

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 621.311.26

**П.Н. Анисимов, Ю.А. Ширнин, И.В. Петухов, К.П. Рукомойников,
С.Я. Алибеков, Е.С. Шарапов**

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ДРЕВЕСНОМ ТОПЛИВЕ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА

Введение. Актуальность вопросов автономного энергообеспечения производственных объектов лесного комплекса с применением древесного топлива обусловлена несколькими факторами. Во-первых, большие запасы качественной древесины в России расположены на территориях, удаленных от сетей централизованного энергоснабжения [Куницкая и др., 2021]. Специалисты отмечают, что расстояние вывозки заготавливаемой древесины в современных условиях может составлять 200–300 км [Медведев, Мохирев, 2022] и более [Помигуев и др., 2022]. Для уменьшения доли затрат на транспорт и увеличения стоимости транспортируемых материалов предлагается осуществлять частичную или полную переработку древесных, а также недревесных ресурсов ближе к месту их заготовки при помощи мобильных производственных линий [Помигуев и др., 2022]. Однако это автоматически увеличивает количество и энергоемкость технологических операций на лесосеке и лесном складе.

В настоящее время не решена проблема автономного энергообеспечения подобных малых производств, размещаемых вдали от сетей электро- и газоснабжения. Единственными промышленно применяемыми технологиями для энергообеспечения таких объектов сейчас являются дизельный двигатель и дизель-генераторная мини-электростанция, а также газопоршневой двигатель и газопоршневая мини-электростанция на сжиженном углеводородном газе или компримированном природном газе. Существенным недостатком данных вариантов является необходимость постоянной доставки дизельного топлива или газа на большие расстояния.

Во-вторых, дизельное топливо является невозобновляемым топливом, при сжигании которого образуется большое количество CO_2 . Древесное топливо во всем мире признано углерод-нейтральным топливом [Feron et al., 2019]. В свете борьбы с выбросами парниковых газов, а также стремлении уменьшать углеродный след любой продукции [Птичников, Шварц, 2023], замена дизельного топлива в процессах лесозаготовки и деревообработки на местное топливо из древесины представляется перспективной задачей.

Кроме того, автономное энергообеспечение на основе древесного топлива способствует более полному использованию древесных ресурсов, вовлечению в оборот низкокачественной древесины, лесосечных отходов, отходов деревообработки. Лесосечные отходы имеют низкий коэффициент полндревесности [Мохов и др., 2020], поэтому их переработка и топливное использование мобильной энергетической установкой непосредственно на лесосеке [Беляев, Левина, 2019; Онучин, Анисимов, 2017] является предпочтительным.

Ресурсосбережение, экологическая безопасность и энергетическая эффективность являются неотъемлемыми требованиями к современным и перспективным производствам в любой отрасли, в том числе лесной промышленности. Высокие показатели в основном достигаются усложнением техники и технологий. Использование древесного топлива в лесной промышленности может внести значительный вклад в снижение выбросов парниковых газов в результате деятельности лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств, а также коммунальной энергетики районов богатых древесными ресурсами, но не имеющих централизованного газоснабжения [Анисимов, Медяков, 2022].

Для разрешения поставленных вопросов предлагается разработать мобильные мини-электростанции на древесном топливе мощностью от 1 до 10 МВт, способные надежно функционировать при отрицательных температурах наружного воздуха. В настоящей работе рассматривается энергоустановка на основе газификатора древесины, газовой турбины открытого цикла и паровой турбины ОЦР (органического цикла Ренкина).

Научная значимость данного исследования заключается в результатах имитационного моделирования технологической схемы энергоустановки, обладающей новизной, а также в результатах численных экспериментов, впервые полученных для данной схемы.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной имитационной модели для выполнения экспериментов по определению параметров функционирования мини-

электростанции с газовой турбиной и турбиной органического цикла Ренкина, в том числе для оптимизации конструктивных и схемно-технологических решений. В частности, был определен оптимальный расход охлаждающего воздуха при заданных условиях.

Целью работы является повышение эффективности автономного энергообеспечения объектов лесного комплекса путем разработки и оптимизации мини-электростанции на древесном топливе.

Методика исследования базируется на имитационном моделировании функционирования предложенной схемы энергоустановки в заданных условиях окружающей среды, проведении численных экспериментов и анализе их результатов.

При разработке схемы энергоустановки применены методы анализа известных [Кольниченко и др., 2020; Жуйков и др., 2020; Глуховский и др., 2009] и синтеза новых технических решений автономных мини-электростанций на древесном топливе. В результате предложены схемно-технологические решения мини-электростанции с газовой турбиной на генераторном газе из древесных отходов и турбиной ОЦР, учитывающие особенности применения на объектах лесозаготовки и деревообработки.

Конкурирующими выбранной технологии мини-электростанции на древесном топливе являются: газификация и ДВС, газификация и SOFC (твердоокисные высокотемпературные топливные элементы), газификация и двигатель Стирлинга, сжигание в паровом котле и паросиловая установка, сжигание в термомасляном котле и ОЦР [Boyaghchi и др., 2018], сжигание в теплогенераторе и газовая турбина закрытого цикла.

Основные технические сложности реализации мини-электростанции с применением технологии сжигания генераторного газа в тепловом двигателе заключаются в необходимости полной очистки генераторного газа от конденсирующихся примесей и твердых частиц [Митрофанов, 2022]. Основные преимущества – это возможность выполнения энергоустановки в передвижном исполнении, благодаря отсутствию большого количества тепломемных и замерзающих жидкостей, относительно низкая тепловая инерция работы и возможность работы в сложных климатических условиях.

Применение паросилового цикла, замкнутого цикла газовой турбины и цикла Стирлинга не требуют такой полной очистки газа, но имеют свои недостатки. Цикл Ренкина на водяном паре больше подходит для стационарных установок из-за габаритов парогенератора, необходимости хорошей водоподготовки и постоянного наличия воды в контуре. Газовая тур-

бина с замкнутым контуром циркуляции рабочего тела и двигателя Стирлинга для эффективной работы требуют интенсивного жидкостного либо испарительного охлаждения.

На рис. 1 представлена технологическая схема мини-электростанции. Выбор газотурбинной установки в качестве основной генерирующей энергоустановки обусловлен особенностями объектов автономного энергообеспечения – производственные площадки в лесном комплексе.

Мини-электростанция работает следующим образом. В бункере со щепой 1 происходит подсушка древесного топлива, шнековым транспортером 2 с электроприводом 3 щепа подается в термохимический газогенератор 4. Произведенный генераторный газ проходит предварительную очистку в мультициклоне 5, охлаждается в рекуператоре 6, проходит фильтр тонкой очистки 8 и дожимным компрессором 9 подается в камеру сгорания газовой турбины 10. Компрессор газовой турбины 11 подает воздух в камеру сгорания 10. Продукты сгорания газа совершают работу расширения в газовой турбине 12, которая приводит в движение электрогенератор 13. Теплота отработавших газов турбины используется в турбине органического цикла Ренкина (ОЦР). Контур ОЦР является замкнутым и состоит из циркуляционного насоса низкикипящего рабочего тела 14, испарителя 15 и пароперегревателя 16. Перегретый пар рабочего тела подается на турбину ОЦР 17, где совершает работу расширения. Отработавший пар конденсируется в конденсаторе 18, охлаждаемом атмосферным воздухом напрямую или через промежуточный теплоноситель. Сконденсированное рабочее тело снова подается насосом 14, таким образом контур ОЦР замыкается. Турбина 17 приводит в движение электрогенератор 19. Выработанная электроэнергия с генераторов 13 и 19 проходит через регуляторно-преобразовательный модуль 20 и направляется либо на аккумулятор 21, либо потребителю локальной системы энергоснабжения. Отработавшие газы газовой турбины вместе с теплым воздухом через газовый коллектор 22 направляются в бункер для сушки щепы.

С целью определения рабочих параметров предложенной энергоустановки разработана ее математическая модель. Имитационная модель выполнена с применением отечественной прикладной программы динамического моделирования технических систем SimInTech [Петухов, 2018]. Модуль «Теплогидравлика» данной программы позволяет моделировать процессы тепло- и массопереноса, преобразований тепловой энергии в механическую и электрическую, аэро- и гидродинамические расчеты теплообменников, работу турбин и компрессоров.

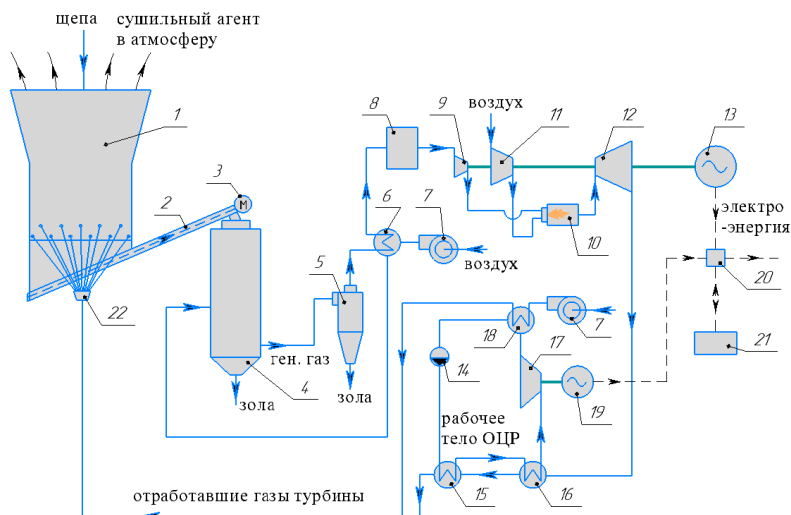


Рис. 1. Схема мини-электростанции на базе газовой турбины и турбины органического цикла Ренкина

Fig. 1. Scheme of a mini-power plant based on an internal combustion turbine and a Rankine organic cycle turbine

Результаты исследования. Параметры функционирования энергоустановки определены путем проведения серии имитационных экспериментов. На рис. 2 графическое представление имитационной модели в среде SimInTech с отображением численных значений основных параметров после выхода установки на установившийся режим работы с номинальной электрической мощностью 3,8 МВт.

Имитационная модель состоит из следующих элементов: 1 и 2 – электрогенераторы газовой турбины и турбины ОЦР соответственно; 3 – вал ОЦР турбины; 4 – турбина ОЦР; 5 – вентилятор подачи охлаждающего воздуха, 6 – субмодель конденсатора рабочего тела ОЦР; 7 – модуль параметров атмосферного воздуха; 8 – подпитка контура ОЦР (для первоначального заполнения контура рабочим телом); 9 – циркуляционный насос контура ОЦР; 10 и 11 – субмодели испарителя и пароперегревателя низкокипящего рабочего тела соответственно; 12 – субмодель газогенераторной установки; 13 – дожимной компрессор подачи генераторного газа в турбину; 14 – воздушный компрессор газовой турбины; 15 – общий вал газовой турбины, электрогенератора, газового и воздушного компрессоров; 16 – субмодель камеры сгорания газовой турбины; 17 – газовая турбина.

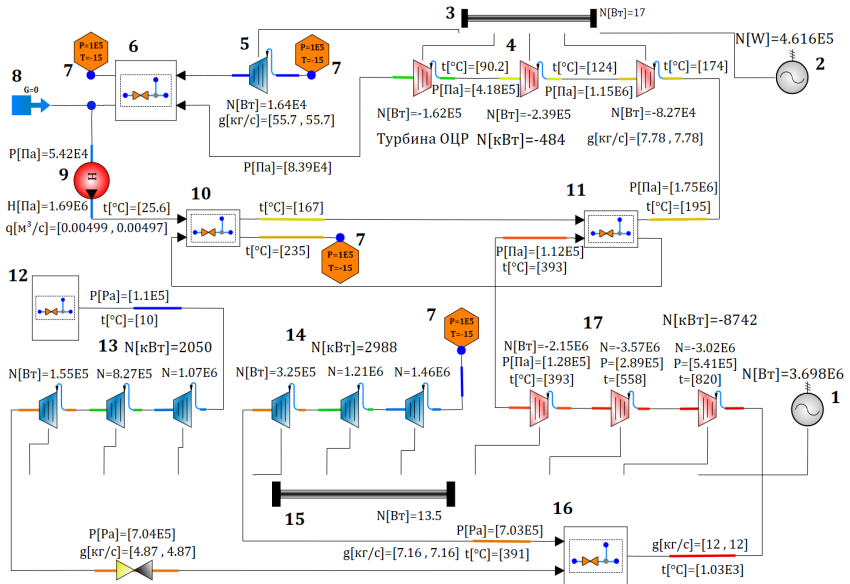


Рис. 2. Имитационная модель энергоблока мини-электростанции на базе газовой турбины и турбины органического цикла Ренкина

Fig. 2. Simulation model of a mini-power plant based on an internal combustion turbine and a Rankine organic cycle turbine

Разработанная имитационная модель позволяет проводить оптимизационные эксперименты. В частности, была проведена серия численных экспериментов для определения зависимости КПД нетто $\eta_{ст}^н$ миниэлектростанции от расхода охлаждающего конденсатор контура ОЦР воздуха $g_{охл}$. Результаты эксперимента представлены рис. 3, из которого видно, что имеется диапазон оптимальных расходов охлаждающего воздуха, соответствующих максимальному КПД.

Для воздухоохлаждаемого конденсатора из оребренных труб из нержавеющей стали при температуре наружного воздуха минус 15°C по условию максимума КПД рекомендуется суммарная подача воздуха вентиляторами в диапазоне от 48 до 62 кг/с. При этом суммарная мощность электроприводов вентиляторов составит 25,6 кВт.

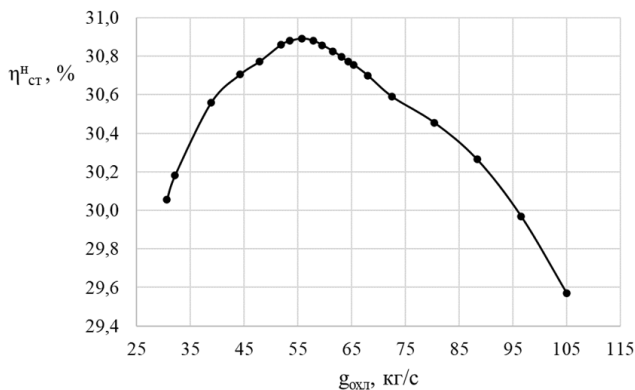


Рис. 3. Влияние расхода охлаждающего воздуха на КПД нетто

Fig. 3. Correlation of cooling air flow with net efficiency

КПД нетто мини-электростанции был определен следующим образом:

$$\eta_{\text{ст}}^{\text{H}} = \frac{N_{\text{э1}} + N_{\text{э2}} - N_{\text{вент}} - N_{\text{нас}}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} \times B} \times 100, \%,$$

где $N_{\text{э1}}$, $N_{\text{э2}}$ – электрическая энергия выработанная электрогенераторами газовой турбины и турбины ОЦР соответственно, кДж; $N_{\text{вент}}$ – расход электрической энергии на двигатели привода вентиляторов подачи охлаждающего конденсатор воздуха и подачи воздуха в газогенератор, кДж; $N_{\text{нас}}$ – расход электрической энергии на привод циркуляционного насоса контура ОЦР, кДж; Q_{H}^{P} – низшая теплота сгорания рабочей массы древесного топлива, кДж/кг; B – расход древесного топлива, кг.

Наличие оптимального расхода охлаждающего воздуха объясняется тем, что при недостаточном охлаждении конденсатора увеличивается давление конденсации и снижается мощность турбины ОЦР, а при нерациональном увеличении расхода охлаждающего воздуха увеличивается расход электрической энергии на собственные нужды станции.

Выводы. Определены основные параметры энергоустановки в номинальном режиме работы: мощности турбин, компрессоров, приводов вентиляторов и насосов; расходы, температуры и давления теплоносителей и рабочих тел тепловых двигателей. Это позволяет выполнить конструктивную проработку установки, уточнить размеры и толщину стенок теплообменников, подобрать тепловые двигатели и нагнетатели.

С применением разработанной имитационной модели можно проводить оптимизационные эксперименты с целью определения параметров по условию максимальной энергоэффективности мини-электростанции. Для повышения эффективности функционирования энергоустановки определено оптимальное значение расхода охлаждающего воздуха.

Предложенная имитационная модель учитывает тепловую и механическую инерцию конструктивных элементов, а также потоков газообразных и жидких рабочих тел и теплоносителей энергоустановки. Однако на данном этапе модель не учитывает цикличность работы газогенераторов, хотя на самом деле процесс газификации и подачи газообразного топлива в камеру сгорания не происходит непрерывно.

КПД нетто в данном исследовании был определен при номинальном режиме работы энергоустановки. В дальнейшем следует выполнить имитационные эксперименты для вычисления интегральных показателей эффективности за определенные периоды работы установки, к примеру, среднеинтегральный КПД нетто за 12-часовую рабочую смену, за сутки и т. д. Данное значение будет полезно при технико-экономическом обосновании применения предлагаемых решений. При этом могут быть учтены графики электрической нагрузки оборудования и их влияние на эффективность энергообеспечения.

Результаты могут быть использованы для дальнейших исследований и оптимизации мини-электростанций на органическом топливе. Планируется дальнейшее усложнение и уточнение имитационной модели.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Анисимов П.Н., Медяков А.А. Разработка и численное моделирование энергоустановки с газовой турбиной открытого цикла и паровой турбиной с органическим рабочим телом // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. № 6(140). С. 42–46.

Беляев С.В., Левина М. О роли биомассы в повышении топливно-энергетического потенциала регионов // Resources and Technology. 2019. Т. 16. № 4. С. 25–36. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4882

Глуховский В.М., Ильин А.М., Каляшов В.А. Автономное энергоснабжение лесоперерабатывающих предприятий // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. № 188. С. 172–179.

Жуйков А.В., Матюшенко А.И. Способы получения и практического применения синтез-газа (обзор) // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2020. Т. 13. № 4. С. 383–405.

Кольниченко Г.И., Лавриченко В.А., Тарлаков Я.В., Сиротов А.В. Использование топливной древесины в условиях распределенной энергетики // Лесной вестник. 2020. Т. 24. № 2. С. 74–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-74-80

Куницкая О.А., Помигуев А.В., Калита Е.Г., Швецова В.В., Тихонов Е.А. Анализ газогенерирующих систем для автономного энергоснабжения лесных терминалов // Resources and Technology. 2021. Т. 18. № 3. С. 53–76.

Медведев С.О., Мохирев А.П. Отдельные аспекты развития транспортной инфраструктуры в лесной отрасли // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сб. науч. ст. по матер. Всерос. научно-практич. конф., посвящ. 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 46–49.

Митрофанов А.В. Разработка модели термического разложения доломита в кипящем слое для обеспечения сорбционных систем газогенераторных установок // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 4. С. 56–61.

Мохов С.П., Арико С.Е., Кононович Д.А., Протас П.А. Методика оценки эффективности применения комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. № 231. С. 76–90. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.76-90

Онучин Е.М., Анисимов П.Н. Математическая модель функционирования измельчающе-транспортной машины для производства топливной щепы на лесосеке с энергообеспечением от газогенераторного двигателя Стирлинга // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. № 221. С. 258–270. DOI: 10.21266/2079-4304.2017.221.258-270

Петухов В.Н. Отечественная среда динамического моделирования SimInTech – это очень просто. Конечные автоматы в среде динамического моделирования SimInTech // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2018. № 1 (102). С. 4–13.

Помигуев А., Бурмистрова Д., Куницкая О. Автономное энергоснабжение лесных терминалов // ЛесПромИнформ. 2022. № 3 (165). С. 112–122.

Птичников А.В., Шварц Е.А. Современная климатическая повестка: какие изменения актуальны в лесном хозяйстве России? // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 242. С. 129–142. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.242.129-142

Boyaghchi F.A. Chavoshi M., Sabeti V. Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact optimizations // Energy. 2018. Vol. 145. P. 38–51. DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.118

Feron P., Cousins A., Jiang K., Zhai R., Shwe Hla S., Thiruvengkatachari R., Burnard K. Towards Zero Emissions from Fossil Fuel Power Stations // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2019. Vol. 87. P. 188–202. ISSN 1750-5836, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.018>.

References

Anisimov P.N., Medjakov A.A. Development and numerical simulation of a power plant with an open-cycle gas turbine and a steam turbine with an organic working fluid. *Jenergoberezhenie i vodopodgotovka*, 2022, no. 6(140), pp. 42–46. (In Russ.)

Beljaev S.V., Levina M. The role of biomass in increasing the fuel and energy potential of regions. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 25–36. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4882. (In Russ.)

Boyaghchi F.A. Chavoshi M., Sabeti V. Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact optimizations. *Energy*, 2018, vol. 145, pp. 38–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.118>

Feron P., Cousins A., Jiang K., Zhai R., Shwe Hla S., Thiruvengkatachari R., Burnard K. Towards Zero Emissions from Fossil Fuel Power Stations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, vol. 87, pp 188–202. ISSN 1750-5836, URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.018>.

Gluhovskij V.M., Il'in A.M., Kaljashov V.A. Independent power supply of wood enterprises. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2009, iss. 188, pp. 172–179. (In Russ.)

Kol'nichenko G.I., Lavrichenko V.A., Tarlakov Ja. V., Sirotoy A.V. Fuel wood for distributed power generation. *Lesnoj vestnik. Forestry bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 74–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-74-80. (In Russ.)

Kunikaja O.A., Pomiguyev A.V., Kalita E.G., Shvecova V.V., Tihonov E.A. Analysis of gas generating systems for autonomous power supply of forest terminals. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 53–76. (In Russ.)

Medvedev S.O., Mohirev A.P. Aspects of the development of transport infrastructure in the forest industry. *Aktual'nye voprosy stroitel'stva: vzgljad v budushhee*: sb. nauch. st. po materialam Vseros. nauchno-praktich. konf., posvjashhjonnoj 40-letiju sozdaniya Inzhenerno-stroitel'nogo instituta. Krasnojarsk, 2022, pp. 46–49. (In Russ.)

Mitrofanov A.V. Development of a model of thermal decomposition of dolomite in fluidized bed for providing sorbent systems of gas-plants. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta*, 2017, no. 4, pp. 56–61. (In Russ.)

Mohov S.P., Ariko S.E., Kononovich D.A., Protas P.A. Method of evaluating the efficiency of application complex machines for collection and transportation logging waste. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2020, iss. 231, pp. 76–90. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.76-90. (In Russ.)

Onuchin E.M., Anisimov P.N. Mathematical model of Mobile wood chipper with the autonomous power supply from the Stirling engine. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2017, iss. 221, pp. 258–270. DOI: 10.21266/2079-4304.2017.221.258-270. (In Russ.)

Petuhov V.N. Domestic environment of dynamic simulation simintech – this is very easy. final automatics in the medium of dynamic simulation SimInTech. *Avtomatizacija i IT v jenergetike*, 2018, no. 1 (102), pp. 4–13. (In Russ.)

Pomiguev A., Burmistrova D., Kunickaja O. Autonomous power supply for forest terminals. *LesPromInform*, 2022, no. 3 (165), pp. 112–122. (In Russ.)

Ptichnikov A.V., Shvarc E.A. Modern climate agenda: what changes are relevant in Russian forestry? *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskij akademii*, 2023, iss. 242, pp. 129–142. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.242.129-142. (In Russ.)

Zhujkov A.V., Matjushenko A.I. Methods for producing and practical use of synthesis gas. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tehnika i tehnologii*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 383–405. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 02.02.2024

Анисимов П.Н., Ширнин Ю.А., Петухов И.В., Рукомойников К.П., Алибеков С.Я., Шарапов Е.С. Разработка мобильной энергоустановки на древесном топливе для автономного энергообеспечения объектов лесного комплекса // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 248. С. 206–219.* DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.206-219

Актуальность автономного энергообеспечения объектов лесного комплекса обусловлена большими ресурсами древесины на удаленных от сетей централизованного электроснабжения и газоснабжения территориях. Целью работы является повышение эффективности автономного энергообеспечения объектов лесного комплекса путем разработки и оптимизации мини-электростанций на древесном топливе. При решении поставленных задач применены методы численного моделирования технических систем с использованием среды динамического моделирования SimInTech. Выполнен анализ результатов серии имитационных экспериментов функционирования технологической схемы мини-электростанции. В статье предложена имитационная модель автономной энергоустановки на древесном топливе, выполненная в программе SimInTech с применением инструментов модуля «Теплогидравлика». Представлены результаты численного моделирования работы мини-электростанции электрической мощностью 3,8 МВт, на базе газовой турбины открытого цикла, турбины органического цикла Ренкина и термохимической газификации древесного топлива. Получены результаты численного моделирования в виде основных номинальных режимных параметров мини-электростанции. Определены давления, температуры и массовые расходы потоков рабочих тел циклов энергоустановки и теплоносителей. Определены механические мощности: компрессора и турбины газотурбинной установки, вентилятора системы конденсации органического

рабочего тела, турбины цикла Ренкина на фреоне R113 и насоса подачи фреона в испаритель при заданном режиме работы мини-электростанции. Предложенная модель позволяет исследовать режимы работы энергоустановки, при переменных параметрах древесного топлива и окружающей среды, подбирать оптимальные конструктивные и режимные параметры компонентов мини-электростанции. В частности, были определены оптимальные значения расхода охлаждающего конденсатор органического рабочего тела воздуха по условию максимизации КПД нетто электростанции. Полученные результаты способствуют дальнейшей технологической и конструктивной проработке энергоустановок, могут быть использованы для обоснования эффективности и реализуемости проектов автономного энергообеспечения промышленных объектов.

Ключевые слова: автономное энергообеспечение объектов лесного комплекса, древесное топливо, мини-электростанция, численное моделирование.

Anisimov P.N., Shirnin Ju.A., Petuhov I.V., Rukomojnikov K.P., Alibekov S.Ja., Sharapov E.S. Development of a mobile wood burning power plant for autonomous power supply of forestry facilities. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 206–219 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.206-219

The relevance of the theme is due to the large resources of wood in areas remote from centralized power supply and gas supply networks. Autonomous energy supply of such objects of the forestry complex can be organized using wood fuel. The aim of the study is to increase the efficiency of autonomous energy supply of timber complex objects by developing and optimizing wood-fired mini-power plants. The method is to numerical modeling. For this, a simulation model of a mini-power plant was developed using the SimInTech dynamic simulation program. We have made the numerical experiments using this mathematical model. The article presents a technological scheme of a mini-power plant based on an open cycle gas turbine, a Rankine organic cycle turbine and wood fuel gasification. The results of numerical simulation of the operation of a mini-power plant with an electric power of 3,8 MW in the SimInTech program using the tools of the Thermal Hydraulics module are presented. The main technological parameters of the power plant in the nominal operation conditions are calculated: pressures, temperatures and mass flow rates of working fluid flows of power plant cycles and heat carriers. We have also calculated the rated mechanical powers of the units: the compressor of the gas turbine plant and the gas turbine, the fan of the organic working fluid condensation system, the Rankine cycle turbine running on R113 freon, and the pump for supplying freon to the evaporator. The proposed model allows you to explore the operating modes of the power plant, with variable environmental parameters, to select the optimal design and operating parameters of the components of the mini-power plant. In particular, the dependence of the net efficiency of the power plant on the consumption

of cooling air for the condenser of the organic working fluid was studied. As a result, the optimal values of the cooling air consumption were determined according to the condition of maximizing the net efficiency of the power plant. The obtained results contribute to further technological and constructive improvement of power plants. The results of the study can be used to substantiate the effectiveness and feasibility of projects for autonomous power supply of industrial facilities.

Key words: autonomous energy supply of timber complex objects, wood fuel, mini power plant, computational modeling.

АНИСИМОВ Павел Николаевич – доцент кафедры энергообеспечения предприятий Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-7789-2399. SPIN-код: 9087-4940. ResearcherID: S-2129-2016. Scopus Author ID: 57191903216

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: AnisimovPN@volgatech.net

ANISIMOV Pavel N. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Enterprises Power Supply, Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0002-7789-2399. SPIN-code: 9087-4940. ResearcherID: S-2129-2016. Scopus Author ID: 57191903216

424000. Lenin sq. 3. Joshkar-Ola. Russia. E-mail: anisimovpn@volgatech.net

ШИРНИН Юрий Александрович – заведующий кафедрой лесопромышленных и химических технологий Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук, профессор. ORCID: 0000-0003-4509-1324. SPIN-код: 4947-2182.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: ShirninYA@volgatech.net

SHIRNIN Jurij A. – DSc (Technical), Professor, Head of the Department of Forest-industry and Chemical Technology, Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0003-4509-1324. SPIN-code: 4947-2182.

424000. Lenin sq. 3. Joshkar-Ola. Russia. E-mail: ShirninYA@volgatech.net

ПЕТУХОВ Игорь Валерьевич – Ректор Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук, профессор. SPIN-код: 6009-1846.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: PetuhovIV@volgatech.net

PETUHOV Igor V. – DSc (Technical), Professor, Rector of Volga State University of Technology. SPIN-code: 6009-1846.

424000. Lenin sq. 3. Joshkar-Ola. Russia. E-mail: PetuhovIV@volgatech.net

РУКОМОЙНИКОВ Константин Павлович – профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук. ORCID: 0000-0002-9956-5081. SPIN-код: 9119-8261.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: RukomojnikovKP@volgatech.net

RUKOMONIKOV Konstantin P. – DSc (Technical), Professor, Professor of the Department of Forest-industry and Chemical Technology, Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0002-9956-5081. SPIN-code: 9119-8261.

424000. Lenin sq. 3. Joshkar-Ola. Russia. E-mail: RukomojnikovKP@volgatech.net

АЛИБЕКОВ Сергей Якубович – заведующий кафедрой машиностроения и материаловедения Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук, профессор. SPIN-код: 5397-1911.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: AlibekovSY@volgatech.net

ALIBEKOV Sergei Ya. – DSc (Technical), Professor, Head of the Department of Machine Building and Material Science, Volga State University of Technology. SPIN-code: 5397-1911.

424000. Lenin sq. 3. Joshkar-Ola. Russia. E-mail: AlibekovSY@volgatech.net

ШАРАПОВ Евгений Сергеевич – профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук. ORCID: 0000-0002-6500-5377. SPIN-код: 9119-8261. ResearcherID: D-7953-2015

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: SharapovES@volgatech.net

SHARAPOV Evgenii S. – Professor, DSc (Technical), Head of the Department of Building Structures and Water Supply, Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0002-6500-5377. SPIN-code: 9119-8261. ResearcherID: D-7953-2015

424000. Lenin sq. 3. Joshkar-Ola. Russia. E-mail: SharapovES@volgatech.net