

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, РАБОТАЮЩЕЙ В СОСТАВЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Набиуллина М.Ф., Мингалеева Г.Р.

Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

e-mail: madinanabiullina@yandex.ru

В статье рассмотрены технико-эксплуатационные характеристики создания автономных гибридных электростанций, объединяющих параболические солнечные коллекторы и котлы на растительном биотопливе, для энергоснабжения сельскохозяйственных объектов Республики Татарстан. Предложена принципиальная схема, в которой термомасляный контур гелиоустановки интегрирован с биотопливным котлом и многоступенчатой системой теплообмена для выработки перегретого пара. На основе нормативных методов расчёта определены расходы гранулированного топлива различного состава (лузга подсолнечника, солома, шелуха овса) при работе в гибридном режиме. Показано, что подключение солнечных коллекторов снижает годовой расход биотоплива на 21-33% в зависимости от его вида. Выявлено, что работа котла в гибридной схеме напрямую зависит от климатических условий региона, теплофизических и механических свойств топлива и теплоносителя. Для электростанции мощностью 500 кВт срок окупаемости составил 9 лет 8 месяцев, при этом в качестве топлива используются собственные отходы сельскохозяйственного предприятия.

Ключевые слова: гибридные электростанции, возобновляемые источники энергии, биомасса, солнечная энергия, автономное энергоснабжение.

INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THE EFFICIENCY OF A HYBRID POWER PLANT OPERATING AS PART OF AN AGRICULTURAL ENERGY COMPLEX

Nabiullina M.F., Mingaleeva G.R.

Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

The article examines the technical and operational characteristics of creating autonomous hybrid power plants that combine parabolic solar collectors and boilers using plant-based biofuel to supply energy to agricultural facilities in the Republic of Tatarstan. A basic schematic is proposed, in which the thermal oil circuit of the solar installation is integrated with a biofuel boiler and a multi-stage heat exchange system for generating superheated steam. Based on standard calculation methods, the consumption rates of granulated fuel of various compositions (sunflower husk, straw, oat husk) during operation in hybrid mode have been determined. It has been shown that connecting solar collectors reduces the annual consumption of biofuel by 21-33%, depending on its type. It has been revealed that the operation of a boiler in a hybrid scheme directly depends on the climatic conditions of the region, as well as on the thermophysical and mechanical properties of the fuel and coolant. For a power plant with a capacity of 500 kW, the payback period was 9 years and 8 months, with the farm's own waste being used as fuel.

Keywords: hybrid power plants, renewable energy sources, biomass, solar energy, autonomous energy supply.

В настоящее время вопросы надежности и доступности энергоснабжения потребителей являются ключевыми при формировании проектов обеспечения тепловой и электрической энергией, что важно как для создания комфортных условий жизни населения, так и обеспечения конкурентоспособности предприятий, поскольку стоимость энергии существенно влияет на себестоимость производимой продукции [1].

Эта задача может быть решена путем вовлечения в топливно-энергетический баланс регионального уровня местных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – солнечной, ветровой, энергии биомассы.

Основным преимуществом ВИЭ является доступность и практическое отсутствие платы за их использование. Основной недостаток ВИЭ – это 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].

Интеграция солнечных тепловых электростанций и котельных установок на биотопливе открывает перспективы для создания гибридных энергетических комплексов. Такой подход позволяет оптимизировать выработку энергии, когда солнечные концентраторы задействованы в светлое время суток и осуществляется переход на биомассу в периоды недостаточной инсоляции (ночью, в пасмурную погоду, а также в переходные временные интервалы) [3].

Существуют различные схемы гибридных электростанций на возобновляемых источниках энергии, где вспомогательным контуром служит паровой котел на биотопливе [4].

На основе анализа известных и перспективных технологических схем гибридных электростанций и методов их расчета сформирована обобщенная методика выбора типа технологической схемы и ее расчета [5]. На рисунке 1 представлен алгоритм обобщенного метода выбора технологической схемы гибридной электростанции на возобновляемых источниках энергии и ее расчета.

Тип технологической схемы в первую очередь определяется видом твердого биотоплива, которое доступно в данном регионе или стране и использование которого является наиболее целесообразным. Для сельскохозяйственных районов Республики Татарстан в качестве топлива в основном может использоваться лузга подсолнечника, стебли подсолнечника и кукурузы, шелуха гречихи, овса и дресина.

Гибридные электростанции на территории сельскохозяйственных предприятий могут работать в сочетании с солнечной энергией или ветровой энергоустановкой. Такие схемы целесообразно использовать, когда интенсивность прямого солнечного излучения превышает 1200 кВт/м^2 и скорость ветра больше 3 м/с . После того как будут определены топливо и тип технологической схемы, выбор

основного оборудования и его расчет могут быть осуществлены в соответствии с существующими методиками.

Для эффективной и надежной эксплуатации автономных энергетических установок, удаленных от централизованного энергоснабжения, целесообразно использовать местные энергетические ресурсы вместо дорогостоящего твердого и жидкого привозного топлива [1].

Цель научного исследования заключается в проведении комплексной оценки результативности функционирования гибридных электростанций, что позволит осуществить многофакторный анализ различных конфигураций интеграции возобновляемых источников энергии с котлами на твердом биотопливе.

Материалы и методы

Анализ доступных энергетических ресурсов для сельскохозяйственных предприятий Республики Татарстан показывает, что всего в республике образуется более 3.27 млн. тонн сельскохозяйственных отходов ежегодно, из них наибольшую долю составляет солома, которая в основном используется на корм и подстилки для животных. Стебли подсолнечника в основном утилизируются, закапываются

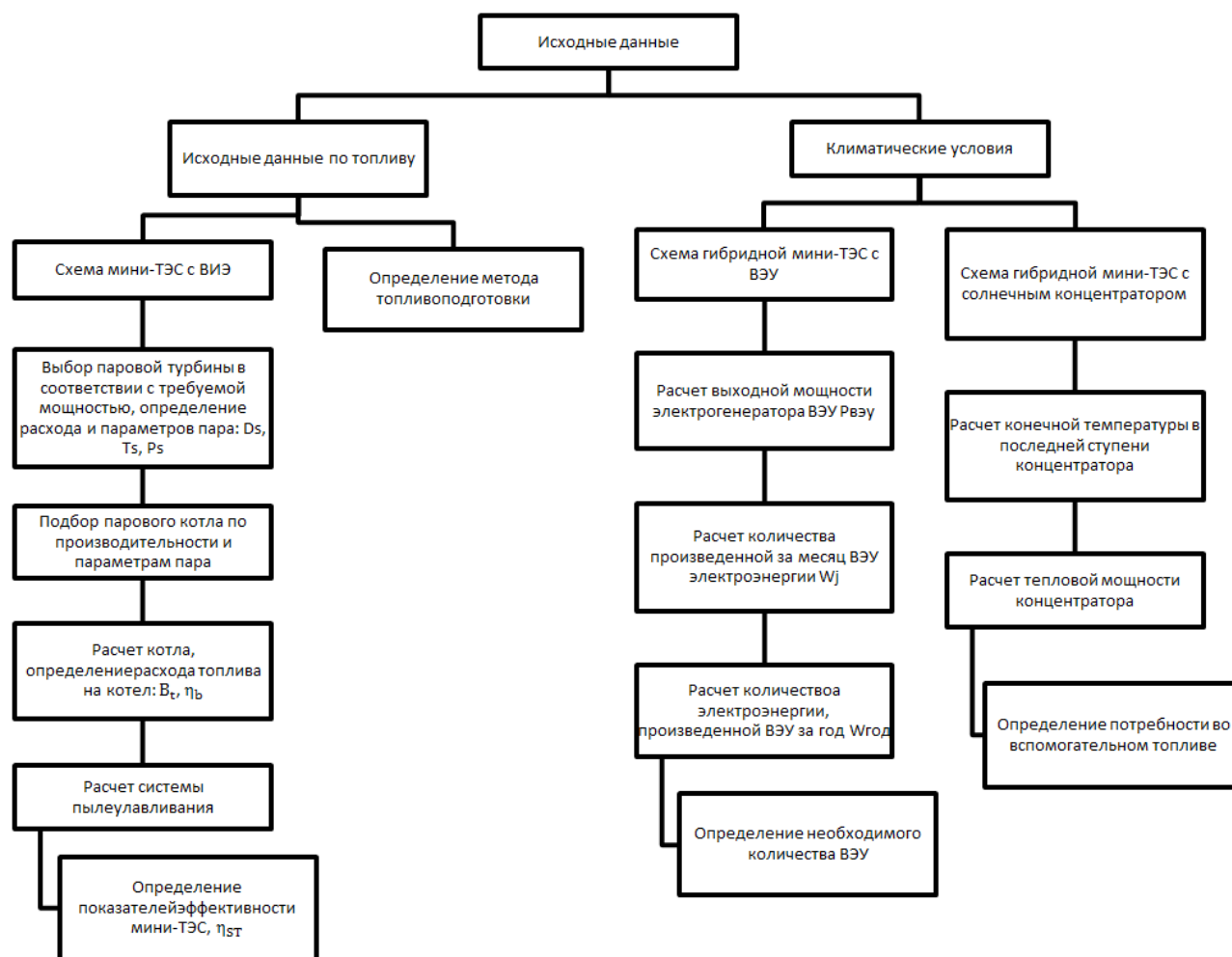


Рис. 1. Алгоритм обобщенного метода выбора технологической схемы гибридной электростанции и его расчета

в землю при проведении полевых работ. Наиболее перспективны для энергетического использования, кроме соломы, также лузга подсолнечника, объемы которой составляют 52.97 тыс. тонн, и шелуха зерновых культур – 198.92 тыс. тонн ежегодно.

В данной работе для утилизации таких отходов с выработкой электрической энергии предлагается малая автономная электростанция, на которой используется биомасса из растительных сельскохозяйственных отходов и солнечная энергия. При этом для обеспечения равномерной выработки энергии предлагается включение твердотопливного котла в контур солнечных коллекторов. Схема, представленная на рисунке 2, работает следующим образом. В контуре солнечных параболических коллекторов 1 синтетическое масло подогревается до 160-400°C за счет солнечного излучения в зависимости от времени года. Затем подогретое масло направляется в котел на биотопливе для дополнительного нагрева до 400°C. Тепловая энергия синтетического масла передается воде для получения перегретого пара в многоступенчатой системе теплообмена. Пар из теплообменника направляется в паровую турбину 4 для выработки электрической энергии.

В качестве теплоносителя в данной схеме могут использоваться жидкости с низкой температурой замерзания для эксплуатации солнечных коллекторов в зимнее время и высокой температурой вспышки для обеспечения образования пара с необходимой температурой и давлением.

В периоды повышенной солнечной активности, когда теплоноситель в трубках-поглотителях нагревается до температуры 390-400°C за счет солнечной инсоляции, биотопливный котел может быть отключен, так как теплоты, получаемой от солнеч-

ного 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 (рис. 2): 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 естественная сушка.

Суммарная электрическая нагрузка сельскохозяйственных потребителей фермерского хозяйства, состоящего из птичника, коровника, кормоцехов, зернохранилища, семенохранилища, склада минеральных удобрений и гаража, а также административного здания и жилого дома для работников фермы, составляет от 470 до 500 кВт [6].

Таким образом, сельскохозяйственное предприятие (ферма, перерабатывающее предприятие и др.) и гибридную электростанцию можно рассматривать как энергетический комплекс мощностью 500 кВт, предназначенный для автономного обеспечения тепловой и электрической энергией производственных процессов и нужд потребителей и работающий на местных ресурсах.

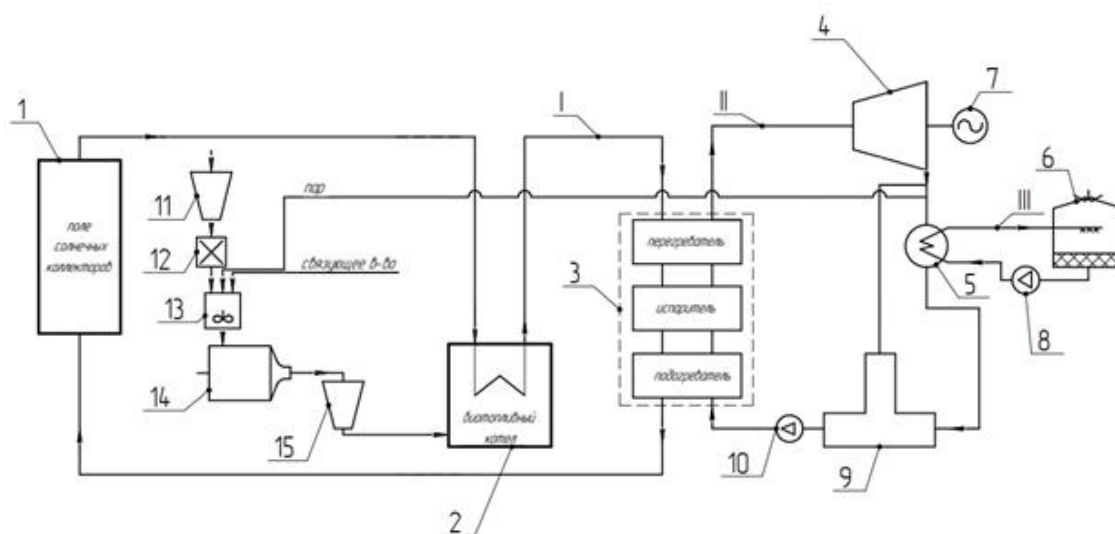


Рис. 2. Схема выработки тепловой и электрической энергии из твердого биотоплива с использованием солнечной энергии: 1 – солнечный параболический коллектор, 2 – биотопливный термомасляный котел, 3 – теплообменник, 4 – паровая турбина, 5 – конденсатор, 6 – вентиляционная градирня, 7 – электрогенератор,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

Взаимосвязи между параметрами и технологическими характеристиками компонентов энергоустановки сводятся к компактному набору ключевых 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 [7].

Уравнение энергетического баланса параболического солнечного коллектора имеет вид [8]:

$$Q_{\text{солн.}} \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot (\theta) = Q_{\text{п}} + Q_{\text{пот.}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{солн.}}$ – располагаемая солнечная энергия, Вт; $\eta_{\text{опт}}$ – оптический КПД солнечного коллектора; (θ) – модификатор угла падения; $Q_{\text{п}}$ – полезный прирост энергии, Вт; $Q_{\text{пот.}}$ – потери в системе солнечных коллекторов, Вт.

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

$$Q_{\text{п}} = D_{1T} \cdot c_{p1T} \cdot (t'_{1T} - t'_{1T}) + Q_{\text{пот.}}, \quad (2)$$

где D_{1T} – массовый расход теплоносителя, t'_{1T} – температура теплоносителя на входе в коллектор; t'_{1T} – температура теплоносителя на выходе из коллектора; c_{p1T} – средняя удельная теплоемкость теплоносителя.

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

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{кон}}, \quad (3)$$

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

Потери энергии за счет излучения определяют по зависимости:

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

где $\varepsilon_{\text{абс}}$ – коэффициент эмиссии абсорбера солнечного коллектора, принимается в диапазоне $0.05 \div 0.1$; A – площадь солнечного коллектора, м^2 ; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{абс}}$ – температура абсорбера солнечного коллектора, $^\circ\text{C}$, принима-

ется равной температуре теплоносителя в трубках; $t_{\text{неба}}$ – температура небосвода над солнечным коллектором, $^\circ\text{C}$, принимается равной температуре окружающей среды.

Потери энергии за счет теплопроводности и конвективного теплообмена рассчитываются следующим образом:

$$Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{кон}} = A \cdot U_L \cdot (t_{\text{абс}} - t_{\text{окр}}), \quad (5)$$

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

Ключевым показателем расчета энергоустановки в целом является температура на выходе из солнечного коллектора, $^\circ\text{C}$, которая определяется по следующей формуле:

$$t'_{1T} = t'_{1T} + \frac{Q_{\text{солн.}} \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot (\theta) - Q_{\text{пот.}}}{D_{1T} \cdot c_{p1T}}, \quad (6)$$

где t'_{1T} – температура теплоносителя на входе в систему солнечных коллекторов, $^\circ\text{C}$; $Q_{\text{солн.}}$ – располагаемая солнечная энергия, Вт; $\eta_{\text{опт}}$ – оптический КПД солнечного коллектора; (θ) – модификатор угла падения; $Q_{\text{пот.}}$ – потери в системе солнечных коллекторов от излучения и конвекции, Вт.

Расчет термомасляного котла сводится к нахождению теплоты на подогрев синтетического масла и расхода топлива. Расход топлива, $\text{кг}/\text{с}$, подаваемого в топку, рассчитывается следующим образом [9]:

$$B = \frac{Q_{\text{к}} - Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{к}}$ – количество тепла, полезно использованное в котле, определяется по формуле, $\text{кДж}/\text{кг}$; $Q_{\text{р}}$ – располагаемое тепло 1 кг твердого топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$; $\eta_{\text{к}}$ – КПД котла, %.

Тогда формулу расхода топлива можно записать в следующей форме:

$$B = \frac{D_{1T}[c_{p2T}(t'_{2T} - t'_{1T}) - c_{p1T}(t'_{1T} - t'_{1T})]}{Q_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}}, \quad (8)$$

где t'_{1T} – температура синтетического масла на выходе из многоступенчатой системы теплообмена, $^\circ\text{C}$, которая определяется из теплового баланса теплообменного аппарата с учетом фазового перехода одного из теплоносителей [10]:

$$t'_{1T} = t''_{3T} = t'_{3T} - \frac{G_B \cdot c_B (t_s - t'_3) + G_B \cdot r + G_n \cdot (h''_3 - h'_3)}{G_M \cdot c_M}, \quad (9)$$

где G_B – массовый расход воды в подогреватель многоступенчатой системы теплообмена, кг/с; c_B – теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); t_s – температура насыщения воды, °C; t'_3 – температура воды на входе в подогреватель многоступенчатой системы теплообмена, °C; r – удельная теплота парообразования воды, Дж/кг; G_n – массовый расход пара в перегреватель многоступенчатой системы теплообмена, кг/с; h''_3 – энтальпия пара на выходе из подогревателя, Дж/кг; h'_3 – энтальпия пара на входе в подогреватель, Дж/кг.

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

Результаты и обсуждения

Республика Татарстан является регионом Восточно-Европейской равнины и имеет средний уровень солнечного воздействия и умеренное солнечное сияние. Республика Татарстан представляет собой регион, где применение гибридных электростанций является рациональным решением с уче-

том годового изменения угла наклона. В таблице 1 представлены данные солнечной инсоляции и оптимального угла наклона солнечных параболических коллекторов относительно поверхности земли в Республике Татарстан [11].

В схеме гибридной электростанции предполагается установка котла, работающего на высокотемпературном органическом теплоносителе и предназначенного для сжигания топлива низкого качества [12]. Для определения расхода топлива в котле с механической топкой, используемой для сжигания твердого топлива на гибридной электростанции мощностью 500 кВт, использовался нормативный метод расчета.

Исследуемым биотопливом для определения расхода топлива являются топливные гранулы из лузги подсолнечника, соломы и шелухи овса с теплотой сгорания 15.4 МДж/кг, 11.7 МДж/кг и 10.2 МДж/кг соответственно.

На рисунке 3 представлен график изменения показателей работы гибридной электростанции с использованием биотоплива различного состава и солнечной энергии в зависимости от климатических факторов Республики Татарстан в течение года.

Использование гибридных установок для сжигания биомассы и солнечных коллекторов предполагает изменение расхода топлива в диапазоне от 0.8369 до 0.226 кг/с для гранул из соломы в течение

Таблица 1

Солнечная инсоляция и оптимальный угол наклона солнечных параболических коллекторов относительно поверхности земли в Республике Татарстан

	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Солнечная инсоляция, кВт·ч/м²	1.5	2.5	3.9	4.9	5.8	6.2	6.0	4.8	3.5	2.3	1.7	1.4
Оптимальный угол наклона, °	71	63	50	35	20	11	17	29	44	57	69	74

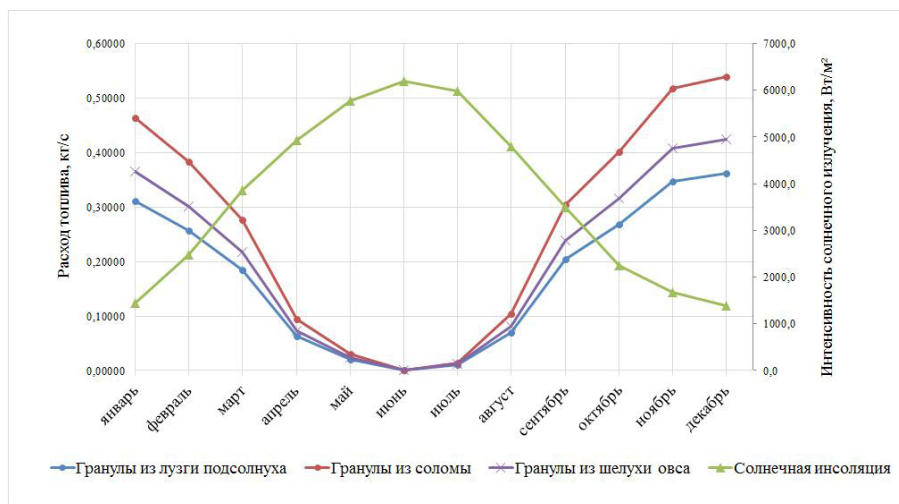


Рис. 3. Расход топлива при сжигании биотопливных гранул различного состава

года. Общий расход топлива за год составляет 8 227.3 тонн. Расход топлива при сжигании гранул из шелухи овса в топке котла составляет 0.6587 кг/с. Параллельное подключение солнечных коллекторов в данную схему снижает расход топлива в среднем до 0.208 кг/с, общий расход биотоплива из шелухи овса составляет 6 474.9 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 0.561 кг/с. При подключении солнечных коллекторов в контур котла расход биотоплива за год составил 5 514.3 т, расход топлива снизился до 0.176 кг/с.

На рисунке 4 представлен график изменения показателей работы гибридной электростанции с использованием различных теплоносителей в контуре солнечных коллекторов и биотопливного термомасляного котла в зависимости от климатических факторов Республики Татарстан в течение года.

Выбор теплоносителя зависит от его физических характеристик: вязкость, теплоемкость, точка замерзания, точка кипения, температура вспышки. Таким образом, в качестве исследуемых теплоносителей были выбраны эвтектическая смесь бифенил/дифенил оксида (Therminol VP-1) с теплоемкостью 2180 Дж/кг·°C при 400°C, и температурой кипения 400°C, раствор диэтилового спирта и 0.2% порошка кремниевой кислоты с теплоемкостью 2550 Дж/кг·°C при 250°C и температурой кипения 250°C, раствор жидкого диэтилового эфира + (0.1-0.5)% одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) с теплоемкостью 2500 Дж/кг·°C при 250°C и температурой кипения 377°C [13].

Расход топлива в термомасляном котле на био-

топливе имеет прямую зависимость от теплоемкости теплоносителя, используемого в системе. Чем больше теплоноситель нагревается в системе параболических солнечных коллекторов, тем меньше топлива затрачивается на подогрев теплоносителя в котле. Таким образом, раствор диэтилового спирта и 0.2% порошка кремниевой кислоты дает снижение расхода топлива с 0.8703 до 0.5512 кг/с при общем расходе топлива 20 180.7 тонн в год. Если в качестве теплоносителя используется раствор жидкого диэтилового эфира с добавлением 0.1-0.5% ОСУНТ, расход биотоплива снижается с 0.9215 до 0.1783 кг/с. Общий расход топлива в год составит 9 695.4 тонн. Эвтектическая смесь бифенил/дифенил оксида позволяет уменьшить расход топлива с 0.561 до 0.176 кг/с. Общий расход топлива в год составит 5 514.3 тонн.

Срок окупаемости для автономных источников энергоснабжения рассчитывается как отношение капитальных затрат к разности между стоимостью энергии, отпускаемой от централизованной энергосистемы (с учетом платы за подключение к электросетям и стоимости самой энергии) и вырабатываемой на объекте [14]:

$$T = \frac{K}{C_{\text{центр.э}} - P_{\text{э}}}, \quad (10)$$

где K – общая стоимость оборудования гибридной электростанции малой мощности, тыс. руб.; $C_{\text{центр.э}}$ – стоимость электроэнергии, отпускаемой от централизованной энергосистемы, с учетом платы за подключение к электросетям, тыс. руб.; $P_{\text{э}}$ – стоимость потребляемой электрической энергии,

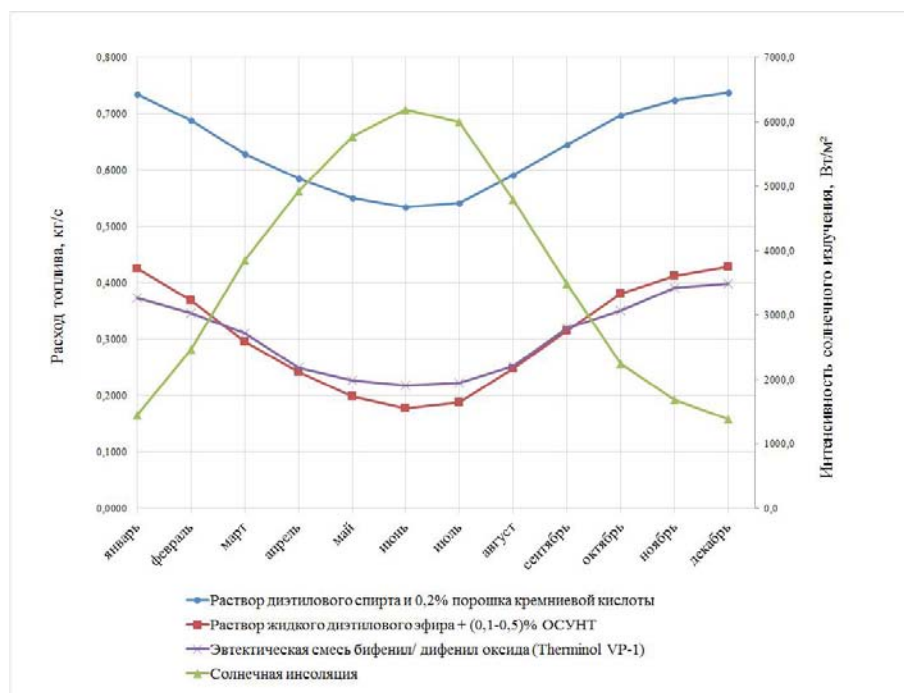


Рис. 4. Расход топлива при использовании различных теплоносителей

вырабатываемой гибридной электростанцией, тыс. руб.

Таким образом, срок окупаемости при капитальных вложениях, равных 100 659 тыс. руб., стоимости электроэнергии, отпускаемой от централизованной энергосистемы, равной 17 237.64 тыс. руб., и стоимости потребляемой электрической энергии, вырабатываемой гибридной электростанцией, равной 4 548.86 тыс. руб., составляет 7 лет 11 месяцев для гибридной электростанции на биотопливе номинальной электрической мощностью 500 кВт, при этом затраты на топливо в течение срока эксплуатации отсутствуют.

Заключение

Проведенные исследования показали высокую эффективность применения автономных гибридных электростанций на основе возобновляемых источ-

ников энергии для децентрализованного энергоснабжения сельскохозяйственных объектов. Разработанная методика выбора и расчета технологических схем гибридных электростанций с учетом климатических особенностей региона позволяет определить оптимальные параметры работы комбинированных энергоустановок на основе биомассы и солнечной энергии. Установлено, что использование топливных гранул из лузги подсолнечника в котлах гибридной электростанции наиболее эффективно в связи с более высокой теплотворной способностью. Гибридная электростанция сельскохозяйственного предприятия с номинальной мощностью 500 кВт может окупиться менее чем за 8 лет, используя местные растительные отходы в качестве топлива. Кроме того, решается серьезная экологическая проблема, связанная с утилизацией растительных отходов.

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. 99-132. EDN VWYFED.
2. Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., et al. Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation. Renewable Energy. 2010. Vol. 35. No. 7. 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. Angelo Algieri, PietropaoloMorrone. Thermo-economic investigation of solar-biomass hybrid cogeneration systems based on small-scale transcritical organic Rankine cycles. Applied Thermal Engineering. Vol. 210. 2022. 118312.
5. Mingaleeva G.R., Afanaseva O.V., Nguen D.T., Pham D.N., Zunino P. The Integration of Hybrid Mini Thermal Power Plants into the Energy Complex of the Republic of Vietnam. Energies. 2020. Vol. 13. 5848. DOI 10.3390/en13215848.
6. 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. EDN TMCAWW.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026686845 Российская Федерация. Расчетный модуль для определения энергетических показателей гибридной электростанции: заявл. 07.08.2026; опублик. 02.09.2026 / М.Ф. Набиуллина, Г.Р. Мингалеева; заявитель ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».
8. Benidir A., Khaldi F., Benmachiche A.H., Bouras F. Numerical thermal analysis of Schott 2008 PTR70 solar receiver under hassiR'mel power plant operation conditions. Journal of Engineering Science and Technology. 2018. No.13. Pp. 122-140.
9. Servet J., San Miguel G., López D. Hybrid solar – biomass plants for power generation. Technical and economic assessment. Global NEST Journal. 2011. V. 13. No. 3. Pp. 266-276.
10. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи: учеб. пособие для вузов / под ред. М.А. Михеева. 2-е изд., стереотип. М.: Энергия. 1977. 344 с.
11. Андреев Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Энергетический потенциал агробиомассы в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. Т. 78. №6. С. 50-63. DOI 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.5. EDN ZCKNIN.
12. 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.
13. 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.
14. Моделирование технологических схем мини-ТЭС / О.В. Афанасьева, Г.Р. Мингалеева. Москва: Изд. дом МЭИ. 2014. 218 с.

References

1. Kusova Zh.G., Gal'perin A.A., Ceboev R.Z., Huzmiev I.K., Gassieva O.I. Local power supply for mountainous areas using renewable energy sources (RES). *Nauchnye trudy Vol'nogo jekonomicheskogo obshhestva Rossii*. 2011. V. 153. Pp. 99-132. EDN VWYFED.
2. Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., et al. Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation. *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35. No. 7. 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. Angelo Algieri, PietropaoloMorrone. Thermo-economic investigation of solar-biomass hybrid cogeneration systems based on small-scale transcritical organic Rankine cycles. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 210. 2022. 118312.
5. Mingaleeva G.R., Afanaseva O.V., Nguen D.T., Pham D.N., Zunino P. The Integration of Hybrid Mini Thermal Power Plants into the Energy Complex of the Republic of Vietnam. *Energies*. 2020. Vol. 13. 5848. DOI 10.3390/en13215848.

6. Nabiullina M.F., Mingaleeva G.R., Afanas'eva O.V., Timofeeva S.S. The use of plant waste to ensure the functioning of agricultural energy complexes. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy jenergetiki*. 2024. V. 26. No. 3. Pp. 120-131. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131. EDN TMCAWW.
7. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2026686845 (Russian Federation). Calculation module for determining the energy performance indicators of a hybrid power plant: application filed 07.08.2026; published 02.09.2026. M.F. Nabiullina, G.R. Mingaleeva; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University».
8. Benidir A., Khaldi F., Benmachiche A.H., Bouras F. Numerical thermal analysis of Schott 2008 PTR70 solar receiver under hassiR'mel power plant operation conditions. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2018. No.13. Pp. 122-140.
9. Servet J., San Miguel G., López D. Hybrid solar – biomass plants for power generation. Technical and economic assessment. *Global NEST Journal*. 2011. V. 13. No. 3. Pp. 266-276.
10. Miheev M.A., Miheeva I.M. *Osnovy teploperedachi: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Fundamentals of Heat Transfer: a textbook for universities]. Ed. by M.A. Mikheev. 2nd ed., unaltered. Moscow: Energiya. 1977. 344 p.
11. Andreenko T.I., Kiseleva S.V., Rafikova Ju.Ju. The energy potential of agrobiomass in the Rostov Region, as well as in the Krasnodar and Stavropol Territories. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2023. V. 78. No. 6. Pp. 50-63. DOI 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.5. EDN ZCKNIN.
12. Savina M.V., Ndlovu Je.T., Mingaleeva G.R. Assessment of the efficiency of a KE-type steam boiler when burning low-grade fuel. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta*. 2020. No. 1(45). V. 12. Pp. 3-12.
13. Nabiullina M.F. *Ispol'zovaniye razlichnykh teplonositeley v solnechnykh kollektorakh gibridnykh elektrostantsiy* [The use of various heat carriers in solar collectors of hybrid power plants]. Energy and Energy Conservation: Theory and Practice: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, December 7-9, 2022. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. 2023. Pp. 154-1-154-5. EDN BEWZMA.
14. Afanas'eva O.V., Mingaleeva G.R. *Modelirovaniye tekhnologicheskikh skhem mini-TES* [Modeling of technological schemes of mini-thermal power plants]. Moscow: Publishing house. MPEI house. 2014. 218 p.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Набиллина Мадина Фаридовна

старший преподаватель кафедры «Энергетическое машиностроение», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Мингалева Гузель Рашидовна

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Information about authors
Affiliations

Nabiullina Madina Faridovna

Senior Lecturer at the Department of Power Engineering, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Mingaleeva Guzel Rashidovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Power Engineering at Kazan State Energy University, 420066, Kazan, Russia

Поступила в редакцию 07.08.2026 г.