

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ



О.В. Марченко, С.В. Соломин, А.Н. Козлов

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Рассмотрены направления эффективного использования древесных отходов путем их термохимической конверсии в составе газогенераторных энергетических установок с улучшенными экологическими характеристиками. Проведено сравнение стоимости электрической энергии, получаемой за счет использования различных видов топлива (газ, дизельное топливо, уголь, древесная щепа и древесные пеллеты). Выполнено экономическое сопоставление технологий одно- и многоступенчатой газификации древесной биомассы. Показано, что более перспективной технологией переработки биомассы является трехступенчатая газификация благодаря более высокому КПД процесса. Рассмотрены особенности разрабатываемой экспериментальной газогенераторной установки с трехступенчатой газификацией древесной биомассы, которая позволяет получать генераторный газ с минимальным количеством смолы.

Ключевые слова: древесные отходы, газификация, стоимость энергии, пеллеты, эффективность

Possibilities of Use of Wood Wastes in the Power Industry of Russia

O.V. Marchenko, S.V. Solomin, A.N. Kozlov

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 664033 Irkutsk, Russia

This paper is devoted to the selection and justification the development directions of technology for the effective use of wood waste by their thermochemical conversion as part of gas-generating power plants with improved environmental characteristics. A comparison was made of the electric energy cost obtained by the use of various types of fuel (gas, diesel fuel, coal, wood chips and wood pellets). An economic comparison of single- and multi-stage gasification of woody biomass has been performed. It is shown that a more promising technology for processing biomass is three-stage gasification due to higher process efficiency. The features of the experimental gas-generating unit under development with three-stage gasification of woody biomass, which allows producing a generator gas with a minimum amount of tar, are considered.

Keywords: wood waste, gasification, energy cost, pellets, effectiveness

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-06-17-21

Ресурсы древесного топлива в России

Основная часть лесозаготовок и деревопереработки сосредоточена в Северо-Западном и Сибирском федеральных округах [1, 2]. В частности, на Северо-Западный округ приходится 25 % лесозаготовок, 28 % производства пиломатериалов, более 60 % производства целлюлозы и древесной массы. В Сибирском федеральном округе заготавливается 36 % древеси-

ны, производится 42 % пиломатериалов и 27 % целлюлозы.

Среди субъектов Российской Федерации выделяется Иркутская область, которая стабильно занимает первое место среди всех регионов России по объемам заготовки древесины (23 млн м³ в 2010 г. и 35 млн м³ в 2017 г.) с долей 13–17 % в общероссийской заготовке [2]. В 2017 г. Иркутская область также лидировала по производству пиломатериалов (4,8 млн м³/год, или 19 %

общероссийского производства) [2]. Второе место занимал Красноярский край — около 23,2 млн м³ заготовленной древесины и 3,0 млн м³ пиломатериалов, третье — Архангельская область — 12,3 и 2,0 млн м³ соответственно. Основная часть целлюлозы (до двух третей) производится в северо-западных областях страны (прежде всего в Архангельской области — более 30 %) и в Сибири в Иркутской области (более 20 %).

Таблица 1. Объем отходов древесины (ресурс топлива) в лесоперерабатывающем комплексе России в 2017 г. и 2030 г., млн м³
Table 1. The amount of waste wood (fuel resource) in the timber processing complex of Russia in 2017 and 2030, million m³

| Продукция | Норматив образования отходов | Годы | | | |
|-------------------------|------------------------------|--------------|------------|----------------|-------------|
| | | 2017 | | 2030 (прогноз) | |
| | | Производство | Отходы | Производство | Отходы |
| Заготовленная древесина | 0,226–0,344 | 212,4 | 48,0–73,1 | 230,5–286,1 | 52,1–98,4 |
| Пиломатериалы | 0,46–0,90 | 25,1 | 11,6–22,6 | 62,1–69,5 | 28,6–62,6 |
| Фанера | 1,55–1,84 | 3,8 | 5,9–7,2 | 5,1–5,9 | 7,9–11,2 |
| Тара | 2,76 | 0,4 | 1,1 | 0,5–0,8 | 1,4–2,2 |
| Целлюлоза | 0,12 | 37,6 | 4,5 | 43,4–63,3 | 5,2–7,6 |
| Древесная масса | 0,70 | 6,1 | 4,3 | 6,8–10,5 | 4,8–7,3 |
| Всего | | 285,4 | 75,4–112,8 | 348,4–436,1 | 100,0–189,3 |

В табл. 1 приведены результаты расчета объема древесных отходов в соответствии с принятыми в России нормативами образования отходов [3, 4] для современного и прогнозируемого [5] объема производства продукции лесопромышленного комплекса. Данные по целлюлозе и древесной массе переведены из тонн в кубометры в соответствии с соотношениями: 1 т целлюлозы = 4,52 м³, 1 т древесной массы = 2,62 м³ [4].

Суммарная оценка объема отходов древесины в России составляет 75–113 млн м³/год (около 540–814 ПДж/год или

18–28 млн т у.т.) в настоящее время и 100–189 млн м³/год (около 720–1361 ПДж/год или 25–46 млн т у.т.) на перспективу до 2030 г.

Следует отметить, что отходы могут накапливаться годами. На территории России складировано более 1 млрд м³ древесных отходов (горбыль, рейки, срезки, короткомер, стружка, опилки, древесная пыль), которые негативно воздействуют на окружающую среду в местах их локализации [6].

Из опилок производятся пеллеты (топливные гранулы), которые являются экологиче-

ски чистым топливом [7]. Производство пеллет в России с 2010 г. по 2017 г. выросло более чем в 3 раза — с 362 до 1416 тыс. т [2].

Технологии газификации

В настоящее время разработаны эффективные технические решения, позволяющие утилизировать отходы лесозаготовок и лесопереработки (помимо прямого сжигания биомассы). Одним из них является газификация биомассы с последующим использованием выработанного синтезгаза для производства электроэнергии и тепла, что позволяет повысить экономичность систем энергоснабжения [8]. В качестве топлива может использоваться как щепа, так и пеллеты.

По данным Международного Энергетического Агентства в странах, входящих в организацию экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), реализуется около 160 проектов по проектированию и строительству установок, использующих технологии газификации биомассы [9]. В этих установках в основном применяются слоевые реакторы и реакторы кипящего слоя. Наряду с этим значительным потенциалом обладает технология ступенчатой газификации, которая решает основную технологическую проблему при термохимической конверсии биомассы — существенное снижение содержания смолы в генераторном газе. Минимизация количества смолы достигается благодаря организации процесса в отдельных реакторах или разделении стадий газификации (пиролиз исходного топлива и газификация древесного угля) в едином реакторе. В этом процессе экзотермическая стадия внутреннего горения протекает в отдельном реакторе (или зоне), получаемый горячий газ полностью или частично сгорает в камере сгорания, а продукты сгорания используются в качестве дутьевого агента в другом реакторе, куда поступа-

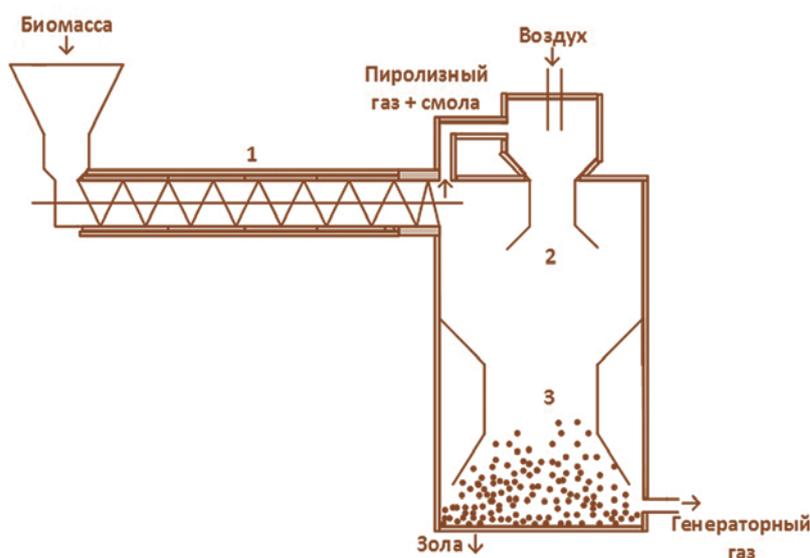


Рис. 1. Принципиальная схема трехступенчатого газогенератора:
 1 – реактор пиролиза; 2 – реактор дожигания пиролизного газа и смолы;
 3 – реактор газификации

Fig. 1. Schematic diagram of a three-step gasifier:
 1 – pyrolysis reactor; 2 – pyrolysis gas and tar afterburner; 3 – gasification reactor

ет древесный уголь из первого реактора. Такая организация процесса позволяет сжечь смолистые продукты, выделяющиеся на первой стадии, использовать их энергию для форсирования газификации древесного угля и стабилизировать состав конечного газа [10].

В Институте систем энергетики в настоящее время разработана экспериментальная энергетическая установка с трехступенчатой газификацией древесного топлива [11]. Установка одновременно производит электрическую и тепловую энергию, ее КПД превышает 80 % (рис. 1).

В реакторе пиролиза 1 происходит процесс термохимической конверсии древесной биомассы с образованием пиролизного газа с большим содержанием смолистых соединений. Затем осмоленный пиролизный газ поступает в следующий реактор 2, в котором происходит сгорание смолистых соединений. Далее газообразные продукты горения поступают в реактор газификации 3, в котором происходит газификация древесного угля. Полученный генераторный газ в дальнейшем поступает в двигатель внутреннего сгорания. Горячие выхлопные газы направляются на нагрев реактора пиролиза. Такая организация процесса газификации позволяет функционировать газогенератору стабильно и обеспечить незначительные колебания состава и расхода газа, произвольно возникающие во времени.

Технико-экономический анализ

По всей видимости, основным препятствием для широкого распространения технологий газификации может быть их недостаточная конкурентоспособность с альтернативными энергетическими технологиями. В связи с этим ниже приведено экономическое обоснование использования газогенераторных энергоисточников. Для оценки эффективно-

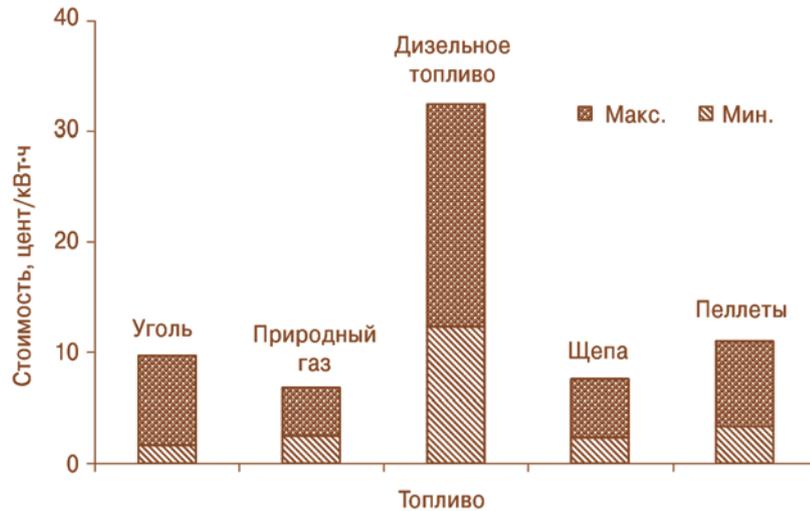


Рис. 2. Стоимость электроэнергии энергоисточников на разных видах топлива

Fig. 2. Cost of electric energy of energy sources on different types of fuel

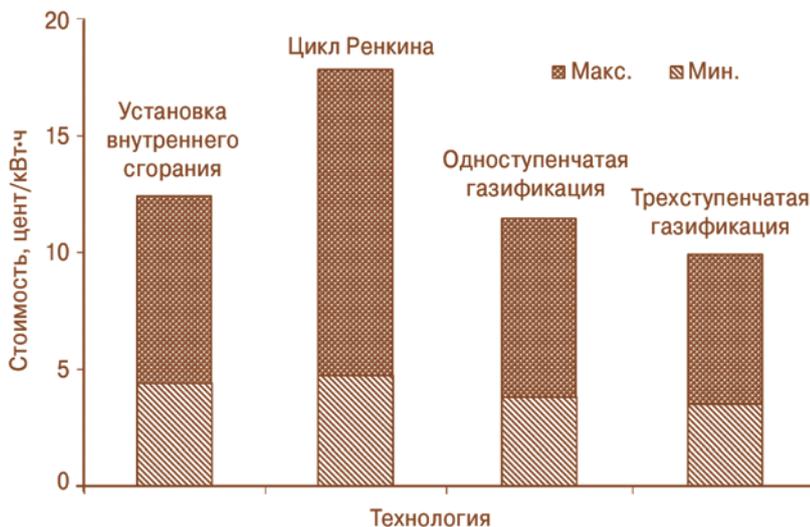


Рис. 3. Стоимость электроэнергии газогенераторных электростанций на пеллетах

Fig. 3. Cost of electric energy of gas-generating power plants on pellets

сти газификации в качестве критерия использована стоимость энергии [8]. Вначале рассмотрена газогенераторная мини-ТЭЦ (одностадийная газификация, электрическая мощность — 200–300 кВт, тепловая — 500–600 кВт, топливо — щепа или пеллеты) в сопоставлении с энергоисточниками на других видах топлива (ТЭЦ на угле, газопоршневая и дизельная электростанции с отпуском тепла). Основные технико-экономические показатели по данным [12–14] приведены в табл. 2, некоторые из них представлены в виде интервала неопределенности.

Стоимостные величины выражены в евро (2018 г.).

Условия строительства и эксплуатации энергоисточников, а также цены топлива соответствуют условиям Восточной Сибири (Иркутская область и Красноярский край). Эффективность оценивалась по стоимости электроэнергии при заданной стоимости тепловой энергии, принятой 1–1,5 цент/кВт·ч в соответствии с предварительными оценками и результатами [8].

Как показывают результаты расчетов (рис. 2), стоимость электроэнергии мини-ТЭЦ на древесном топливе в 2,5–3 раза

Таблица 2. Техничко-экономические показатели энергоустановок на разных видах топлива (совместное производство электроэнергии и тепла)
Table 2. Technical and economic indicators of power plants on different types of fuel (heat and electricity cogeneration)

| Топливо | k , €/кВт | δ , 1/год | η_e | η_h | ΔT , лет | Цена топлива, €/т у.т. |
|-------------------|-------------|------------------|-----------|-----------|------------------|------------------------|
| Уголь | 900–1100 | 0,07 | 0,28–0,30 | 0,45–0,60 | 20 | 40–100 |
| Природный газ | 500–600 | 0,05 | 0,28–0,33 | 0,45–0,55 | 15 | 80–100 |
| Дизельное топливо | 400–500 | 0,07 | 0,30–0,35 | 0,40–0,45 | 15 | 400–700 |
| Щепа | 1300–1520 | 0,10 | 0,20–0,25 | 0,40–0,50 | 20 | 20–80 |
| Пеллеты | 900–1100 | 0,07 | 0,22–0,30 | 0,45–0,60 | 20 | 80–180 |

Примечание. k – удельные капиталовложения, δ – ежегодные постоянные затраты (доля от капиталовложений); η – КПД (индексы: e – электрическая энергия, h – тепловая энергия); ΔT – срок службы.

Таблица 3. Техничко-экономические показатели газогенераторных установок на древесном топливе (пеллетах)
Table 3. Technical and economic indicators of gas-generating installations on wood fuel (pellets)

| Топливо | k , €/кВт | δ , 1/год | η_e | η_h | ΔT , лет | Цена топлива, €/т у.т. |
|-----------------------------|-------------|------------------|-----------|-----------|------------------|------------------------|
| Внутреннее сгорание | 800–900 | 0,10 | 0,20–0,25 | 0,35–0,45 | 15 | 80–180 |
| Цикл Ренкина | 1000–2000 | 0,08 | 0,16–0,24 | 0,35–0,45 | 15 | 80–180 |
| Одноступенчатая газификация | 900–1000 | 0,07 | 0,20–0,25 | 0,45–0,50 | 20 | 80–180 |
| Трехступенчатая газификация | 1000–1100 | 0,07 | 0,25–0,30 | 0,50–0,60 | 20 | 80–180 |

Примечание. Обозначения см. табл. 2.

меньше стоимости электроэнергии дизельной электростанции из-за дешевизны топлива. В связи с этим для автономных энергосистем малой мощности, особенно вблизи пунктов лесозаготовок и лесопереработки, энергоснабжение от газогенераторных мини-ТЭЦ, потребляющих в качестве топлива щепу, оказывается более предпочтительным техническим решением, чем использование дизельных электростанций на дорогом привозном топливе. Более экономичным может оказаться лишь применение газопоршневых электростанций в случае наличия в рассматриваемом пункте природного газа.

При более дорогом древесном топливе (пеллеты) газогенераторные электростанции

все еще остаются конкурентоспособными с дизельными и угольными электростанциями. Это позволяет исключить жесткую привязку газогенераторной ТЭЦ к месту лесозаготовки и транспортировать топливо на значительные расстояния. В этом случае возможно применение энергоустановок, различающихся как по типу газогенератора, так и по методу преобразования полученного газа в электрическую и тепловую энергию.

В табл. 3 приведены технико-экономические показатели энергоустановок с одноступенчатой газификацией, а также газопоршневой установки с трехступенчатой газификацией [8]. Последние две установки различаются конструкцией газогенератора; применение трех-

ступенчатой газификации усложняет и удорожает конструкцию, однако повышает КПД преобразования энергии.

Согласно результатам расчетов (рис. 3) наиболее экономичным вариантом оказывается установка с трехступенчатой газификацией. При большей стоимости установки благодаря более высокому КПД ее электроэнергия стоит на 14 % дешевле, чем для установки с одноступенчатой газификацией. В связи с этим технология многоступенчатой газификации перспективна для внедрения в автономных системах малой мощности, что особенно актуально для северных и восточных регионов России, где одновременно с отсутствием систем централизованного энергоснабжения имеются значительные ресурсы древесного топлива, пригодные для энергетического использования.

Выводы

1. В мировой энергетике наблюдается устойчивая тенденция быстрого развития новых альтернативных энергетических технологий, в том числе использования биомассы для производства электрической и тепловой энергии.

2. В России имеются значительные ресурсы древесного топлива (отходы лесопромышленного комплекса): до 28 млн т у.т. в настоящее время и до 46 млн т у.т. к 2030 г.

3. Перспективным направлением использования древесного топлива является технология газификации, в том числе многоступенчатая термохимическая конверсия биомассы, которая позволяет получать практически бесшумный генераторный газ. Оценки показывают, что использование данной технологии экономически эффективно по сравнению с другими энергетическими технологиями.

Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН в рамках научного проекта III.17.1.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310448-0, а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-29-24047 мк, на оборудовании, входящем в ЦКП "Высокотемпературный контур".

Литература

1. ЕМИСС [Единая межведомственная информационно-статистическая система]. Государственная статистика. Объем заготовленной древесины. Федеральная служба государственной статистики, 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://fedstat.ru/indicator/37848>. (дата обращения 24.11.2018).
2. ЕМИСС [Единая межведомственная информационно-статистическая система]. Государственная статистика. Производство основных видов продукции в натуральном выражении с 2017 г. (в соответствии с ОКПД2). Федеральная служба государственной статистики, 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://fedstat.ru/indicator/58636>. (дата обращения 24.11.2018).
3. Левин А.Б., Суханов В.С., Шереметьев Д.С. Энергетический потенциал топливного ресурса лесной биоэнергетики РФ. Известия Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2010. № 4. С. 37–46.
4. Левин А.Б. Биоэнергетика — важнейшее средство повышения энергоэффективности лесного комплекса России. Известия Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2012. № 8. С.160–165.
5. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года. [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/34064> (<http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIXID77KCTL.pdf>) (дата обращения 29.04.2019).
6. Липунов И.Н., Первова И.Г., Легкий В.И. Комбинированный аппарат для эффективной сушки измельченной древесной массы. Экология и промышленность России. 2015. № 1. С. 8–10.
7. Любов В. Экологическая и энергетическая эффективность производства древесных гранул. Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 7. С. 33–39.
8. Kozlov A., Svishchev D., Marchenko O.V., Solomin S., Shamansky V., Keiko A. Development of a multi-stage biomass gasification technology to produce quality gas. 25th European Biomass Conference. Proceedings of the International Conference. Stockholm, June 12-15, 2017. Stockholm, ETA Florence Renewable Energies, 2017. P. 776–781.
9. URL: <http://www.ieabioenergytask33.org>. [Электронный ресурс] (дата обращения 24.11.2018).
10. Загруднинов Р.Ш., Нагорнов А.Н., Рыжков А.Ф. и др. Технологии газификации в плотном слое. Барнаул, ОАО "Алтайский дом печати", 2009. 296 с.
11. Khudyakova G.I., Kozlov A.N., Svishchev D.A. Modeling combined heat and power plant based on multi-stage gasifier and internal combustion engines of various power outputs. Journal of Physics: Conference Series. 2017. № 891(012200). P. 1–7.
12. Зайцев А.В., Рыжков А.Ф., Силин В.Е. и др. Газогенераторные технологии в энергетике. Екатеринбург, ИЦЭУ, 2010. 611 с.
13. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of hybrid renewable energy systems in Russia. International Journal of Renewable Energy Research. 2017. Vol. 4. P. 1562–1569.
14. Цены месяца. Приложение к журналу "ТЭК России". М., ЦДУ ТЭК. 2018. № 1. 35 с.

References

1. EMISS [Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema]. Gosudarstvennaya statistika. Ob'em zagotovlennoi drevesiny. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki, 2018. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://fedstat.ru/indicator/37848>. (data obrashcheniya 24.11.2018).
2. EMISS [Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema]. Gosudarstvennaya statistika. Proizvodstvo osnovnykh vidov produktsii v natural'nom vyrazhenii s 2017 g. (v sootvetstvii s OKPD2). Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki, 2018. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://fedstat.ru/indicator/58636>. (data obrashcheniya 24.11.2018).
3. Levin A.B., Sukhanov V.S., Sheremet'ev D.S. Energeticheskii potentsial toplivnogo resursa lesnoi bioenergetiki RF. Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoi vestnik. 2010. № 4. S. 37–46.
4. Levin A.B. Bioenergetika — vazhneishee sredstvo povysheniya energoeffektivnosti lesnogo kompleksa Rossii. Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoi vestnik. 2012. № 8. S.160–165.
5. Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://government.ru/docs/34064> (<http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIXID77KCTL.pdf>) (data obrashcheniya 29.04.2019).
6. Lipunov I.N., Pervova I.G., Legkii V.I. Kombinirovannyi apparat dlya effektivnoi sushki izmel'chennoi drevesnoi massy. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2015. № 1. S. 8–10.
7. Lyubov V. Ekologicheskaya i energeticheskaya effektivnost' proizvodstva drevesnykh granul. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2018. T. 22. № 7. S. 33–39.
8. Kozlov A., Svishchev D., Marchenko O.V., Solomin S., Shamansky V., Keiko A. Development of a multi-stage biomass gasification technology to produce quality gas. 25th European Biomass Conference. Proceedings of the International Conference. Stockholm, June 12-15, 2017. Stockholm, ETA Florence Renewable Energies, 2017. P. 776–781.
9. URL: <http://www.ieabioenergytask33.org>. [Elektronnyi resurs] (data obrashcheniya 24.11.2018).
10. Zagrudninov R.Sh., Nagornov A.N., Ryzhkov A.F. i dr. Tekhnologii gazifikatsii v plotnom sloe. Barnaul, OAO "Al'taiskii dom pečhati", 2009. 296 s.
11. Khudyakova G.I., Kozlov A.N., Svishchev D.A. Modeling combined heat and power plant based on multi-stage gasifier and internal combustion engines of various power outputs. Journal of Physics: Conference Series. 2017. № 891(012200). P. 1–7.
12. Zaitsev A.V., Ryzhkov A.F., Silin V.E. i dr. Gazogeneratornyie tekhnologii v energetike. Ekaterinburg, ITSU, 2010. 611 s.
13. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of hybrid renewable energy systems in Russia. International Journal of Renewable Energy Research. 2017. Vol. 4. P. 1562–1569.
14. Tseny mesyatsa. Prilozhenie k zhurnalu "TEK Rossii". M., TsDU TEK. 2018. № 1. 35 s.

O.V. Marchenko – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 664033 Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, e-mail: marchenko@isem.irk.ru • С.В. Соломин – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: solomin@isem.irk.ru • А.Н. Козлов – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: kozlov@isem.irk.ru

O.V. Marchenko – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 664033 Russia, Irkutsk, Lermontov Str. 130, e-mail: marchenko@isem.irk.ru • S.V. Solomin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, e-mail: solomin@isem.irk.ru • A.N. Kozlov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, e-mail: kozlov@isem.irk.ru