнекамской ТЭЦ, что отражает ее интеграцию в местную промышленную инфраструктуру. Эффективность генерации между станциями различается в соответствии с показателями удельного расхода условного топлива: Казанская ТЭЦ-3 демонстрирует более высокую эффективность (229,5 г/кВт·ч), Нижнекамская ТЭЦ (ПТК-1) менее экономична (295,3 г/кВт·ч).

ООО «Нижнекамская ТЭЦ» базируется в г. Нижнекамск и обеспечивает тепловой энергией такие масштабные объекты, как ПАО «Нижнекамскнефтехим» и АО «ТАНЕКО», а также снабжает теплом жилой фонд города [119]. Установленная электрическая мощность Нижнекамской ТЭЦ составляет 724 МВт, тепловая – 1580 Гкал/час.

Таблица 4.8 – Информация об используемом топливе и его характеристиках на ООО «Нижнекамская ТЭЦ» за 2024 год.

Наименование электростанции	Вид используемого топлива	Удельный расход условного топлива	Общий расход топлива электростанции за отчетный период
ООО «Нижнекамская ТЭЦ»	природный газ	209 г/кВт·ч	896 214 тыс.куб.м.
	углеводородный газ		199 463 тонн

Топливная база ООО «Нижнекамская ТЭЦ» в 2024 году характеризуется высокой долей природного газа как основного энергоносителя и использованием углеводородного топливного газа.

Во второй главе были рассмотрены объемы образования растительных отходов сельского хозяйства и оценка суммарного валового потенциала по муниципальным районам Республики Татарстан. По расчетным данным можно определить количество гибридных электростанций, которые можно разместить на территории республики (таблица 4.9):

$$n = \frac{M_{\text{год}}}{B_{\text{год}}}, \quad (4.10)$$

где $M_{\text{год}}$ – масса отходов сельскохозяйственных культур, тыс. тонн; $B_{\text{год}}$ – расход топлива на одной 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 растительных отходов [120].

Таблица 4.9 – Количество гибридных электростанций мощностью 500 кВт

Вид твердого биотоплива	Количество гибридных электростанций мощностью 500 кВт, шт.
Солома	29
Шелуха овса	3
Лузга подсолнечника	3

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

Удельный расход условного топлива по производству электроэнергии при внедрении малых гибридных электростанций в Республике Татарстан составит:

$$b_y^э = \frac{B_{\text{центр.э}}}{N_{\text{центр.э}} + N_э}, \quad (4.11)$$

где $B_{\text{центр.э}}$ – общий расход топлива всех электростанций региона за отчетный период; $N_{\text{центр.э}}$ – установленная электрическая мощность электростанций региона, МВт; $N_{\text{э}}$ – установленная электрическая мощность гибридных электростанций, МВт.

$$b_y^{\text{э}} = \frac{2\,005\,280,33}{7\,097,5 + 17,5} = 281,84 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч.}$$

Гибридная электростанция увеличивает общую генерирующую мощность региона, уменьшая общий удельный расход топлива за счет частичного замещения его альтернативными источниками.

Выводы по четвертой главе

Проведенный анализ показал, что эффективность гибридной электростанции, основанной на комбинированном использовании солнечной энергии и биомассы, существенно зависит от внешних условий эксплуатации, в первую очередь – от сезонной изменчивости солнечной инсоляции и вида используемого биотоплива. Максимальная эффективность и минимальный расход топлива наблюдаются в летние месяцы, когда солнечная энергия наиболее доступна, а минимальная эффективность в зимний период, что требует резервного увеличения загрузки биотопливного котла.

Наиболее перспективным видом биотоплива признаны гранулы из лузги подсолнечника, обладающие высокой теплотой сгорания, что обеспечивает наименьший годовой расход (15 358,4 тонн) и самый высокий КПД установки. Использование эвтектической смеси бифенил/дифенил оксида (Therminol VP-1) в качестве теплоносителя в солнечных коллекторах также позволяет достичь наилучших показателей по КПД и снижению расхода биотоплива.

Технико-экономический расчет подтвердил высокую рентабельность внедрения малых гибридных электростанций мощностью 500 кВт на сельскохозяйственных предприятиях. Себестоимость выработки электроэнергии составляет 2,84 руб./(кВт·ч), что значительно ниже розничного тарифа (4,29 руб./(кВт·ч)). При капитальных вложениях в размере 107,059 млн. рублей срок окупаемости проекта составляет 12 лет 6 месяцев, а чистая прибыль составляет более 3,8 млн. рублей в год.

Интеграция таких установок в энергетическую систему Республики Татарстан, где доминируют крупные газовые ТЭС, позволяет не только диверсифицировать источники энергии и снизить углеродный след, но и повысить общую энергоэффективность региона. При полном использовании потенциала растительных отходов возможно размещение до 35 гибридных электростанций суммарной мощностью 17,5 МВт, что позволит снизить удельный расход условного топлива в регионе с 282,8 г/кВт·ч до 281,8 г/кВт·ч, способствуя устойчивому развитию энергетики на основе возобновляемых источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы:

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кусова Ж.Г., Гальперин А.А., Цебоев Р.З., Хузмиев И.К., Гассиева О.И. Локальное энергоснабжение горной зоны с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) // Научные труды Вольного экономического общества России, 2011, № 153, С. 94-131.
2. Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., et al. Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation // Renewable Energy, 2010, Vol. 35, N7, pp. 1436-1443.
3. Nathan G.J., Jafarian M., Dally B.B., et al. Solar thermal hybrids for combustion power plant: Agrowing opportunity // Progress in Energy and Combustion Science, 2018, Vol. 64. pp. 4-28.
4. ГОСТ Р 56124.1-2014 (IEC/TS 62257-1:2003). Возобновляемая энергетика. Гибридные электростанции на основе возобновляемых источников энергии, предназначенные для сельской электрификации. Рекомендации. Часть 1. Общее введение для сельской электрификации. – Введ. 2015-01-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – IV, 5 с.
5. 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. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131. – EDN TMCAWW.
6. López-González L.M., Sala J.M., Mínguez-Tabarés J.L., López-Ochoa L.M. (2007), Contribution of renewable energy sources to electricity production in the autonomous community of Navarre (Spain): A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(8), 1776-1793.
7. Yin J., Zheng Q., Peng Z., & Zhang X. Review of supercritical CO2 power cycles integrated with CSP // International Journal of Energy Research. 2019. C.1-33.doi:10.1002/er.4909.

8. J. Dersch, M. Geyer, U. Herrmann, S.A. Jones, B. Kelly, R. Kistner, W. Ortmanns, R. Pitz-Paal, H. Price, Trough integration into power plants – a study on the performance of integrated solar combined cycle systems, *Energy* 2004, № 29. P. 947–959. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00199-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00199-3).
9. Эльмохлави А.Э., Очков В.Ф., Казанджан Б.И. Оценка производительности и энергоэффективности интегрированного солнечного комбинированного цикла электростанции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 43-54. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-43-54.
10. Servert J., San Miguel G., López D. Hybrid solar - biomass plants for power generation; Technical and economic assessment // *Global NEST Journal*. 2011. V. 13. № 3. P. 266-276.
11. Набиуллина, М. Ф. Гибридные мини-ТЭС на биомассе и солнечной энергии как автономные источники тепла и электричества / М. Ф. Набиуллина // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика : материалы докладов : в 3 т., Казань, 06–07 декабря 2022 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 196-200. – EDN NNBJNQ.
12. Alireza Tajeddin, Elham Roohi, Designing a reliable wind farm through hybridization with biomass energy // *Applied Thermal Engineering*, 2019, Vol. 154, pp. 171-179, DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.088.
13. Subhadip Goswami, Tapas Kumar Benia, Abhik Banerjee, ASS-MPPT and 2TSO Algorithm-Based Design and Evaluation of a Wind-Biomass Hybrid Power Generation Systems // *Smart Grids and Sustainable Energy*, 2023, Vol. 8, DOI 10.1007/s40866-023-00177-y.
14. Mehmet A.D., Samuel A.S., Ernest F.A. Does biomass energy drive environmental sustainability? An SDG perspective for top five biomass consuming countries // *Biomass and Bioenergy*, 2021, Vol. 149, pp.1-8.
15. Ресурсы возобновляемой энергетики: методы оценки и картографирование : коллективная монография / С.В. Киселева, Ю.Ю.

Рафикова, Т.И. Андреев, Б.А. Новаковский, А.И. Прасолова. – М. : Наука, 2019. – 194 с.

16. Bridgwater A.V. Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading // Biomass bioenergy, 2012, Vol. 38, pp. 68-94.

17. Demirbas A. Resource Facilities and Biomass Conversion Processing for Fuels and Chemicals // Energy Conversion Management, 2011, Vol. 42, N11, pp. 1357-1378.

18. Okello C., Pindozzi S., Faugno S., Boccia L. Bioenergy potential of agricultural and forest residues in Uganda // Biomass Bioenergy, 2013, Vol. 56, pp. 515-525.

19. N. Kaliyan, R.V. Morey Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Product, Biomass Bioenerg, 2009, Vol. 33, N3, pp. 379-359.

20. Караева Ю.В., Тимофеева С.С., Гильфанов М.Ф., Камалов Р.Ф., Марфин Е.А. Термохимическая конверсия лузги подсолнечника // Химия растительного сырья. 2023. № 2. С. 335-344.

21. Забарный Г.Н., Ключ С.В., Довженко Д.С. Использование растительных отходов для производства энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2011. Т. 8. С. 100–106.

22. Солома как энергетическое топливо: возможные решения проблем, возникающих при производстве и сжигании гранулированной соломы и других отходов растениеводства. Доступно по: <http://www.energsovet.ru/stat803.html>. Ссылка активна на 13 февраля 2024.

23. Стебли кукурузы - замечательное биотопливо. [Электронный ресурс]. URL: <https://bio.ukr.bio/ru/articles/11019>. (дата обращения 13.02.2024).

24. Кинжибекова А.К., Алеева А.Ж. Исследование теплофизических характеристик брикетов из лузги подсолнуха // Актуальные вопросы энергетики: материалы Международной научно-практической конференции. Омск, 2017. С. 82–86.

25. Шкарпеткин Е.А. Анализ методов получения гранул и средств для их реализации // Наука и современность. 2010. Т. 2-2. С. 378-383.

26. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс : учебник : в 2 книгах / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов [и др.] ; под редакцией В. Г. Айнштейна. – 8-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, [б. г.]. – Книга 1 : Книга 1 – 2019. – 916 с..
27. Слюсаренко В.В. Комплект оборудования для производства твердого биотоплива (пеллет из лузги подсолнечника) // Проблемы региональной энергетики. 2010. Т. 2. С. 66-70.
28. Ochkov V., Orlov K., Voloshchuk V. / Editor Rogalev N, Thermal Engineering Studies with Excel, Mathcad and Internet Springer, 2016.
29. Solar Thermal Electricity. Global Outlook, 2016.
30. Elmohlawy A.E., Ochkov V.F., Kazandzhan B.I. Modeling and Performance Prediction of Solar Parabolic Trough Collector for Hybrid Thermal Power Generation plant under Different Weather Conditions. AIP Conference Proceedings vol. 2047, 020002 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5081635>.
31. Montes M.J., Abánades A., Martínez-Val J.M., Valdés M. (2009), Solar multiple optimization for a solaronly thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors // Solar Energy 83, P. 2165–2176
32. Kiamah P. Power generation handbook: selection, applications, operation, and maintenance / New York: McGraw-Hill, 2003 - 568 p.
33. Chowdhury N, Hossain CA, Longo M, Yaïci W. Feasibility and cost analysis of photovoltaic-biomass hybrid energy system in off-grid areas of Bangladesh // Sustainability, 2020. Vol 12. N.4 – pp. 1–15.
34. Alturki FA, Al-Shammaa AA, Farh HMH, AlSharabi K. Optimal sizing of autonomous hybrid energy system using supply-demand-based optimization algorithm // International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020. Vol 1 – pp. 1–21.
35. Получение топлива из отходов предприятий растениеводства для улучшения экологических условий в регионе / Ю. Н. Шалимов, Л. С. Юрьев, А. В. Руссу [и др.] // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2016. – № 1-

1(7). – С. 374-380. – EDN WDHMCX.

36. 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. – DOI 10.17588/2072-2672.2026.4.017-024. – EDN FROKIS.

37. Ключ С.В., Забарный Г.Н. Оценка и прогноз потенциала твердого биотоплива Украины // Коллекторное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 2(24). – С. 8-13.

38. Андреевко, Т. И. Энергетический потенциал агробиомассы в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях / Т. И. Андреевко, С. В. Киселева, Ю. Ю. Рафикова // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2023. – Т. 78, № 6. – С. 50-63. – DOI 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.5. – EDN ZCKNIN.

39. База данных показателей муниципальных образований [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/dbscripts/munst> (Дата обращения 29.05.2026).

40. Бюллетени о состоянии сельского хозяйства [Электронный ресурс] URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/economy (Дата обращения 29.05.2026).

41. Никулин, А. Н. Исследование новых способов переработки отходов растительной биомассы в сельскохозяйственном производстве / А. Н. Никулин // Записки Горного института. – 2006. – Т. 167, вып. 2. – С. 106–109.

42. Влияние этанола на функционализацию лигнина в процессе щелочной делигнификации древесины : диссертация ... кандидата химических наук : 05.21.03 / Кожевников Александр Юрьевич; [Место защиты: Архангел. гос. техн. ун-т]. – Архангельск, 2007. - 121 с.

43. Цветков, М. В. Лигнин: направления использования и способы утилизации (обзор) / М. В. Цветков, Е. А. Салганский // Журнал прикладной

химии. – 2018. – Т. 91, № 7. – С. 988-997. – DOI 10.1134/S0044461818070095. – EDN XZIFIT.

44. Аверьянова Е.В., Рожнов Е.Д. Контроль качества мелассы: учеб. пособие. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2016. – 31 с.

45. Текутьева Л.А., Сон О.М., Яценко А.С. Проблемы использования свекловичной мелассы в российском кормопроизводстве // Естественные и технические науки. – 2015. – № 2. – С. 1–12.

46. Shyam Prakash K., Phanindra M., Ram Surya S. Percentage replacement of bitumen with sugarcane waste molasses // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2014. – № 7. – P. 188–197.

47. Сковородников, П. В. Изучение влияния мелассы на характеристики гранулированного биогумуса, полученного методом окатывания / П. В. Сковородников, М. В. Черепанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2019. – № 1. – С. 73-82. – DOI 10.15593/2224-9400/2019.1.7. – EDN ZERNHML.

48. Буравчук, Н. И. Топливные композиты из мелкозернистого углеродсодержащего техногенного сырья / Н. И. Буравчук // Инноватика и экспертиза: научные труды. – 2017. – № 2(20). – С. 191-203. – EDN ZGICZX.

49. Никишанин, М. С. Углеродсодержащие брикеты на разных связующих веществах, их теплофизические характеристики и использование в газогенераторах / М. С. Никишанин, П. К. Сеначин // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 305-311. – EDN KZCPGV.

50. Петрова, Л. А. Получение бытовых топливных брикетов с использованием нефтяных связующих / Л. А. Петрова, В. Г. Латышев, О. Н. Буренина // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2007. – № 1. – С. 49. – EDN RPFACZ.

51. Набиуллина, М. Ф. Исследование теплофизических характеристик растительных отходов сельского хозяйства / М. Ф. Набиуллина // XXVIII Всероссийский аспирантско- магистерский научный

семинар, посвященный дню энергетика : Материалы докладов. В 3-х томах, Казань, 05–06 декабря 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 408-411. – EDN XMTLJY.

52. ГОСТ 32975.2-2014. Топливо твердое из бытовых отходов. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 2. Общая влага. Стандартный метод : введ. впервые : дата введения 2016-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 12 с. – (Соответствует EN 14774-2:2009).

53. ГОСТ 32988-2014 (EN 14775:2009). Определение зольности = Solid biofuels. Determination of ash content : межгосударственный стандарт / подготовлен Всероссийским научно-исследовательским центром стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ. – Москва : Стандартинформ, 2015. – III, 3, с. – (Биотопливо твердое).

54. ГОСТ 32990-2014 (EN 15148:2009). Определение выхода летучих веществ = Solid biofuel. Determination of the content of volatile matter : межгосударственный стандарт / Подготовлен Всероссийским научно-исследовательским центром стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ. – Введен впервые. – Введен в качестве национального стандарта с 2016-04-01. – Москва : Стандартинформ, 2015. — IV, 7 с. – (Биотопливо твердое).

55. Глинка Н. Л. Общая химия: Учебное пособие для вузов/Под ред А. И. Ермакова изд. 30-е, исправленное - М.: Интеграл-Пресс, 2003. - 728 с.

56. Рыжиков В.А. Анализ влияния теплотехнических характеристик сырья на физико-механические свойства комбинированного брикета / Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27. № 2. – С. 197-210. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-197-210.

57. Набиуллина, М. Ф. Исследование механических характеристик топливных гранул из растительных отходов сельского хозяйства / М. Ф. Набиуллина, О. В. Клейдман, Г. Р. Мингалеева // Проблемы и перспективы развития энергетики : сборник материалов VII Всероссийской (с

международным участием) научно-практической конференции, Казань, 22–23 октября 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 772-775. – EDN KVQKRC.

58. Янссен И. Теория давления сыпучих тел в силосных ячейках / И. Янссен // Классические труды по механике сыпучих сред. – 1895. – С. 123-145.

59. Петров В.А. Методика расчета энергии удара при падении гранул биотоплива / В.А. Петров, Н.И. Козлов // Энергетическое машиностроение. – 2020. – № 2. – С. 63-70.

60. Михайлов Е.А. Экспериментальное определение энергии разрушения гранул при ударных нагрузках / Е.А. Михайлов, Д.В. Смирнов // Механическая обработка материалов. – 2020. – № 4. – С. 112-119.

61. Козлов, Н.И. Влияние вибрационных воздействий на прочность гранулированных материалов / Н.И. Козлов, М.Г. Диктурук // Процессы и аппараты химической технологии. – 2020. – № 5. – С. 23-29.

62. Николаев, С.И. Расчетные методы определения сил взаимодействия между гранулами / С.И. Николаев, А.П. Васильев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2020. – № 4. – С. 78-85.

63. Кафаров, В.В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем / В.В. Кафаров, В.Л. Перов, В.П. Мешалкин. – М. : Химия, 1974. – 248 с.

64. Попырин, Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л. С. Попырин. – М. : Энергия, 1978. – 416 с.

65. 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 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский

государственный энергетический университет".

66. Об охране окружающей среды: Федеральный закон № 7-ФЗ от 10 января 2002 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pravo.gov.ru/> (Дата обращения 21.09.2026).

67. Behar, O.; Khellaf, A.; and Mohammedi, K. (2013). A review of studies on central receiver solar thermal power plants // *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 23, P. 12-39.

68. Ouagued, M.; Khellaf, A.; and Loukarfi, L. (2013). Estimation of the temperature, heat gain and heat loss by solar parabolic trough collector under Algerian climate using different thermal oils // *Energy Conversion and Management*, 75, P. 191-201.

69. Padilla, R.V.; Demirkaya, G.; Goswami, D.Y.; Stefanakos, E.; and Rahman, M.M. (2011). Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver. *Applied Energy*, 88, 5097-5110.

70. Wu Z., L, S., Yuan G., Lei D. and Wang Z. (2014). Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics of parabolic trough receiver. *Applied Energy*, 113, 902-911.

71. Liang, H.; You, S.; and Zhang, H. (2015). Comparison of different heat transfer models for parabolic trough solar collectors. *Applied Energy*, 148, 105-114.

72. Lei, D.; Li, Q.; Wang, Z.; Li, J.; Li, J.; and Li, J. (2013). An experimental study of thermal characterization of parabolic trough receivers. *Energy Conversion and Management*, 69, 107-115.

73. Zaversky, F.; Medina, R.; García-Barberena, J.; Sánchez, M.; and Astrain, D. (2013). Object-oriented modeling for the transient performance simulation of parabolic trough collectors using molten salt as heat transfer fluid. *Solar Energy*, 95, 192-215.

74. You, C.; Zhang, W.; and Yin, Z. (2013). Modeling of fluid flow and heat transfer in a trough solar collector. *Applied Thermal Engineering*, 54, 247-254.

75. Valenzuela, L.; López-Martín, R.; and Zarza, E. (2014). Optical and thermal performance of large-size parabolic-trough solar collectors from outdoor experiments: A test method and a case study. *Energy*, 70, 456-464.
76. Wang, P.; Liu, D.Y.; and Xu, C. (2013). Numerical study of heat transfer enhancement in the receiver tube of direct steam generation with parabolic trough by inserting metal foams. *Applied Energy*, 102, 449-460.
77. Behar, O.; Khellaf, A.; and Mohammedi, K. (2015). A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES). *Energy Conversion and Management*, 106, 268-281.
78. García-Valladares, O.; and Velázquez, N. (2009). Numerical simulation of parabolic trough solar collector: Improvement using counter flow concentric circular heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 597-609.
79. Набиуллина, М. Ф. Исследование работы различных типов солнечных концентраторов в условиях Республики Татарстан / М. Ф. Набиуллина // Тинчуринские чтения - 2024 "Энергетика и цифровая трансформация" : Материалам Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 402-406. – EDN AUKPCL.
80. Фам Д.Н., Мингалеева Г.Р., Савина М.В., Шешуков Е.Г. Исследование режимных параметров солнечного нагревателя воздуха для гибридных тепловых электростанций в климатических условиях Вьетнама // Вестник КГЭУ. 2020. №3. С.123-134.
81. Е.В. Стариков. Расчетно-экспериментальное исследование использования термосифонного теплообменника для получения пара с применением концентратора солнечной энергии / Е.В. Стариков, А.Т. Джайлани, А.Д. Никитин, С.Е. Щеклеин. // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология" – 2015 – № 13-14. – С. 51-57.

82. Набиуллина, М. Ф. Исследование работы различных типов солнечных концентраторов в условиях Республики Татарстан / М. Ф. Набиуллина // Тинчуринские чтения - 2024 "Энергетика и цифровая трансформация" : Материалам Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 402-406. – EDN AUKPCL.

83. Benidir A, Khaldi F, Benmachiche AH, Bouras F. Numerical thermal analysis of Schott 2008 PTR70 solar receiver under hassi R'mel power plant operation conditions // Journal of Engineering Science and Technology. 2018; N.13, P.122-140.

84. Bellos E, Tzivanidis C, Antonopoulos KA, Daniil I (2016) The use of gas working fluids in parabolic trough collectors—an energetic and exergetic analysis. Appl Therm Eng 109:1–14.

85. Bellos E, Tzivanidis C. Parametric investigation of supercritical carbon dioxide utilization in parabolic trough collectors // Applied Thermal Engineering, 2017, Vol. 127, P. 736–747. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.032.

86. Термомасляные котлы ТМУ-МТ на биотопливе [Электронный ресурс]. URL:<https://geosoyuz.ru/termomaslyanye-kotly-utpu-mt-na-biotoplive/> (Дата обращения 11.06.2026).

87. Теплоносители для солнечной энергетики [Электронный ресурс]. URL: <https://termolan.ru/teplonositeli-dlya-solnechnoy-energetiki/> (Дата обращения 27.11.2022)

88. Влияние температуры, давления и концентрации нанонаполнителей на изменение теплофизических свойств углеродосодержащих растворителей / Ш. А. Аминов, М. А. Зарипова, М. М. Сафаров, М. М. Гуломов // Вестник Таджикского технического университета. – 2015. – № 1(29). – С. 10-17.

89. Сафаров, М. М. Влияние углеродных нанотрубок на изменение

теплопроводности изобутана / М. М. Сафаров, С. С. Джумаева, М. М. Гуломов // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS "EESTE-2021") : Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума, посвященного 110-летию А.Н. Плановского, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума "Современные задачи инженерных наук", Москва, 20–21 октября 2021 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2021. – С. 193-194. – DOI 10.37816/eeste-2021-2-193-194.

90. Сычев, А. В. Технические характеристики теплоносителя концентрированных солнечных станций / А. В. Сычев, А. А. Матьякубов // Наука, техника и инновационные технологии в период Возрождения новой эпохи могущественного государства : Материалы международной научной конференции, Ашхабад, 12–13 июня 2023 года. – Ашхабад: Ylum, 2023. – С. 225-226. – EDN RKGWPS.

91. Набиуллина, М. Ф. Использование различных теплоносителей в солнечных коллекторах гибридных электростанций / М. Ф. Набиуллина // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ VII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Кемерово, 07–09 декабря 2022 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 154-1-154-5. – EDN BEWZMA.

92. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание 3, переработанное и дополненное. СПб.: Изд. НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

93. Пицуха Е.А. Научные основы создания высокоэффективных циклонно-слоевых топочных устройств для котлов, работающих на твердом биотопливе: автореф. дисс. ... докт. тех. наук: 05.14.04 / Пицуха Евгений Александрович – Минск, 2019 – 46 с.

94. Михеев, М. А. Основы теплопередачи : учеб. пособие для вузов / М. А. Михеев, И. М. Михеева; под ред. М. А. Михеева. – 2-е изд., стереотип. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
95. Бакластов А. М., Горбенко В. А., Удыма П. Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок : учеб. пособие для вузов / под ред. А. М. Бакластова. – М. : Энергоиздат, 1981. – 336 с.
96. Бакластов А.М. Промышленные тепломассообменные процессы и установки: учебник для вузов / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, О. Л. Данилов [и др.]; под ред. А. М. Бакластова. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
97. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособие для вузов: в 2 кн. / Н. И. Гельперин. - М.: Химия, 1981. – 384 с.
98. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочная серия : в 4 кн. / под общей ред. А. В. Клименко, В. М. Зорина – 4-е изд., стер. – М. : Изд-во МЭИ, 2007. 632 с.
99. ГОСТ Р 53677–2009. Нефтяная и газовая промышленность. Кожухотрубчатые теплообменники. М. : Стандартинформ, 2011. - 35 с.
100. Разработка и внедрение в производство паровых турбин малой мощности [Электронный ресурс]. URL: https://elta-e.ru/pns/low_power_steam_turbines/ (Дата обращения 11.06.2026).
101. Трухний, А. Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки : учебное пособие для вузов / А. Д. Трухний, Б. В. Ломакин. – М. : Издательство МЭИ, 2002. – 539 с.
102. Теплообменные аппараты ТЭС: справочник: в 2 кн. Кн. 2 / под общ. ред. Чл.-кор. РАН Ю.Г. Назмеева и проф. В.Н. Шлянникова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 435 с.
103. Конденсаторы типа ХВ, ХВс [Электронный ресурс]. URL: https://www.korabel.ru/equipment/item_view/1395134.html (Дата обращения 11.06.2026).

104. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84) / ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР ; рук. и ответств. исполнитель В. А. Гладков. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.

105. Открытые градири из стеклопластика [Электронный ресурс]. URL: https://niba.com.ru/catalog/otkrytye_gradirni_hmp/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (Дата обращения 11.06.2026).

106. Циркуляционный насос DAB BPH 180/360.80T [Электронный ресурс]. URL: https://www.ecovita.ru/catalog/nasosnoe_oborudovanie/cirkuljacionnye_nasosy/dab-bph-180-360-80t.html?srsId=AfmBOopN2LU__hqtzPVgRq3vzl3YIzwKUOx_Hf3o8B7dCJqw7dNQdQkv (Дата обращения 11.06.2026).

107. Чиж, В. А. Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС и АЭС / В. А. Чиж, Н. Б. Карницкий, А. В. Нерезько. – Минск : Высшэйшая школа, 2010. – 351 с. – ISBN 978-985-06-1877-1. – EDN SDTRYX.

108. Водоподготовительная установка ВПУ 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://ds22.su/vodopodgotovitel'naya-ustanovka-vpu-10/?ysclid=mo75dncw9j183356236> (Дата обращения 11.06.2026).

109. Измельчитель ножевой Glater-3 [Электронный ресурс]. URL: <https://giptek.ru/product/izmelchitel-nozhevoj-glater-3> (Дата обращения 11.06.2026).

110. Лопастной горизонтальный Смеситель ГС - 1000 [Электронный ресурс]. URL: https://www.a-строй.пф/goods/132016441-lopastnoy_gorizontalny_smesitel_sg_7_5#product-description (Дата обращения 11.06.2026)/

111. Оборудование для производства комбикорма [Электронный ресурс]. URL: <https://ap-nn.com/> (Дата обращения 29.05.2026).

112. 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 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

113. 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.

114. Экономика энергетики : учебник / Н. Д. Рогалев, Г. Н. Курдюкова, Е. Ю. Абрамова [и др.]. – Москва : НИУ МЭИ, 2021. – 404 с.

115. Калькулятор стоимости технологического присоединения АО «Сетевая компания» [Электронный ресурс]. URL: <https://gridcom-rt.ru/clients/tekhnologicheskoe-prisoedinenie/calculator/> (Дата обращения 29.05.2026).

116. Постановление Государственного Комитета Республики Татарстан по тарифам от 19.12.2025 г. №666-17/э-2025 «Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей Республики Татарстан на 2026 год».

117. АО «Татэнерго» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tatenergo.ru/contacts/> (Дата обращения 29.05.2026).

118. АО «ТГК-16» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tgc16.ru/> (Дата обращения 29.05.2026).

119. ООО «Нижекамская ТЭЦ» [Электронный ресурс]. URL: www.nktec.tatneft.ru (Дата обращения 29.05.2026).

120. Энергетический потенциал отходов растениеводства для теплоснабжения жилого сектора / Т. И. Андреев, С. В. Киселева, Ю. Ю. Рафикова, И. Л. Трофимова // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2022. – № 8(248). – С. 68-73. – EDN ERUXGO.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026686845

**Расчетный модуль для определения энергетических
показателей гибридной электростанции**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ" (RU)**

Авторы: **Набиуллина Мадина Фаридовна (RU), Мингалеева
Гузель Рашидовна (RU)**



Заявка № **2026684975**

Дата поступления **17 августа 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **02 сентября 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ 3. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по УР

А.В. Леонтьев

«25» 09 2026 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Набиуллиной Мадины Фаридовны

Результаты диссертационной работы «Повышение эффективности сельскохозяйственного энергетического комплекса за счет автономных гибридных электростанций» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» при реализации основной образовательной программы бакалавриата «Производство и эксплуатация газовых и паровых турбин» (направление подготовки 13.03.03 «Энергетическое машиностроение») и содержание разделов дисциплины «Котельные установки и парогенераторы» и дисциплины «Введение в инженерную деятельность». Результаты исследования используются при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий.

Директор Департамента образования
ФГБОУ ВО «КГЭУ», к.т.н., доцент

Р.В. Ахметова

Заведующий кафедрой ЭМС
ФГБОУ ВО «КГЭУ», д.т.н., доцент

Г.Р. Мишгалева

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В ООО «ЭНЕРГОГАЗСЕРВИС»



Акционерное Общество «ЭнергоГазСервис»
«ЭнергоГазСервис»

Общество с Ограниченной Ответственностью
«ЭнергоГазСервис»
420068, Республика Татарстан, г.Казань,
пр.Победы, д.206, оф.303, 303, 307
8-800-600-25-33 (звонок по РФ бесплатный)
тел./факс: (843) 202-32-62, 202-32-63
<http://www.egs-kotel.ru> <http://www.egs-kzn.ru>
info@egs-kotel.ru egs-kzn@bk.ru

Акт

внедрения результатов диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Набиуллиной Мадины Фаридовны

Полученные результаты диссертации «Повышение эффективности сельскохозяйственного энергетического комплекса за счет автономных гибридных электростанций», выполненной старшим преподавателем кафедры «Энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», приняты к внедрению в ООО «ЭнергоГазСервис». Математическая модель гибридной электростанции и зарегистрированная программа для ЭВМ могут быть адаптированы для расчета параметров котлов, работающих в составе гибридных схем, и прогнозирования сезонного расхода топлива с учётом климатических особенностей региона установки, а также оптимизации режимов работы котельного оборудования.

Директор



Д. А. Галиуллин

• Блочно-Модульные
Котельные

• Газовые котлы **EGS**
наружного размещения

• ГРПШ, ГРУ, ПГБ
ШУУРГ, ВПУУРГ

• Строительство газопроводов и котельных