

УДК 620.952

Энерготехнологическая установка на базе газотурбинного двигателя с использованием продуктов газификации древесных отходов

Данилова С. К.^{1,*}, Тумашев Р. З.¹

^{*}laana.danilova@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Обосновано использование древесных отходов для получения генераторного газа с последующей выработкой электрической энергии. Представлена схема энерготехнологической установки с газификацией древесных отходов, включая предварительную подготовку сырья. Рассмотрена высокотемпературная сухая очистка генераторного газа, позволяющая упростить конструкцию установки и использовать теплоту выходящего из газификатора газа. Рассмотрена нетрадиционная схема газотурбинной установки с воздушной турбиной и с давлением в камере сгорания, близким к атмосферному. Проведена оптимизация цикла рассматриваемой газотурбинной установки. Представлены результаты расчетов основных элементов установки.

Ключевые слова: газификация древесных отходов, газотурбинная установка, предварительная подготовка сырья, утилизация, оптимальные параметры

Введение

Для снижения затрат на транспортировку необработанного материала предприятия лесной промышленности, как правило, размещаются вблизи лесных массивов. При этом для их функционирования необходима электрическая и тепловая энергия. Электроснабжение таких предприятий часто затруднительно из-за их удаленности от линий электропередач. Использование передвижных генераторов связано с потреблением дорогостоящего жидкого топлива и с затратами на подвоз топлива.

Существует также проблема утилизации отходов предприятий лесной промышленности. В ходе заготовки и переработки древесины образуется значительное количество отходов, которое в большинстве случаев сжигают с получением тепловой энергии или выбрасывают на свалку.

Одним из путей решения данной проблемы может быть использование распределенной энергетики, позволяющей в рамках системы Smart Greed (так называемых интеллектуальных сетей [1]) решить проблему утилизации углеводородных отходов [2, 3].

В данном случае решить эти проблемы можно путем газификации древесных отходов с получением генераторного газа, который можно использовать для получения электрической энергии и теплоты в тепловых энергетических установках. Анализ, проведенный с учетом данных работ [4, 5], показал на целесообразность применения в качестве преобразователя теплоты от сжигания генераторного газа в тепловую и электрическую энергию газотурбинных установок (ГТУ). В связи с этим предлагается установка на базе газотурбинного двигателя с использованием продуктов газификации древесных отходов. За базовую установку была принята ГТУ мощностью 150 кВт. Такая энерготехнологическая установка позволяет получить относительно недорогую электрическую энергию для собственных нужд предприятия и решает проблему утилизации отходов. Принципиальная схема энерготехнологической установки представлена на рис. 1.

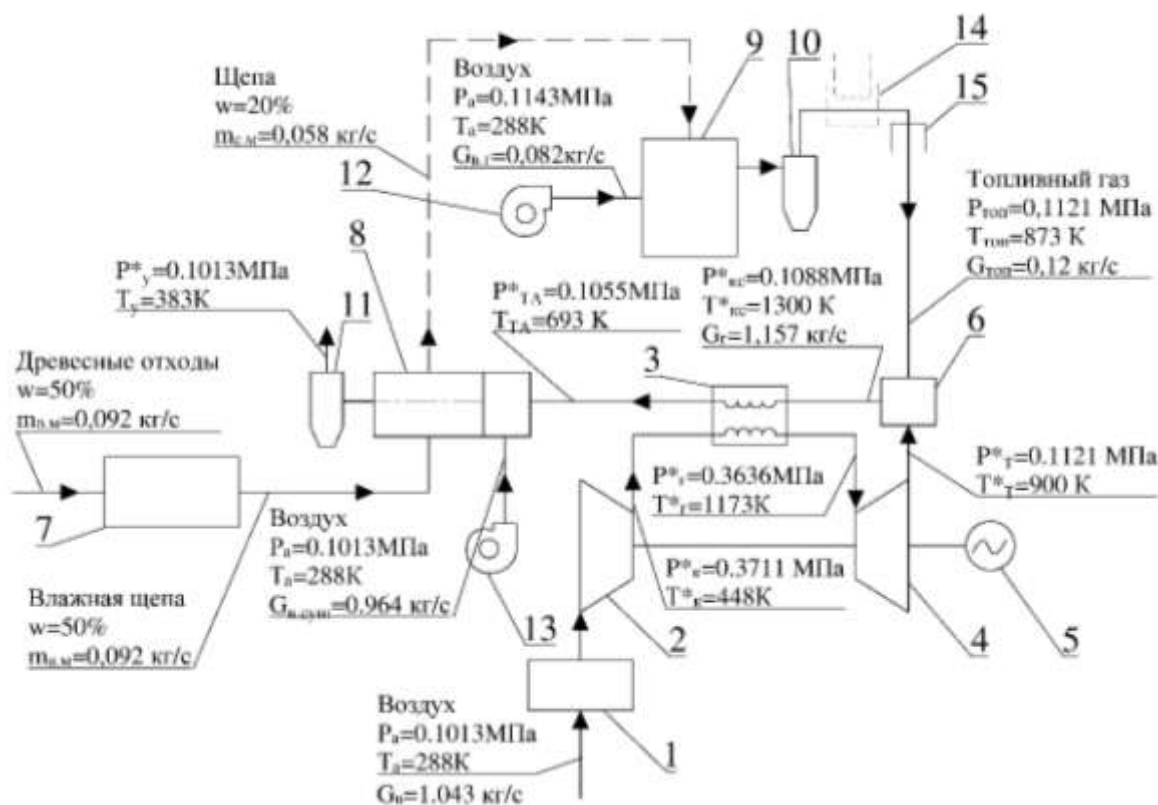


Рис. 1.Схема энерготехнологической установки: 1 – фильтр; 2 – центробежный компрессор; 3 – теплообменный аппарат (воздухонагреватель); 4 – центробежная турбина; 5 – генератор; 6 – камера сгорания; 7 – рубильная машина; 8 – барабанная сушилка; 9 – газогенератор; 10 – циклон очистки генераторного газа; 11 – циклон очистки газов за сушилкой; 12 – вентилятор наддува воздуха в газогенератор; 13 – вентилятор наддува воздуха в сушилку; 14 – теплообменный аппарат нагрева воды; 15 – фильтр тонкой очистки.

Схема работает следующим образом. Воздух, пройдя через фильтр 1, попадает в центробежный компрессор 2. После сжатия воздух поступает в воздухонагреватель 3, после чего горячий сжатый воздух попадает в центростремительную турбину 4, где, расширяясь, совершает полезную работу. После турбины воздух направляется в камеру сгорания 6, куда также подается генераторный газ. После сгорания получившиеся продукты сгорания поступают в воздухонагреватель 3, где передают тепловую энергию рабочему телу (воздуху). Далее продукты сгорания смешиваются с воздухом и проходят через сушильную установку 8, после чего очищаются от взвешенных частиц в циклоне 11 и выбрасываются в атмосферу.

1. Предварительная подготовка сырья

Для эффективной газификации древесные отходы должны иметь определенные размеры и низкую влажность. В связи с этим предложена схема газификации древесных отходов с предварительным измельчением и сушкой топлива.

Для улучшения процессов сушки и газификации древесные отходы необходимо измельчить до размеров 10-70 мм. При большем размере кусков затрудняется процесс перемещения топлива в камере газификатора, что приводит к зависанию сырья [6]. В результате предварительного измельчения можно добиться равномерного распределения сырья в камере газогенератора и однородного качества получаемого генераторного газа. Для предлагаемой установки выбрана барабанная рубительная машина РМ-400 [7], который имеет высокую производительность ($10 \text{ м}^3/\text{ч}$) при относительно низком потреблении электроэнергии (30 кВт), а также позволяет получать щепу нужных размеров. Данная рубительная машина оснащена ленточным транспортером для облегчения загрузки сырья.

Далее сырье проходит этап сушки. Высокое содержание влаги в исходном топливе приводит к уменьшению температуры в зоне восстановления и снижению скорости реакции восстановления. Как следствие, увеличивается содержание углекислого газа и водяного пара в генераторном газе и снижается содержание горючих элементов [8]. В связи с этим целесообразно снизить содержание влаги в исходном топливе до 20%.

В настоящее время широкое применение нашли ленточные и барабанные сушилки. Ленточные сушилки применяются преимущественно для сушки больших объемов древесины для получения пеллет высокого качества, что обуславливает высокую их стоимость. Наиболее часто применяются барабанные сушилки.

Были рассмотрены две схемы сушки в барабанной сушилке – воздушная и дымовыми газами. Расчет барабана проводился по методике, приведенной в [9].

Схема воздушной сушки включает контур промежуточного теплоносителя, что усложняет конструкцию. К тому же снижение температуры за счет неполной передачи теплоты через контур промежуточного теплоносителя требует увеличения объема барабана. Воздушная сушка обеспечивает высокое качество высушенного материала, поэтому такая сушка целесообразна при высоких требованиях к качеству высушенного материала.

В нашем случае такие требования не накладываются, поэтому возможно использование сушки дымовыми газами. Такая сушка наиболее экономична. Размеры барабана при такой сушке меньше и, как следствие, меньше потребляемая мощность привода барабана.

Чтобы избежать термического разложения древесины [10], необходимо снизить температуру продуктов сгорания, поступающих в сушильную установку, путем смешивания с воздухом. Исходя из вышеизложенных соображений была выбрана барабанная сушилка, работающая на смеси продуктов сгорания и воздуха с температурой на входе в сушилку 190°C .

Для выбранной схемы сушки объем барабанной сушилки производительностью по сухому материалу 205 кг/ч составил 9 м^3 . Была выбрана ближайшая большая по объему барабанная сушилка, диаметр которой равен $1,2 \text{ м}$, а длина 8 м [11].

Схема предлагаемой линии подготовки щепы представлена на рис. 2. Влажные древесные отходы загружают в рубительную машину 1, откуда полученная щепа по цепному конвейеру 5 поступает в бункер приема сырья 2, где происходит накопление щепы для бесперебойной работы установки. Оттуда с необходимой интенсивностью щепа попадает в барабанную сушилку 3 по цепному конвейеру 5 и шнековому питателю 6. Далее щепа с влажностью 20% направляется в газогенератор 4.

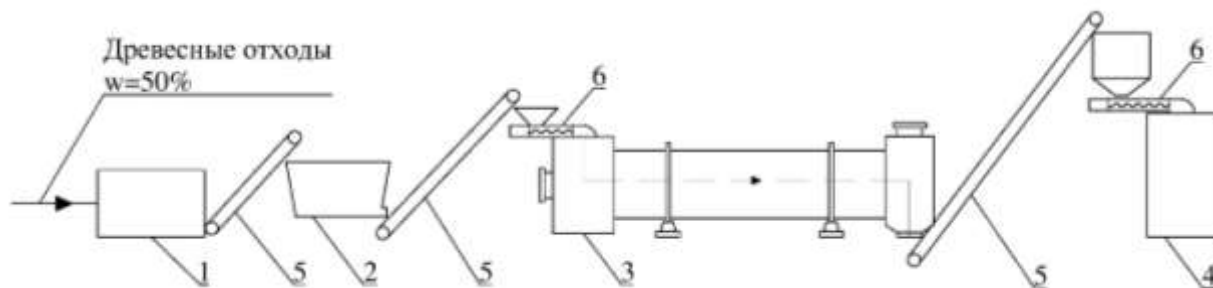


Рис. 2.Схема линии подготовки щепы: 1 – рубительная машина; 2 – бункер приема сырья; 3 – барабанная сушилка; 4 – газогенератор; 5 – цепной конвейер; 6 – шнековый питатель

2. Газификация древесных отходов

В результате термохимической переработки отходов древесины путем газификации получают горючий газ, состав которого зависит от многих факторов. Для газификации отходов с высоким содержанием смол целесообразно применять прямоточные газогенераторы (газогенераторы обращенного процесса), в которых топливо и дутьевой воздух двигаются в одном направлении. При такой схеме содержание смолы в получаемом газе минимально, так как смолы проходят через высокотемпературную зону окисления и, в основном, сгорают.

Состав газа также зависит от влажности газифицируемого сырья. Так, для отходов с влажностью 20% примерный объемный состав газа следующий: $\text{CO} - 18,5\%$, $\text{H}_2 - 19,5\%$, $\text{CH}_4 - 2,5\%$; $\text{CO}_2 - 13\%$, $\text{N}_2 - 46\%$ [7]. Теплотворная способность такого генераторного газа низкая и составляет $4,9 \text{ МДж/кг}$, температура газа на выходе из газификатора – примерно 870 К .

В связи с низкой теплотой сгорания генераторного газа относительный расход топлива велик ($0,11-0,12 \text{ кг}_{\text{топ}}/\text{кг}_{\text{возд}}$), поэтому изменение температуры генераторного газа, подаваемого в камеру сгорания, значительно влияет на коэффициент полезного действия (КПД) установки. Так, при снижении температуры генераторного газа от 873 К до 313

К КПД установки снижается на 4,4%. Чтобы повысить КПД установки, была выбрана высокотемпературная пылеочистка генераторного газа в циклоне. При такой схеме значительно упрощается конструкция установки по сравнению со схемой холодной очистки газа, а также пропадает проблема утилизации загрязненных водных стоков. Количество взвешенных частиц в генераторном газе при такой очистке будет больше, но эта проблема учитывается при выборе схемы ГТУ, о чем будет изложено ниже. Сероочистка газа не требуется, так как древесина практически не содержит серы. Высокая температура генераторного газа обеспечивает отсутствие конденсации смолы в циклоне и газопроводах. В случае необходимости более тонкой очистки генераторного газа можно ввести дополнительные элементы в установку (см. рис. 1), а именно теплообменный аппарат 14 для снижения температуры газа и фильтр тонкой очистки 15. В таком случае, очевидно, КПД установки снизится.

Установка с сухой высокотемпературной очисткой генераторного газа из угля, в том числе бурого, была апробирована на испытательном стенде ОАО «ВТИ» и доказала свою работоспособность [12].

3. Получение электрической энергии

В качестве преобразователя энергии генераторного газа в электроэнергию используется газотурбинная установка. Преимуществом ГТУ является достаточно длительный ресурс работы, малые габаритные размеры, малые эксплуатационные расходы, возможность автоматизации работы ГТУ. Кроме того, можно организовать сжигание генераторного газа в камере сгорания ГТУ.

Так как газификация проходит при давлении, близком к атмосферному, была выбрана схема ГТУ, позволяющая подавать генераторный газ непосредственно в камеру сгорания без значительных затрат на сжатие [13]. При такой схеме через турбину проходит воздух, а не продукты сгорания, что позволяет предотвратить эрозионное повреждение лопаток турбины. Вместо этого продукты сгорания проходят через трубчатый теплообменный аппарат нагрева воздуха, где скорость движения газа на порядок меньше, чем в турбине. Это допускает более высокое содержание взвешенных частиц в топливном газе. Гладкотрубную поверхность теплообменного аппарата при необходимости легко очистить от отложений. Кроме того, при такой схеме температура воздуха за турбиной равна температуре воздуха перед камерой сгорания, что аналогично использованию регенератора со степенью регенерации 1.

Температура горячего воздуха перед турбиной принимается равной 1173 К, что позволяет выполнить турбину неохлаждаемой и существенно упростить конструкцию. Чтобы обеспечить нагрев воздуха до этой температуры в воздухонагревателе, температура газа за камерой сгорания должна быть 1301 К при степени регенерации теплообменника 0,85.

Для выбранной схемы был проведен расчет цикла ГТУ для ряда значений степени повышения полного давления в компрессоре по методике, приведенной в [14]. Оптимальная степень повышения давления в компрессоре составила $\pi_k^* = 3,7$, исходя из условия

максимума КПД и минимума удельного расхода топлива (рис. 3). КПД при выбранном значении π_k^* составил 25,7%.

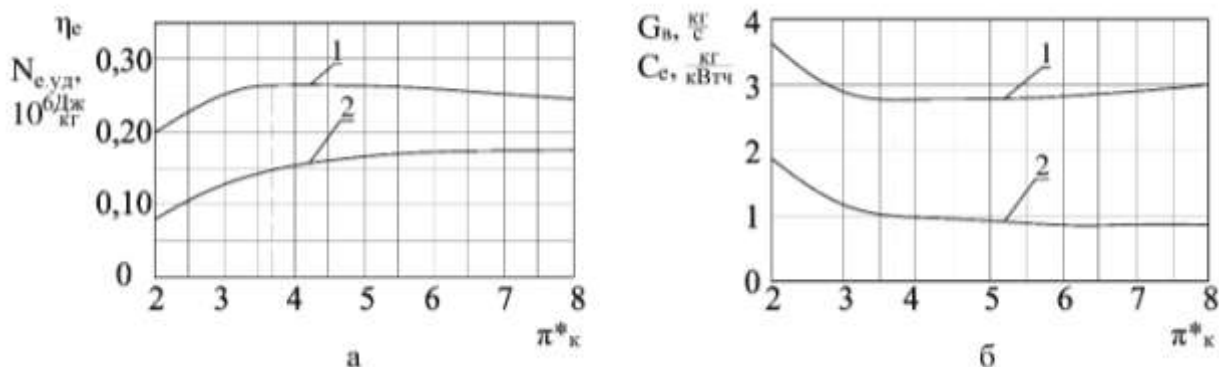


Рис. 3. К выбору оптимальной степени повышения давления в компрессоре: а – зависимость КПД установки 1 и удельной мощности установки 2 от степени повышения давления в компрессоре; б – зависимость расхода воздуха 1 и удельного расхода топлива от степени повышения давления в компрессоре

Основные результаты расчетов цикла ГТУ, центробежного компрессора [15], центростремительной турбины [16] и воздухонагревателя [17] приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные показатели установки

Параметр	Значение
Цикл:	
Мощность установки N_e , кВт	150
КПД установки η_e , %	25,7
Относительный расход топлива g_T , кг _{топ} /кг _{возд}	0,114
Расход воздуха G_v , кг/с	1,043
Коэффициент избытка воздуха α	6,3
Расход генераторного газа G_T , кг/с	0,12
Массовый расход исходного сырья влажностью 50%, кг/ч	330
Годовой объем перерабатываемых отходов, т/год	2900
Центробежный компрессор	
Частота вращения n , об/мин	40 000
Изоэнтропический КПД по заторможенным параметрам η_k^* , %	81,0
Степень повышения полного давления π_k^*	3,7
Центростремительная турбина	
Частота вращения n , об/мин	40 000
Изоэнтропический КПД по заторможенным параметрам η_T^* , %	90,4
Степень понижения полного давления π_T^*	3,2
Воздухонагреватель	
Схема движения теплоносителей	Перекрестная одноходовая
Поверхность теплообмена	Гладкотрубная
Степень регенерации σ	0,85
Скорость движения горячего теплоносителя c_r , м/с	30
Скорость движения холодного теплоносителя c_x , м/с	3
Размеры трубного пучка $L \times B \times H$, м	$1,77 \times 0,5 \times 0,55$

Заключение

Предложена энерготехнологическая установка, которая позволяет эффективно использовать отходы предприятий лесной промышленности для получения электрической энергии для собственных нужд предприятия. В качестве энергопреобразователя рассмотрена ГТУ нетрадиционной схемы, позволяющая снизить эрозионный износ лопаток турбины и уменьшить затраты энергии на сжатие топливного газа, поступающего в камеру сгорания. Выполнен анализ схем предварительной подготовки сырья. Для рассматриваемой энерготехнологической установки предложена линия подготовки сырья, включающая измельчитель древесных отходов и барабанную сушильную установку, работающую на смеси продуктов сгорания и воздуха. Проведен анализ процесса газификации древесных отходов и очистки генераторного газа от взвешенных частиц. Проведены оптимизационные расчеты цикла ГТУ. КПД установки мощностью 150 кВт для оптимальной степени повышения давления в цикле $\pi_k^* = 3,7$ составил 25,7%. Приведены результаты расчетов компрессора, турбины и теплообменного аппарата.

Таким образом, предлагаемая энерготехнологическая установка может послужить решением проблемы утилизации отходов и энергоснабжения леспромхоза, вырабатывая 150 кВт электрической энергии и утилизируя около 2900 тонн древесных отходов в год.

Список литературы

1. Боева Е.Ю., Куникеев Б.А., Щеголев Н.Л. Перспективы и проблемы внедрения технологии Smart grid в России // Инженерный вестник. Электрон. журн. 2015. № 9. С. 543-551. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/821722.html> (дата обращения 15.02.16).
2. Кулаков Д.М, Тумашев Р.З., Щёголев Н.Л. Утилизация шахтного метана в газотурбинных установках для производства электрической энергии и теплоты // Безопасность в техносфере. 2015. Т. 4, № 5. С. 41-48. DOI: [10.12737/16963](https://doi.org/10.12737/16963)
3. Тумашев Р.З., Бодров Н.Г. Когенерационная газотурбинная установка на попутных нефтяных газах с высоким содержанием тяжёлых углеводородов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 7. С. 155-165.
4. Моляков В.Д., Тумашев Р.З. Обоснование схем и параметров высокоэффективных газотурбинных установок для малой энергетики // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 10. С. 52-58.
5. Моляков В.Д., Осипов М.И., Тумашев Р.З., Олесевич К.А. Перспективные направления повышения эффективности ГТУ // Газотурбинные технологии. 2011. № 3. С. 2-7.
6. Биомасса как источник энергии: Пер. с англ. / Под ред. Соуфера С., Заборски О. М.: Мир, 1985. 368 с.
7. Каталог продукции // Ассоциация «КАМИ»: сайт. Режим доступа: <http://www.stanki.ru/> (дата обращения 02.03.2016).

8. Тимербаев Н.Ф. Моделирование процесса энерготехнологической переработки древесных материалов методом прямоточной газификации // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 2. С. 34–36.
9. Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю.И., Каган С.З., Ковалев Ю.Н., Кочаров Р.Г., Кочергин Н.В., Мартюшин С.И., Набатов В.А., Трушин А.М., Шерышев М.А. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / под ред. Дытнерского Ю.И. 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Химия, 1991. 496 с.
10. Сафин Р.Р., Разумов Е.Ю., Оладышкина Н.А. Энергосберегающая установка для сушки и термической обработки древесины // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 9. С. 542-546.
11. ГОСТ 27134–86. Аппараты сушильные с вращающимися барабанами. Основные параметры и размеры. Введ. 1988-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 4 с.
12. Ольховский Г.Г., Сучков С.И., Березинец П.А., Епихин А.Н., Крылов И.О., Луговская И.Г., Сомов А.А., Гудков В.Н., Заикин А.А. Разработка отечественной ПГУ с газификацией угля // Теплоэнергетика. 2010. № 2. С. 19–26.
13. Иванов В.Л. Газотурбинный энергопреобразователь для установки утилизации твердых бытовых и промышленных отходов методом газификации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. №7. С. 134–144.
14. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Расчет параметров цикла при проектировании газотурбинных двигателей и комбинированных установок: учеб. пособие / под ред. Суровцева И.Г. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 58 с.
15. Бекнев В.С., Куфтов А.Ф., Тумашев Р.З. Расчет и проектирование центробежных компрессоров ГТД: Методические указания. М.: Изд-во МГТУ, 1996. 44 с.
16. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины. М.: Машиностроение, 1966. 200 с.
17. Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 592 с.

The Gas Turbine Engine-based Power Technology Plant Using Wood Waste Gasification Products

S.K. Danilova^{1,*}, R.Z. Tumashev¹

[*laana.danilova@yandex.ru](mailto:laana.danilova@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: wood waste gasification, gas turbine, preliminary preparation of raw materials, utilization, optimal parameters

The paper outlines the problems of energy supply and waste utilization of the forest industries. As a solution, it proposes to use gasification to utilize wood leftovers, which is followed by electric power generation from combustion of producer gas. The plant was expected to have a power of 150 kW. The proposed power technology plant comprises a line for pre-treatment of wood chips, a gas generator (gasifier) and a gas turbine unit.

The paper justifies a need for preliminary preparation of wood waste, particularly chipping and drying. Various drying schemes have been analyzed. A line for pre-treatment of wood chips comprises a drum chipper, a receiving raw material wood container and a drum dryer using fume gases.

A co-current gasifier is chosen because of the high content of tar in the original fuel. In the co-current gasifier, most of the tar, passing through the high temperature area, is burned. The paper offers high temperature dry cleaning of producer gas in the cyclone separator. Such a scheme of cleaning provides high efficiency of the plant and simplifies its design, but suspended particles still remain in the producer gas. When analyzing the schemes of power converters this is taken into account.

A choice of the gas turbine as a power converter is justified. To reduce the erosion damage of the turbine blades there is a proposal to use an unconventional gas turbine scheme with air turbine and a combustion chamber located downstream of the turbine. In this plant the air rather than the combustion gas passes through the turbine. The air from turbine goes into the combustion chamber, the combustion gas passes through the air heater, where it transfers heat to the air. Such scheme allows reducing power costs for the fuel gas compression before the combustion chamber.

Optimization of the gas turbine cycle is performed. The optimum compressor pressure ratio is 3,7. The plant efficiency for this pressure ratio is 25,7%. Calculation results of the main elements are reported.

References

1. Boeva E.Yu., Kunikeev B.A., Shchegolev N.L. Prospects and problems of Smart Grid Technology adoption in Russia. *Inzhenernyy vestnik = Electronic publishing engineering bulletin*, 2015, no. 9, pp. 543-551. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/821722.html> (accessed 15.02.16) (in Russian).
2. Kulakov D.M., Tumashev R.Z., Shchegolev N.L. Coal Mine Methane Utilization in Gas Turbine Units for Electricity and Heat Production. *Bezopasnost' v tekhnosfere = Safety in Technosphere*, 2015, vol. 4, no. 5, pp. 41-48. (in Russian). DOI: [10.12737/16963](https://doi.org/10.12737/16963)
3. Tumashev R.Z., Bodrov N.G. Cogeneration Gas-Turbine Plant Running on Oil-Well Gas with Heavy Hydrocarbons High Content. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2012, no. 7, pp. 155-165.
4. Molyakov V.D., Tumashev R.Z. Justification of layouts and parameters of high-performance gas turbine units for small power engineering. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, no. 10, pp. S. 52-58.
5. Molyakov V.D., Osipov M.I., Tumashev R.Z., Olesevich K.A. Promising Ways of Increasing the Efficiency of Gas Turbines. *Gazoturbinnye tekhnologii*, 2011, no. 3, pp. 2-7.
6. Samir S. Sofer, Oscar R. Zaborsky, eds. *Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels*. New York, Plenum Press, 1981. (Russ. ed: *Biomassa kak istochnik energii*. Moscow, Mir Publ., 1985. 368 p.)
7. *Katalog produktsii* [Product catalog]. «KAMI» association: web-site. Available at: <http://www.stanki.ru/> (accessed 02.03.2016).
8. Timerbaev N.F. Modeling of Process of Energy-Technological Treatment of Wood Waste by Method of Direct-Flow Gasification. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Kazan Technological University*, 2012, no. 2, pp. 34-36. (in Russian).
9. Borisov G.S., Brykov V.P., Dytnerskiy Yu.I., Kagan S.Z., Kovalev Yu.N., Kocharov R.G., Kochergin N.V., Martyushin S.I., Nabatov V.A., Trushin A.M., Sheryshev M.A. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 496 p. (in Russian).
10. Safin R.R., Razumov E.Yu., Oladyshkina N.A. Energy-saving installation for drying and heat treatment of wood. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Kazan Technological University*, 2010, no. 9, pp. 542-546. (in Russian).
11. GOST 27134–86. *Apparaty sushil'nye s vrashchayushchimisya barabanami. Osnovnye parametry i razmery* [State standard 27134–86. Drying apparatuses with rotating drums. Basic parameters and dimensions]. Moscow, Standards Publ., 2002. 4 p. (in Russian).

12. Ol'khovskiy G.G., Suchkov S.I., Berezinets P.A., Epikhin A.N., Krylov I.O., Lugovskaya I.G., Somov A.A., Gudkov V.N., Zaikin A.A. Development of a domestic combined cycle plant with coal gasification. *Teploenergetika*, 2010, no. 2, pp. 19–26. (in Russian). (English version of journal: *Thermal Engineering*, 2010, vol. 57, no. 2, pp. 113-120.
DOI: [10.1134/S0040601510020047](https://doi.org/10.1134/S0040601510020047))
13. Ivanov V.L. Gas turbine power plant for installation for utilization of communal solid and industrial waste by method of gasification. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2012, no. 7, pp. 134–144.
14. Mikhal'tsev V.E., Molyakov V.D. *Raschet parametrov tsikla pri proektirovanii gazoturbinnnykh dvigateley i kombinirovannykh ustanovok* [Cycle parameters calculation in the design of gas turbine engines and combined installations]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 58 p. (in Russian).
15. Beknev V.S., Kuftov A.F., Tumashev R.Z. *Raschet i proektirovanie tsentrobeznykh kompressorov GTD* [Calculation and design of centrifugal compressors of GTE]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996. 44 p. (in Russian).
16. Mitrokhin V.T. *Vybor parametrov i raschet tsentrostremitel'noy turbiny* [Parameters selection and calculation of centripetal turbine]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1966. 200 p. (in Russian).
17. Ivanov V.L., Leont'yev A.I., Manushin E.A., Osipov M.I. *Teploobmennye apparaty i sistemy okhlazhdeniya gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Heat exchangers and cooling systems of gas turbine and combined plants]. Moscow, Bauman MSTU Publ, 2004. 592 p. (in Russian).