© Набиуллина М.Ф., Мингалеева Г.Р., Афанасьева О.В., Тимофеева С.С.

(cc) BY

УДК 62-664.2, 621.311.26 DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

Набиуллина М.Ф.[1], Мингалеева Г.Р.[2], Афанасьева О.В.[3], Тимофеева С.С.[4]

[12]Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
[3]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия
[4]Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Россия
madinanabiullina@yandex.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ. На сельскохозяйственных предприятиях образуются растительные отходы, которые сложно утилизировать. Такие отходы могут быть использованы для сжигания в котлах, обеспечивая тепловой и электрической энергией сельскохозяйственный энергокомплекс. Гибридная мини-ТЭС, объединяющая возобновляемые источники энергии и растительное биотопливо, сможет обеспечить более экономичные, экологически чистые и надежные поставки тепловой и электрической энергии при любых условиях спроса по сравнению с использованием одной из этих систем. ЦЕЛЬ: Определение расхода топлива при сжигании различных видов растительных отходов сельского хозяйства в гибридной мини-ТЭС с параллельным подключением концентраторов солнечной энергии в условиях солнечной инсоляции Республики Татарстан. МЕТОДЫ. В статье рассмотрены химический состав и характеристики различных видов растительных отходов сельского хозяйства. Определена средняя суммарная нагрузка энергопотребления сельскохозяйственного предприятия. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для определения расхода биотоплива для работы котла КЕ10-14СО проведен расчет теоретических объемов продуктов сгорания и тепловой расчет котла. Определена потребность во вспомогательном топливе на мини-ТЭС при параллельном подключении концентрационных установок солнечной энергии. Произведен расчет тепла, собираемого солнечным коллектором. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование концентраторов солнечной энергии при параллельном подключении с котлом на биотопливе дает возможность равномерного энергоснабжения предприятия и формирования запасов биотоплива. Расчеты показали, что использование гибридных установок для сжигания биомассы и солнечных коллекторов способствует снижению расхода топлива.*

Ключевые слова: *растительные отходы; гибридная мини-ТЭС; солнечная инсоляция, концентратор солнечной энергии, расход топлива.*

Для цитирования: Набиуллина М.Ф., Мингалеева Г.Р., Афанасьева О.В., Тимофеева С.С. Использование растительных отходов для обеспечения функционирования сельскохозяйственных энергокомплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 120-131. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131.

THE USE OF PLANT WASTE TO ENSURE THE FUNCTIONING OF AGRICULTURAL ENERGY COMPLEXES

Nabiullina [1] M.F., Mingaleeva [2] G.R., Afanaseva[3] O.V., Timofeeva[4] S.S.

[1,2]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
[3]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
[4]Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC, Kazan, Russia
madinanabiullina@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE. Agricultural enterprises generate vegetable waste, which is difficult to utilize. Such waste can be used for combustion in boilers, providing thermal and electric energy to an agricultural energy complex. A hybrid mini-thermal power plant combining*

renewable energy sources and plant biofuels will be able to provide more economical, environmentally friendly and reliable supplies of heat and electricity under any demand conditions compared to using one of these systems. OBJECTIVE. Determination of fuel consumption during combustion of various types of vegetative agricultural waste in a hybrid mini-thermal power plant with parallel connection of solar energy concentrators under conditions of solar insolation of the Republic of Tatarstan. METHODS. The article considers the chemical composition and characteristics of various types of plant waste from agriculture. The average total energy consumption load of an agricultural enterprise has been determined. RESULTS. To determine the consumption of biofuels for the operation of the KE10-14CO boiler, the calculation of the theoretical volumes of combustion products and the thermal calculation of the boiler were carried out. The need for auxiliary fuel at mini-thermal power plants with parallel connection of solar energy concentration plants has been determined. The calculation of the heat collected by the solar collector has been performed. CONCLUSION. The use of solar energy concentrators when connected in parallel with a biofuel boiler makes it possible to evenly supply energy to the enterprise and form biofuel reserves. Calculations have shown that the use of hybrid biomass combustion plants and solar collectors helps to reduce fuel consumption.

***Keywords**: plant waste; hybrid mini-thermal power plant; solar insolation, solar energy concentrator, fuel consumption.*

For citation: Nabiullina M.F., Mingaleeva G.R., Afanaseva O.V., Timofeeva S.S. The use of plant waste to ensure the functioning of agricultural energy complexes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 120-131. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131.

Введение (*Introduction)*

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.

В настоящее время биомасса вносит примерно 12% в производство первичной энергии в мире, а в развивающихся странах она покрывает 40-50% необходимой энергии. В настоящее время использование возобновляемых топливных материалов, таких как древесные отходы, для производства биотоплива повышает шансы биомассы перейти на уровень доступности на энергетическом рынке [1].

Биомасса является экологически чистой и нейтральной энергией по отношению к выбросам углекислого газа. Углекислый газ поглощается растениями в процессе выращивания и образует замкнутый контур, поскольку количество углекислого газа, которое было поглощено растениями в процессе выращивания, будет примерно соответствовать тому, которое было удалено в процессе полного сжигания. Биомасса может служить значительным дополнением к возобновляемым источникам энергии, таким как ветер и солнце. Однако для максимально эффективного использования биомассы и минимизации негативных воздействий на окружающую среду, необходимо разрабатывать и внедрять более эффективные методы ее обработки и использования. Это включает в себя повышение урожайности культур, оптимизацию процессов сжигания и создание более эффективных способов хранения и транспортировки биомассы.

Наиболее доступными ресурсами для производства топлива из возобновляемых источников сырья являются древесина, солома зерновых культур, шелуха подсолнечника, стебли кукурузы и навоз крупного рогатого скота.

Использование древесины, которая традиционно применяется в качестве источника энергии с древних времен, в настоящее время во многих странах регулируется на государственном уровне, поскольку большинство стран Европейского союза озабочены сохранением естественных лесных биотопов [2]. Из-за этих правил, введенных на национальном уровне, древесина даже низкого качества (получаемая из веток и сучьев-обрубков) становится менее доступной [3]. 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 [4]. 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 [5].

Процесс получения жидкого биотоплива является более сложным: путем ферментации крахмала или сахара (биоэтанол), из масличных растений (биодизель), из биомассы (диметиловый эфир) и др. 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. 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.

Газообразное биотопливо состоит в основном из метана и углекислого газа в различных пропорциях в зависимости от состава органического вещества, из которого оно было получено. 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. 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.

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. 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.

Работа лесообрабатывающей промышленности не имеет ограничений по производительности отходов, однако, в сельском хозяйстве имеются ограничения в зависимости от сезона. Таким образом, для бесперебойной выработки тепловой и электрической энергии необходимо комбинирование различных источников энергии. Существуют различные виды гибридных электростанций, использующих различные виды возобновляемой энергии, такие как солнечная, ветровая энергии и энергия биотоплива.

Совместимость солнечных тепловых электростанций и котлов 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). Следовательно, гибридная технология сжигания биомассы с использованием концентрированной солнечной энергии основана на эффективной интеграции солнечного коллектора в водно-паровой цикл электростанции на биомассе [6].

Системы выработки энергии на биомассе и ветровые электростанции могли бы дополнять друг друга. Система на биомассе обеспечивает резервную выработку энергии, необходимой ветропарку для покрытия возможных несоответствий между прогнозируемыми и реальными значениями его выходной мощности. Работая

непрерывно для производства электроэнергии, система на биомассе обеспечивает дополнительную гибкость и надежность энергосистемы в целом. Чтобы оптимизировать использование установки на биомассе, она должна быть установлена на территории ветропарка и работать все время для производства электроэнергии [7].

Целью исследования является оценка эффективности гибридных мини-ТЭС для сравнительного анализа различных вариантов комбинирования возобновляемых источников энергии и биотоплива.

Научная значимость исследования состоит в получении зависимости годового цикла изменения расхода топлива в зависимости от изменения интенсивности солнечного излучения с учетом региональных климатических особенностей Республики Татарстан.

Практическая значимость исследования заключается в том, что на основе проведенных расчетов могут быть получены данные по расходу топлива, в качестве которого используются отходы сельскохозяйственного производства - солома, шелуха семян подсолнечника и стебли кукурузы, - для использования автономной гибридной тепловой электростанции необходимой мощности с учетом региональных климатических особенностей.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

В данной работе проведен анализ имеющихся энергетических ресурсов для сельскохозяйственных предприятий Республики Татарстан. В республике ежегодно образуется более 20 тыс. тонн 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 представлен химический состав и характеристики различных видов твердой биомассы, используемой для получения тепловой и электрической энергии.

Таблица 1.

Химический состав и характеристики различных видов биомассы

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

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

В процессе работы маслоэкстракционных заводов образуется большое количество шелухи, являющейся крупнотоннажным ресурсом для вторичного использования. Сейчас ее применяют в сфере энергетики, сельском хозяйстве, медицинской, пищевой и химической промышленностях [8]. Состав лузги, высушенной при 110 °C: углерод – 49%, водород – 5,75%, кислород и азот 43,11%, сера – 0,10%, зола – 2%. Средняя влажность промышленной лузги около 10%, а низшая теплотворная способность составляет 14,5–16,5МДж/кг. Зола лузги подсолнечника относится к золе средней плавкости. Лузга подсолнечника сгорает с минимальными выбросами летучих органических соединений в атмосферу, что делает ее полезной в качестве альтернативного экологического топлива [9].

Солома имеет низшую теплотворную способность рабочего топлива в среднем 11,7 МДж/кг. Допустимый диапазон влажности соломы для сжигания составляет 10–23%, оптимальное значение – 15%, зольность 4,5-6,1 %. Однако содержание хлора и калия в соломе примерно на порядок выше, чем в древесной щепе. Максимальное содержание хлора в соломе наблюдается непосредственно после обмолота урожая. Высокое содержание щелочных металлов обуславливает низкую температуру плавления золы соломы [9]. В отличие от древесины, этот вид биомассы, как правило, является отходом, на утилизацию которого требуются относительно высокие затраты. В среднем за 2001-2008 гг. в России собирали 38 млн. т соломы озимых культур. В странах с высокоразвитым животноводством, например, в Дании, 36,5% собираемой соломы используется в животноводстве. Следовательно, около 24 млн. т может быть использовано в качестве топлива.

Элементарный состав соломы и теплота ее сгорания (табл. 2) не слишком отличаются от соответствующих показателей для древесины, хотя теплота сгорания соломы ниже, чем у сухой древесины [10].

Побочная продукция переработки кукурузы на зерно имеет достаточно хорошие топливные свойства, близкие к свойствам древесного топлива. Биотопливо, изготовленное из кукурузы, может сжигаться в котельном оборудовании, предназначенном для сжигания твердого топлива. Содержание золы в кукурузе является основным фактором качества для дальнейшего производства биотоплива и зависит от технологии сборки (этот показатель увеличивается вследствие контакта биомассы с грунтом). Учитывая это, существует два типа золы: структурная зола и неструктурная. К неструктурным компонентам относятся различные растворимые и нерастворимые вещества. Часть из них можно извлекать из древесины водой или органическими растворителями. Структурная зола состоит из неорганических веществ в растении, которые остаются после ее сжигания. Обычная зольность кукурузы - 3,5%. По характеристикам плавкости золы кукурузы приближается к древесной биомассе, обеспечивает лучшие условия для сжигания. Для сравнения: у древесины температура плавления золы составляет около 1200 °C, а температура плавления стеблей кукурузы - около 1100 °C. По элементному составу кукуруза почти не отличается от соломы зерновых колосовых, поэтому у них и сравнима теплотворная способность. Свойства побочной продукции растениеводства зависят от места выращивания, времени сбора и погоды, почвы и удобрений. Наибольшее влияние на теплотворную способность кукурузы оказывает влажность [11] Стебли кукурузы, подсолнечника после обмолота на зерно не срезаются, а остаются зимовать в поле. После зимовки влажность стеблей уменьшается до 20–25%, и высохшие стебли убираются. Низшая теплотворная способность таких стеблей составляет 13,6 МДж/кг, зольность – 4–10% [9].

На основе обзора известных технологических схем гибридных электростанций, использующих биомассу [12], проведен расчет гибридной мини-ТЭС в конфигурации параллельной установки солнечных коллекторов и парового котла на биомассе для климатических условий Республики Татарстан [13]. Схема, представленная на рис.1 работает следующим образом.

Теплоноситель из солнечного коллектора 1 подается в котел 2 для дополнительного подогрева. Разогретый до необходимой температуры теплоноситель поступает в теплообменник, состоящий из экономайзера 9, испарителя 10 и перегревателя 11 для парообразования поступающей в теплообменник воды. Перегретый пар из перегревателя подается в паровую турбину 3, после которой отработавший пар конденсируется в конденсаторе 5, затем конденсатными насосами 6 подается к деаэратору 7. После деаэратора вода подается в экономайзер теплообменника. Блок подготовки топлива 12 включает хранилище готового к использованию топлива и устройство топливоподготовки.

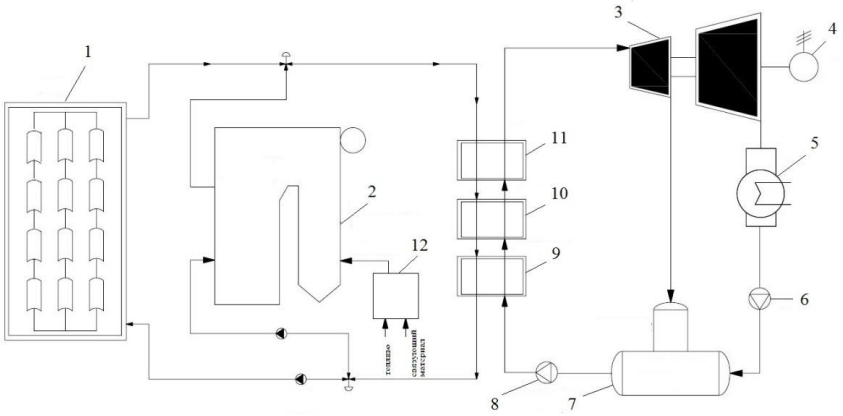

Рис. 1. Схема параллельного подключения котла на биотопливе и солнечной тепловой электростанции с параболическим желобом: 1 – солнечные коллекторы; 2 – котел; 3 –паровая турбина; 4 – электрогенератор; 5 – конденсатор; 6 – конденсатный насос; 7 – деаэратор; 8 – питательный насос; 9 – экономайзер; 10 – испаритель; 11 – перегреватель; 12 – блок подготовки биотоплива

Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 1. Diagram of parallel connection of a biofuel boiler and a solar thermal power plant with a parabolic trough: 1 – solar collectors; 2 – boiler; 3 – steam turbine; 4 – electric generator; 5 – condenser; 6 – condensate pump; 7 – deaerator; 8 – feed pump; 9 – economizer; 10 –evaporator; 11 – superheater; 12 – biofuel preparation unit

Исследования показывают, что наиболее популярными теплоносителями для систем солнечной энергетики являются синтетические углеводородные масла на основе дифенилоксида [14]. Эксплуатация гибридной электростанции при низких температурах возможна только с теплоносителями с низкой температурой замерзания и температурой самовоспламенения выше расчетных показателей котла.

Теплофизические свойства теплоносителя, выбранного для исследования, указаны в таблице 2.

Таблица 2.

Теплофизические характеристики теплоносителя

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
Название и производитель теплоносителя		Therminol 59, Solutia
Состав	-	Дифенилоксид / дифенил
Максимальная рабочая температура	ºС	315
Температура застывания	ºС	-49
Удельная теплоемкость жидкости при 100 ºС	Дж/кгºС	1940
Плотность жидкости при 100ºС	кг/м³	916
Номинальный массовый расход на контур коллектора	кг/с	7

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Для определения необходимой мощности гибридной мини-ТЭС необходимо знать нагрузки отдельных энергопотребителей. В сельском хозяйстве можно выделить следующих основных потребителей: жилые дома рабочих и служащих; производственные потребители (животноводческие фермы, теплицы, хранилища с/х продукции, мельницы, гаражи, котельные и т.п.); предприятия АПК (молокозаводы, птицефабрики, маслоэкстракционные заводы и т.п.) и прочие.

В таблице 3 представлены основные вероятностные характеристики нагрузок сельскохозяйственных потребителей.

Таблица 3.

Электрические нагрузки сельскохозяйственных потребителей

Объект	Дневной максимум нагрузки, кВт	Вечерний максимум нагрузки, кВт	Установленная мощность, кВт
Птичник на 5-6 тыс. кур	20	20	40
Кормоцех птицефермы на 2530 тыс. кур	20	10	60
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
Семенохранилище 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	-

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Суммарная нагрузка энергопотребления для всех указанных в таблице 3 потребителей составляет от 470 до 500 кВт. Для обеспечения тепло- и электроэнергией сельскохозяйственного предприятия необходимо в схеме гибридной мини-ТЭС предусмотреть турбину на 500 кВт и котельное оборудование, обеспечивающее выходную мощность. Таким образом, формируется энергокомплекс, состоящий из хозяйственных объектов и гибридной мини-ТЭС, работающей на отходах данного производства и солнечной энергии.

В схеме гибридной мини-ТЭС предполагается установка котла КЕ-10-14-С, подходящий для сжигания низших сортов топлива [15]. Расход топлива для работы гибридной мини-ТЭС мощностью 500 кВт определен нормативным методом расчета котла с механической топкой, предназначенной для сжигания твердого топлива в паровых котлах паропроизводительностью до 10 т/ч, на различных видах биомассы. Технические характеристики котла представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Характеристики котла

Тип котла	КЕ10-14СО, БКЗ, топка ТЛЗМ 2,7/3,0
Паропроизводительность, т/ч	10
Рабочее давление пара на выходе, МПа (кгс / $см^2$)	2,3(23,0)
Температура пара на выходе, °С	250 (перегретый)
Температура питательной воды, °С	100
Расчетный КПД , %	82

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Результаты *(Results)*

Для определения необходимого количества биотоплива для работы рассматриваемого котла проведен расчет теоретических объемов продуктов сгорания и тепловой расчет котла, результаты которого представлены в таблицах 5, 6.

Таблица 5.

Результаты расчета теоретического расхода воздуха и теоретических объемов продуктов сгорания

Наименование параметров	Обозначение	Размерность	Численное значение (лузга подсолнечника)	Численное значение (солома)	Численное значение (стебли кукурузы)
Теоретический объем воздуха по составу топлива	V^0	$\frac{м^3}{кг}$	4,75	4,24	4,13
Теоретический объем трехатомных газов	$V^0_{RO_2}$	$\frac{м^3}{кг}$	0,14	0,14	0,14
Теоретический объем азота	$V^0_{N_2}$	$\frac{м^3}{кг}$	3,77	3,35	3,26
Теоретический объем водяных паров	$V^0_{H_2O}$	$\frac{м^3}{кг}$	0,90	0,84	0,88
Теоретический объем дымовых газов	$V^0_Г$	$\frac{м^3}{кг}$	7,03	6,38	6,25

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Таблица 6.

Результаты теплового расчета

Наименование	Обозначение	Размерность	Численное значение (лузга подсолнечника)	Численное значение (солома)	Численное значение (стебли кукурузы)
Потери тепла с уходящими газами	q_2	%	5,44	7,10	4,88
Суммарные потери тепла в котельном агрегате	$\sum q$	%	17,19	18,85	16,63

Коэффициент полезного действия котельного агрегата	$\eta_к$	%	82,81	81,15	83,83,37
Расход топлива, подаваемого в топку	B	$\frac{кг}{с}$	0,49	0,72	0,44

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Экономию биотоплива на мини-ТЭС при параллельном подключении концентрационных установок солнечной энергии можно рассчитать по следующему выражению [16]:

$$M_p = \frac{Q_n - Q_c}{h_к Q_p}, \quad (1)$$

где $Q_П$ - тепло, необходимое для производства с полной нагрузкой, Дж / кг; $Q_с$ - тепло, собираемое солнечным коллектором, Вт; $\eta_К$ - коэффициент полезного действия котла на биомассе. Значение КПД установлено на 82,81%, 81,15%, 83,37% для котла на биотопливе при сжигании лузги подсолнечника, соломы и стеблей кукурузы соответственно; $Q_р$ - теплотворная способность биомассы, Дж / кг.

Тепло, собираемое солнечным коллектором, определяется по формуле [17]:

$$Q_c = c \cdot M \cdot (t_к - t_н), \quad (2)$$

где, с – теплоемкость теплоносителя, Дж / (кг·°С); М – массовый расход теплоносителя, кг / с; $t_к$ –температура теплоносителя на выходе из последнего контура солнечного концентратора, °С; $t_н$ – температура теплоносителя на входе в солнечный коллектор, °С.

На рисунках 2, 3, 4 представлены графики расхода биотоплива на гибридной мини-ТЭС с параллельным подключением установок концентрации солнечной энергии (concentrated solar power - CSP) и без подключения CSP для интенсивности солнечного излучения, характерной для Республики Татарстан в течение года.

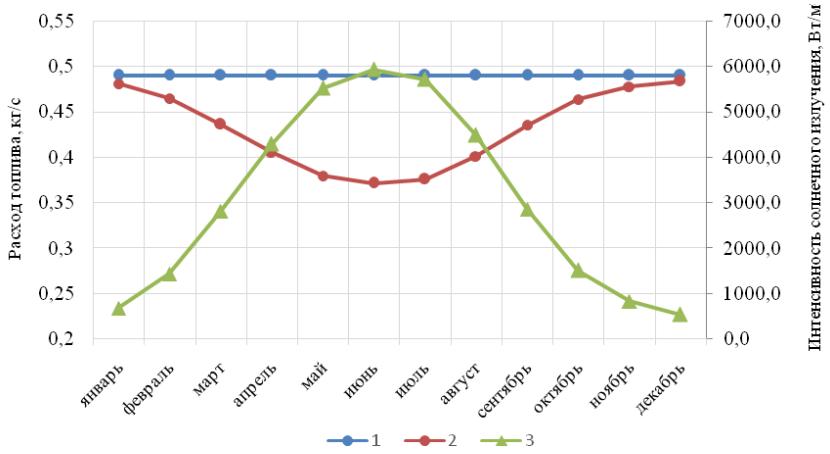

Рис. 2. Расход топлива (лузга подсолнечника) на гибридной мини-ТЭС в зависимости от интенсивности солнечного излучения: 1- без использования солнечного нагревателя; 2 – с солнечным нагревателем; 3 – интенсивность солнечного излучения

Fig. 2. Fuel consumption (sunflower husk) at a hybrid mini-thermal power plant depending on the intensity of solar radiation: 1 - without using a solar heater; 2 – with a solar heater; 3 – the intensity of solar radiation

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Использование гибридных установок для сжигания биомассы и солнечных коллекторов способствует снижению расхода топлива с 0,49 до 0,43 кг/с для лузги подсолнечника. Общая экономия топлива за год составляет 1854,4 т.

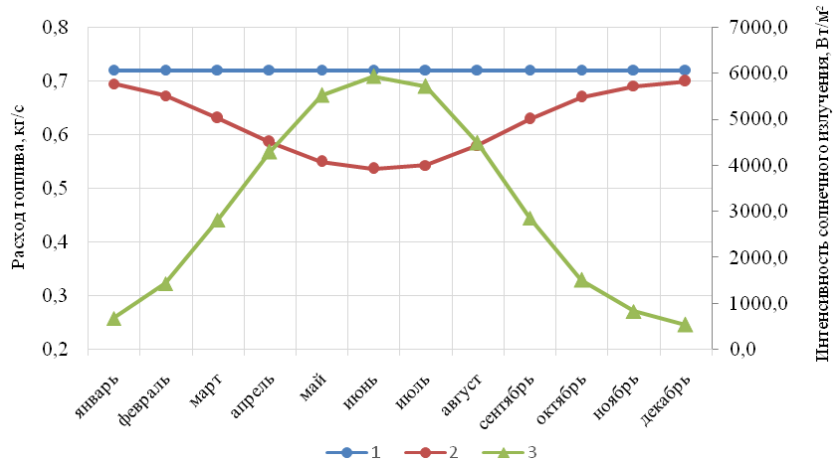

Рис. 3. Расход топлива (солома) на гибридной мини-ТЭС в зависимости от интенсивности солнечного излучения: 1- без использования солнечного нагревателя; 2 – с солнечным нагревателем; 3 – интенсивность солнечного излучения

Fig. 3. Fuel consumption (straw) at a hybrid mini-thermal power plant depending on the intensity of solar radiation: 1 - without using a solar heater; 2 – with a solar heater; 3 – the intensity of solar radiation

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Расход топлива при сжигании соломы в топке котла составляет 0,72 кг/с. Параллельное подключение солнечных коллекторов в данную схему снижает расход топлива до 0,54 кг/с, общая экономия биотоплива составляет 3052,18 т в год.

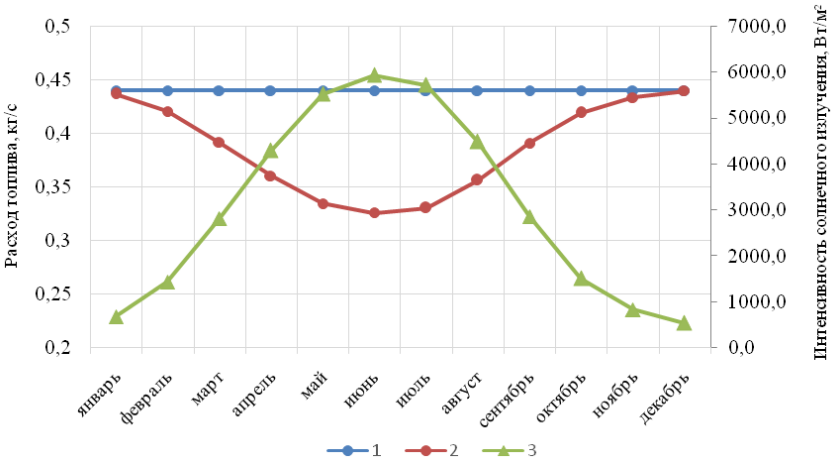

Рис. 4. Расход топлива (стебли кукурузы) на гибридной мини-ТЭС в зависимости от интенсивности солнечного излучения: 1- без использования солнечного нагревателя; 2 – с солнечным нагревателем; 3 – интенсивность солнечного излучения

Fig. 4. Fuel consumption (corn stalks) at a hybrid mini-thermal power plant depending on the intensity of solar radiation: 1 - without using a solar heater; 2 – with a solar heater; 3 – the intensity of solar radiation

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

В связи с более высокой теплотой сгорания наименьший расход топлива из рассмотренных видов биотоплива оказался у стеблей кукурузы и составил 0,44 кг/с. При подключении солнечных коллекторов в контур котла экономия биотоплива за год составила 1687,09 т, расход топлива снизился до 0,33 кг/с.

При подключении солнечных коллекторов в схему мини-ТЭС на биотопливе обеспечивается равномерная выработка энергии и могут быть созданы необходимые запасы топлива. Максимальная эффективность данной схемы достигается в летний период, когда обеспечивается максимум нагрева теплоносителя в солнечных коллекторах и требуется минимальное количество биотоплива для дополнительного подогрева, в то время как максимальная нагрузка на котел приходится на декабрь.

Использование биомассы для производства энергии может сократить зависимость от поставок ископаемого топлива и уменьшить расходы на его закупку, что приведет к

экономии средств сельхозпредприятия. Применение гибридной мини-ТЭС для энергообеспечения сельскохозяйственного предприятия позволит минимизировать или вовсе исключить затраты на топливо, поскольку используются отходы местного производства.

Заключение или Выводы *(Conclusions)*

1. Проведен анализ химического состава и характеристик имеющихся энергетических ресурсов (биотоплива) для сельскохозяйственных предприятий Республики Татарстан.

2. Для тепло- и электроснабжения сельскохозяйственного предприятия предложена технологическая схема гибридной мини-ТЭС с использованием солнечной энергии мощностью 500 кВт. Проведен расчет расхода биотоплива на гибридной мини-ТЭС с параллельным подключением установок концентрации солнечной энергии для солнечной инсоляции Республики Татарстан.

3. Получены зависимости, показывающие динамику изменения расхода топлива по месяцам года в зависимости от изменения интенсивности солнечного излучения для климатических условий Республики Татарстан.

4. Результаты расчетов показывают, что энергоснабжение сельскохозяйственного энергокомплекса может обеспечиваться за счет местных ресурсов – отходов растениеводства и солнечной энергии, – без дополнительных затрат на топливо.

Литература

1. 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.

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

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

4. 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.

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

6. Nathan G.J., Jafarian M., Dally B.B., et al. Solar thermal hybrids for combustion power plant: Agrowingopportunity // Progressin Energy and Combustion Science, 2018, Vol. 64. pp. 4-28.

7. Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., et al. Hybridbiomass-wind power plant for reliable energy generation // Renewable Energy, 2010, Vol. 35, N7, pp. 1436-1443.

8. 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.

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

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

11. Стебли кукурузы - замечательное биотопливо. Доступно по: https://bio.ukr.bio/ru/articles/11019. Ссылка активна на 13 февраля 2024.

12. Srinivas T., Reddy B.V. Hybrid solar–biomass power plant without energy storage // Case Studies in Thermal Engineering. 2014. Vol. 2, pp. 75-81.

13. Значение солнечной инсоляции в г. Казань (Республика Татарстан). Доступно по: https://www.betaenergy.ru/insolation/kazan. Ссылка активна на 10 февраля 2024.

14. Теплоносители для солнечной энергетики. Доступно по: https://termolan.ru/teplonositeli-dlya-solnechnoy-energetiki. Ссылка активна 18 марта 2024.

15. Савина М.В., Ндлову Э.Т., Мингалеева Г.Р. Оценка эффективности парового котла типа КЕ при сжигании низкосортного топлива // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. № 1 (45). Т. 12. С. 3-12.

16. Servert J., San Miguel G., Lopez D., Hybrid solar - biomass plants for power generation; technical and economic assessment // Global NEST Journal, 2011, Vol. 13, N3, pp.

266-276.

17. Шишкин Н.Д., Манченко Е.А. Системный анализ и алгоритмы расчета комбинированных солнечно-ветровых установок // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. №1. С. 100-108.

Авторы публикации

Набиуллина Мадина Фаридовна – преподаватель кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID*: https://orcid.org/0009-0004-2499-3761. E-mail: madinanabiullina@yandex.ru.*

Мингалеева Гузель Рашидовна – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID*: http://orcid.org/0000-0002-7230-6776. E-mail: mingaleeva-gr@mail.ru*

Афанасьева Ольга Валерьевна - канд. техн. наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. *ORCID*: http://orcid.org/0000-0002-6614-2728. E-mail: afanaseva_ov@spbstu.ru.*

Тимофеева Светлана Сергеевна - канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID*: http://orcid.org/0000-0003-4168-2442. E-mail: zvezdochka198512@mail.ru*

References

1. 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, 149: 1-8.

2. Bridgwater A.V., Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading, *Biomass bioenergy*, 2012, 38:68-94.

3. Demirbas A. Resource Facilities and Biomass Conversion Processing for Fuels and Chemicals? *Energy Conversion Management*, 2011, 42 (11): 1357-1378.

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

5. N. Kaliyan, R.V. Morey Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Product, *Biomass Bioenerg*, 2009, 33 (3): 379-359.

6. Nathan G.J., Jafarian M., Dally B.B., et al. Solar thermal hybrids for combustion power plant: Agrowingopportunity, *Progressin Energy and Combustion Science*, 2018, 64: 4-28.

7. Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., et al. Hybridbiomass-wind power plant for reliable energy generation, *Renewable Energy*, 2010, 35 (7): 1436-1443.

8. Karaeva Yu.V., Timofeeva S.S., Gil'fanov M.F. et al. Termohimicheskaya konversiya luzgi podsolnechnika. *Himiya rastitelnogo syrya.* 2023, 2: 335-344.

9. Zabarny G.N., Klyus S.V., Dovzhenko D.S. Ispolzovanie rastitelnih othodov dlya proizvodstva energii. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya*. 2011. 8. С. 100–106. (In Russ).

10. Straw as an energy fuel: possible solutions to problems arising in the production and burning of granular straw and other crop waste. Available at: http://www.energosovet.ru/stat803.html. Accessed: 13 Feb 2024. (In Russ).

11. Corn stalks are a wonderful biofuel. Available at: https://bio.ukr.bio/ru/articles/11019. Accessed: 13 Feb 2024. (In Russ).

12. Srinivas T., Reddy B.V. Hybrid solar–biomass power plant without energy storage. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2014, 2: 75-81.

13. The importance of solar insolation in Kazan (Republic of Tatarstan). Available at: https://www.betaenergy.ru/insolation/kazan. Accessed: 10 Feb 2024. (In Russ).

14. Heat carriers for solar energy. Available at: https://termolan.ru/teplonositeli-dlya-solnechnoy-energetiki. Accessed: 18 March 2024. (In Russ).

15. Savina M.V., Ndlovu E.T., Mingaleeva G.R. Ocenka effektivnosti parovogo kotla tipa KE pri szhiganii nizkosortnogo topliva. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2020, 1 (12): 3-12.

16. Servert J., San Miguel G., Lopez D. Hybrid solar - biomass plants for power generation; technical and economic assessment. *Global NEST Journal*, 2011, 13 (3): 266-276.

17. N.D. Shishkin, E.A. Manchenko. Sistemniy analiz I algoritmi rascheta

konbinirovannih solnechno-vetrovih ustanovok. *Vestnik of ASTU. Series: Management, computer science and informatics*. 2013, 1: 100-108.

Authors of the publication

Madina F. Nabiullina - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID*: https://orcid.org/0009-0004-2499-3761. E-mail: madinanabiullina@yandex.ru.*

Guzel R. Mingaleeva - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID*: http://orcid.org/0000-0002-7230-6776. Email mingaleeva-gr@mail.ru.*

Olga V. Afanaseva - Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia. *ORCID*: http://orcid.org/0000-0002-6614-2728. E-mail: afanaseva_ov@spbstu.ru.*

Svetlana S. Timofeeva - Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC, Kazan, Russia. *ORCID*: http://orcid.org/0000-0003-4168-2442. E-mail: zvezdochka198512@mail.ru*

Шифр научной специальности по паспорту научной специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено	***20.03.2024 г.***
Отредактировано	***03.05.2024 г.***
Принято	***14.05.2024 г.***