УДК 620.97

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ В РАЙОНАХ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Карабарин Денис Игоревич[1],
DKarabarin@sfu-kras.ru

Михайленко Сергей Ананьевич[1],
SMihailenko@sfu-kras.ru

[1] Сибирский федеральный университет,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Актуальность работы обусловлена необходимостью исполнения Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и направлена на снижение себестоимости производства электрической и тепловой энергии в северных районах децентрализованной энергетики России.

Цель работы: *повышение энергоэффективности производства тепловой энергии за счет модернизации угольных котельных, обоснование выбора альтернативного варианта выработки технологии, позволяющей преобразовывать тепловую энергию в электрическую в районах децентрализованной энергетики. Создание установок, конкурирующих с дизельными электростанциями по выработке тепловой и электрической энергии, повышение экономической эффективности производства энергии в северных районах России.*

Методы исследования: *анализ существующих технологий для производства тепловой энергии в районах децентрализованной энергетики; тепловой, технико-экономический анализ технологий, позволяющих преобразовывать низко потенциальную тепловую энергию в электрическую; моделирование параметров установки на базе органического цикла Ренкина с использованием программного пакета Smoweb; анализ современных производителей технологии органического цикла Ренкина с целью подбора наиболее подходящего.*

Результаты. *Был проведен сравнительный анализ существующих технологий для производства тепловой энергии в районах децентрализованной энергетики, и выбран наиболее эффективный вариант для повышения энергоэффективности; был проведен тепловой и технико-экономический анализ применения технологий, позволяющих преобразовать низко потенциальную тепловую энергию в электрическую; было выполнено моделирование установки, работающей по принципу органического цикла Ренкина на электрическую мощность 10 кВт; был проведен анализ производителей установок, работающих по принципу органического цикла Ренкина.*

Ключевые слова:
Децентрализованная энергетика, энергоэффективность, органический цикл Ренкина, двигатель Стирлинга, твердотопливный котел.

Введение

Не секрет, что в настоящее время тариф на тепловую и электрическую энергию в районах крайнего севера достигает более 18000 р/Гкал и 30 р/кВт*ч [1]. Это объясняется существующим способом генерации и отсутствием местной добычи твердого топлива и, как следствие, доставкой его на большие расстояния. Одним из вариантов снижения тарифов является переход на автономные угольные котельные для крупных поселков и развитие возобновляемой энергетики.

В структуре потребления тепловой энергии севера явно доминируют здания. На них, а также на потери тепловой энергии, связанные с обеспечением теплом зданий, приходится до трех четвертей всего потребления тепла. В отдельных населенных пунктах с изолированными системами энергоснабжения эта доля может достигать 85 %. Удельный расход тепловой энергии на отопление жилого фонда равен 0,25–0,90 Гкал/м^2 в год при среднем по России значении 0,18 Гкал/м^2 в год.

Численность населения во многих поселках Крайнего Севера не растет, поэтому жилищное строительство в основном носит замещающий характер. Повышенные требования к строительству новых зданий могут дать только очень ограниченный эффект, и упор необходимо делать на капитальный ремонт имеющегося фонда зданий.

Установленных приборов учета тепла у потребителей довольно мало или нет вовсе. Поэтому как показатели выработки тепловой энергии, так и показатели его потребления – это преимущественно расчетные величины, а расчеты за тепловую энергию все еще ведутся по нормативам, а не по реальному потреблению.

В программах по повышению эффективности теплоснабжения реализуются проекты по модернизации котельных, перекладке тепловых сетей с предизолированными трубами, по установке индивидуальных тепловых пунктов в многоквартирных домах и зданиях социальной сферы, по утеплению жилых домов, оснащению подомовыми и квартирными приборами учета. Важной мерой является оптимизация жилого фонда (вывод из эксплуатации частично заселенных жилых домов с переселением людей, с подготовкой и проведением капремонта жилплощади для переселения в эксплуатируемых домах).

Повышение энергоэффективности в северных условиях – часто задача не снижения потребления тепла, а ликвидации его дефицита. За счет мер по повышению эффективности использования тепловой энергии и снижения тепловых потерь можно полностью покрыть дефицит поставки тепла конечным потребителям, что позволит обеспечить требуемые параметры системы теплоснабжения и отказаться от необходимости использовать электрообогреватели.

Высокая энергоемкость сдерживает развитие экономики территорий Крайнего Севера и возможности формирования собственных налоговых поступлений. Политика повышения энергоэффективности в северных регионах реализовывалась вяло и принесла довольно малый эффект, а дополнительная потребность в энергии во многих регионах определялась не только ростом валового регионального продукта, но и повышением его энергоемкости.

Автономные котельные для теплоснабжения объектов ЖКХ на современном этапе могут рассматриваться как наиболее рациональное инженерное решение, обеспечивающее централизованную подачу тепловой энергии при отсутствии потребления электрической извне.

Как показано в [2], на объектах реконструкции и нового строительства в ЖКХ России наибольший «удельный вес» имеют угольные котельные мощностью 0,5–4 МВт.

Данный проект направлен на повышение энергоэффективности севера за счет автономной угольной котельной, состоящей из блока с котлом КВ-3,0ДВО и установки, преобразующей часть тепловой энергии в электрическую, мощностью 10 кВт. Данная мощность покрывает как собственные нужды котла 3 кВт, так и собственные нужды самой котельной и системы отопления.

Анализ технологий для автономной котельной

Для осуществления данного проекта имеются пять технологий, позволяющих получать из тепловой энергии воды электрическую:

- двигатель Стирлинга;
- цикл Калины;
- органический цикл Ренкина;
- микроцикл Ренкина;
- термоэлектрические преобразователи.

Как отмечается в [3] (рис. 1), Двигатель Стирлинга обладает высокой эффективностью и нашел свое применение в промышленных образцах при температурах 650–800 °С и выше, но при данном источнике теплоты сетевой воды 95 °С не применим. Микроцикл Ренкина эффективен только при совместной выработке тепла и электричества, что не требуется для данной задачи. Термоэлектрические преобразователи обладаю эффективностью ниже 5 %.

Органический цикл Ренкина

Отличием органического цикла Ренкина от обычного цикла Ренкина является то, что рабочим телом является не вода, а органическое соединение (фреон). Основная причина замены рабочего тела – более низкая температура кипения органического теплоносителя по сравнению с водой. Схема утилизации с использованием органического цикла Ренкина представлена на рис. 2.

Для температур источника тепла 91–149 °С в качестве рабочего тела рекомендуется принимать фреон R245fa благодаря его хорошим термодинамическим свойствам [4]. Для утилизации тепла от стальной промышленности с использованием фреона R245fa был получен электрический КПД 10,2 % [5]. Так как в России фреон R245fa запрещен, его целесообразно заменить на фреон с похожими свойствами R142b.

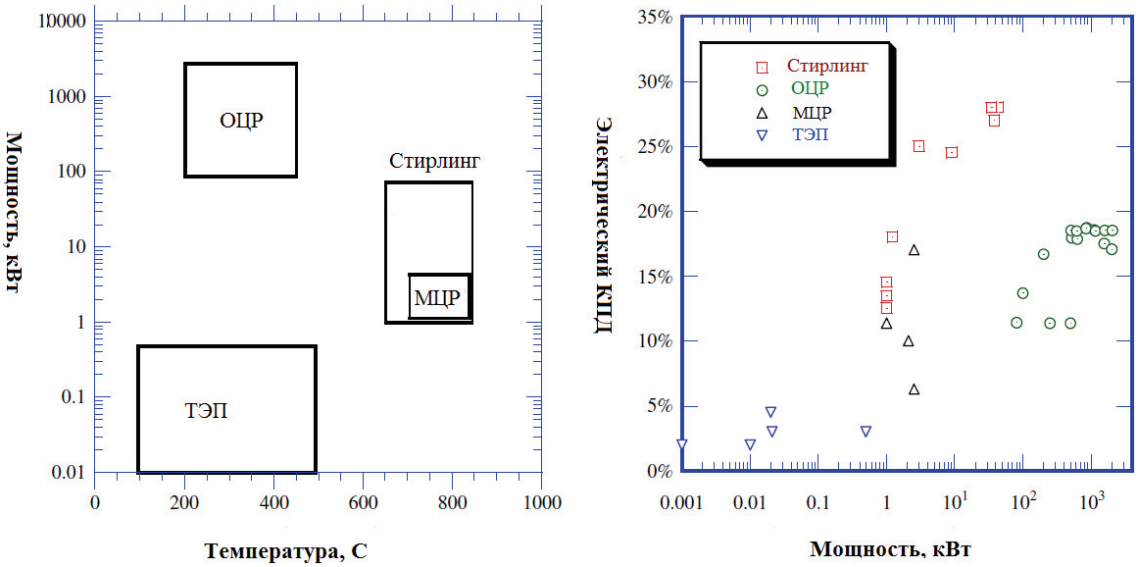

Рис. 1. *Анализ технологий для преобразования тепловой энергии в электрическую малой мощности*

Fig. 1. *Analysis of technologies for converting thermal energy into low power electrical energy*

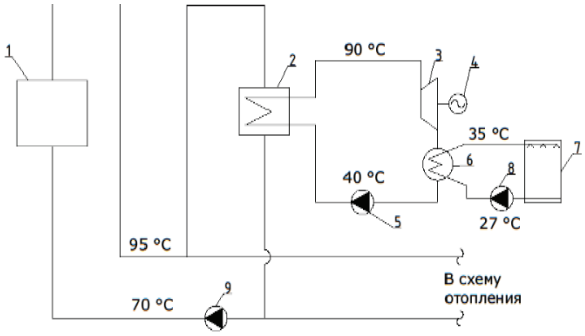

Рис. 2. *Схема котельной с использованием цикла Ренкина: 1 – котел; 2 – испаритель; 3 – турбина; 4 – генератор; 5 – питательный насос; 6 – конденсатор; 7 – градирня; 8 – циркуляционный насос; 9 – насос*

Fig. 2. *Diagram of the boiler using the Rankine cycle: 1 is the boiler; 2 is the evaporator; 3 is the turbine; 4 is the generator; 5 is the feed pump; 6 is the condenser; 7 is the cooling tower; 8 is the circulation pump; 9 is the pump*

Цикл Калины

Схема утилизации с использованием цикла Калины представлена на рис. 3.

Как отмечается в [6], для температуры пара аммиака перед турбиной 90 °С, давлении 25 бар, степени сухости 0,8 получен электрический КПД 8,7 %.

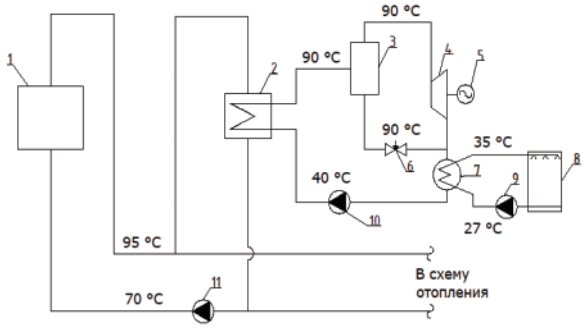

Рис. 3. *Схема котельной с использованием цикла Калины: 1 – котел; 2 – испаритель; 3 – сепаратор; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – дроссельный клапан; 7 – абсорбер; 8 – градирня; 9 – охлаждающий насос; 10 – питательный насос; 11 – сетевой насос*

Fig. 3. *Diagram of the boiler using the Kalina cycle: 1 is the boiler; 2 is the evaporator; 3 is the separator; 4 is the turbine; 5 is the generator; 6 is the throttle valve; 7 is the condenser; 8 is the cooling tower; 9 is the circulation pump; 10 is the feed pump; 11 is the pump*

Сравнение технологий

Для сравнения технологий проведем технико-экономический анализ возможности реализации каждой из них [7–16]. Удельные капитальные вложения принимаем согласно [17], [18] и курса валют на 29.01.2016 г. Тариф на электрическую энергию принимаем 36,47 согласно [19].

Наиболее важные технические и экономические параметры представлены в табл. 1.

Среди методов выработки электрической энергии более рентабельным оказался органический цикл Ренкина. Срок его окупаемости составляет 2 года.

Таблица 1. *Сравнение технологий использования тепла*
Table 1. *Comparison of technologies of heat use*

Параметры Parameters	Органический цикл Ренкина Organic Rankine Cycle	Цикл Калины Kalina cycle
Рабочее тело Working fluid	R142b	Водоаммиачная смесь Water-ammonia mixture
Параметры рабочего тела Working fluid parameters	P=10 бар T=90 °C	P=25 бар T=90 °C
Используемое тепло, кВт Used heat, kW	98	115
Мощность, кВт/Power, kW	10	10
Отпущенная тепловая мощность, МВт Thermal capacity, MW	2,902	2,885
КПД/Efficiency, %	10,2	8,7
Себестоимость выработанной электроэнергии, р./(кВт*ч) Cost of the generated electricity, rub/(kW*h)	11,376	12,895
Капитальные вложения, млн р. Capital investments, mln rub.	0,660	0,750
Издержки млн р/год Costs, mln. rub. per year	0,887	1,006
Срок окупаемости, лет Payback period, years	2	3

Таблица 2. *Производители ОЦР малой мощности*
Table 2. *Manufacturers of low power ORC*

Производители Manufacturers	Тип расширителя Expander	Мощность, кВт Size, kW
Electratherm	Винтовая/Screw	50
Barber-nichols	Осевая/Vane	15–100
GMK		50–100
Freepower		60–100
Durr-cyplan	Турбогенератор Turbogenerator	70
Ener-g-rotors	Шестеренчетая/Gear	40–60
Transpacenergy	Осевая/Vane	100
Infinityturbine	Винтовая/Screw	10–100
Aqylon	Осевая/Vane	100
E-rational	Винтовая/Screw	50–100
Eneftech	Неизвестно/n/a	5–30
Koehler-ziegler	Винтовая/Screw	50–100
Enerbasque	неизвестно/n/a	20–100
Termocycle	Осевая/Vane	50–100
Entrans	неизвестно/n/a	50–100
Enogia	Турборасширитель Turboexpander	5–100
Verdicorp	Турбокомпрессор Turbocorpcompressor	20–100
G-tet	неизвестно/n/a	25–100

Анализ производителей установок, работающих на Органическом цикле Ренкина

Как отмечается в [20,21], установки ОЦР малой мощности делятся на очень малые (меньше 10 кВт) и средне малые (10–100 кВт). Как видно

из табл. 2, производителями ОЦР очень малой мощности до 10 кВт используются турбины спирального и винтового типа, свыше 10 кВт – турбины осевого типа.

Выводы

Внедрение автономных котельных на базе твердотопливных котлов и надстройкой установкой, работающей по органическому циклу Ренкина, позволит:

1) строительство котельных независимо от расположения ЛЭП;
2) создать альтернативу дизельным электростанциям по получению электроэнергии в северных районах путем комбинированной выработки от автономных котельных;
3) стимулировать внедрение возобновляемой энергетики в комбинации с автономными котельными для крупных населённых пунктов;
4) стимулировать разработку угольных месторождений в районах севера;
5) повысить энергоэффективность производства энергии за счет внедрения когенерации в производство тепловой энергии;
6) стимулировать развитие технологии ОЦР на Российском рынке;
7) развивать турбостроение малой мощности в Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башмаков И.А. Повышение эффективности энергоснабжения в северных регионах России // Энергосбережение. – 2017. – № 2. – С. 46–52.
2. Хаванов П.А., Барынин К.П. Оптимизация тепловых и гидравлических режимов работы универсального ряда автономных котельных для ЖКХ // АВОК. – 2005. – № 4. – С. 32–44.
3. Bianchi M., De Pascale A. Bottoming cycles for electric energy generation: Parametric investigation of available and innovative solutions for the exploitation of low and medium temperature heat sources // Applied Energy. – 2011. – V. 88. – P. 1500–1509.
4. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation / F. Velez, J.J. Segovia, M.C. Martin, G. Antolin, F. Chejne, A. Quijano // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – V. 16. – № 6. – P. 4175–4189. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022 (дата обращения 20.06.2017).
5. Onder Kaska. Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry // Energy Convers and Manage. – 2014. – V. 77. – P. 108–117.
6. The performance of the Kalina cycle system 11 (KCS-11) with low-temperature heat sources / H.M. Hettiarachchi, M. Golubovic, W.M. Worek, Y. Ikegami // Journal of Energy Resources Technology. Transactions of the ASME. – 2007. – V. 129. – P. 243–247.
7. Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander // Apply Energy. – 2010. – V. 87. – № 4. – P. 1260–1268.
8. Bianchi M., De Pascale A., Negri di Montenegro G. Micro gas turbine repowering with Inverted Brayton Cycle // ASME paper GT. – 2005. – № 68550.
9. An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids / P.J. Mago, L.M. Chamra, K. Srinivasan, C. Somayaji // Applied Thermal Engineering – 2008. – V. 28. – № 1. – P. 998–1007.
10. Micheli D., Reini M. On bottoming a micro turbine with a micro ORC section. Preliminary design of the ORC expander // Proc. of ECOS 2007. – Padova, Italy, 2007, June. – P. 25–28.
11. Invernizzi C., Iora P., Silva P. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines Turboden presentation 09Z00156 // Applied Thermal Engineering. – 2007. – V. 27. – P. 100–110.
12. Miniaturized TEG with thermal generation of free carriers / G. Span, M. Wagner, T. Grasser, L. Holmgren / Phys. Stat. Sol. (RRL). – 2007. – № 6. – P. 241–243.
13. Карабарин Д.И. Анализ методов утилизации теплоты анодных газов в алюминиевом производстве // Промышленная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 25–29.
14. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE) / G. Yu, G. Shu, H. Tian, H. Wei, L. Liu // Energy. – 2013. – № 51. – P. 281–290.
15. Zhang H.G., Wang E.H., Fan B.Y. A performance analysis of a novel system of a dual loop bottoming organic Rankine cycle (ORC) with a light-duty diesel engine // Appl. Energy. – 2013. – V. 102. – P. 1504–1513.
16. Tchanche B.F., Pétrissans M., Papadakis G. Heat resources and organic Rankine cycle machines // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – V. 39. – P. 1185–1199.
17. Блинов А. Энергоэффективность использования ORC-модулей в децентрализованной энергетике РФ // ЛесПромИнформ. – 2014. – № 8. – С. 18–23.
18. FAROL Pesquisa. Energetic and economic analysis of Kalina cycle for low Temperature geothermal sources in Brazil // Proc. of ECOS 2012 – the 25 International conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems. – Perugia, Italy, June 26–29, 2012. – P. 82–88.
19. Приказ Региональной энергетической комиссии Красноярского края от 13.12.2016 N 328-п «Об установлении тарифов на электрическую энергию, отпускаемую обществом с ограниченной ответственностью «Энергия» (с. Хатанга, ИНН 2411024040)». – Красноярск: Наш красноярский край № 95 21.12.2016.
20. Besong Obia J. State of art on ORC applications for waste heat recovery and micro-cogeneration for installations up to 100kWe // Energy Procedia. – 2015. – V. 82. – P. 994–1001.
21. Tchanche B.F., Pétrissans M., Papadakis G. Heat resources and organic Rankine cycle machines // Renewable sustainable energy. – 2014. – V. 39. – P. 1185–1199.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

Карабарин Д.И., аспирант, старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций Политехнического института Сибирского федерального университета.

Михайленко С.А., доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций Политехнического института Сибирского федерального университета.

UDC 620.97

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ENERGY PRODUCTION IN THE AREAS OF DECENTRALIZED ENERGY SOURCES

Denis I. Karabarin[1],
DKarabarin@sfu-kras.ru

Sergei A. Mikhaylenko[1],
SMihailenko@sfu-kras.ru

[1] Siberian Federal University,
79, Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, 66004, Russia.

The relevance of the work is caused by the necessity to execute the Federal law «On energy saving and on increasing energy efficiency and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation» and is aimed at reducing the cost of production of electric and thermal energy in the Northern areas of the decentralized power industry of Russia.

***The aim of the work is the** increase of energy efficiency of thermal energy production due to modernization of coal-fired boiler houses, justification of the choice of an alternative option for development of technology that allows the conversion of thermal one into electrical energy in areas of decentralized energy; creation of installations competing with diesel power stations for generation of thermal and electric energy, increasing the economic efficiency of energy production in the northern regions of Russia.*

***Research methods:** analysis of existing technologies for production of thermal energy in the areas of decentralized energy sources; thermal, techno-economic analysis of technologies to convert low-grade thermal energy into electrical energy; modelling the plants based on organic Rankine cycle using a software package Smoweb; analysis of contemporary producing technology of Organic Rankine cycle in order to select the most appropriate one.*

***Results.** The authors have carried out the comparative analysis of existing technologies for production of thermal energy in the areas of decentralized energy sources and chosen the most effective option for increasing energy efficiency. Heat produced and techno-economic analysis of using technologies to convert low-grade thermal energy into electrical energy was carried out. The authors modeled the device working on the principle of organic Rankine cycle for electric power of 10 kW. The manufacturers of the devices, working on the principle of organic Rankine cycle, were analyzed.*

Key words:
Decentralized energy, energy efficiency, organic Rankine cycle, Stirling engine, solid fuel boiler.

REFERENCES

1. Bashmakov I.A. Improving the efficiency of energy supply in Northern regions of Russia. *Energy Saving*, 2017, vol. 2, pp. 46–52. In Rus.
2. Khavanov P.A., Baranin K.P. Optimization of thermal and hydraulic modes of the universal number independent boilers for housing and communal services. *AVOK*, 2005, vol. 4, pp. 46–52.
3. Bianchi M.., De Pascale A. Bottoming cycles for electric energy generation: Parametric investigation of available and innovative solutions for the exploitation of low and medium temperature heat sources. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, pp. 1500–1509.
4. Velez F., Segovia J.J., Martin M.C., Antolin G., Chejne F., Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, no. 6, pp. 4175–4189. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022 (accessed 20 June 2017).
5. Onder Kaska. Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry. *Energy Convers and Manage*, 2014, vol. 77, pp. 108–117.
6. Hettiarachchi H.M., Golubovic M., Worek W.M., Ikegami Y. The performance of the Kalina cycle system 11 (KCS-11) with low-temperature heat sources. *Journal of Energy Resources Technology. Transactions of the ASME*, 2007, vol. 129, pp. 243–247.
7. Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander. *Apply Energy*, 2010, vol. 87, no.4, pp. 1260–1268.
8. Bianchi M., De Pascale A., Negri di Montenegro G. Micro gas turbine repowering with Inverted Brayton Cycle. *ASME paper GT*, 2005, no. 68550.
9. Mago P.J., Chamra L.M., Srinivasan K., Somayaji C. An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. *Applied Thermal Engineering*, 2008, vol. 21, no. 1, pp. 998–1007.
10. Micheli D., Reini M. On bottoming a micro turbine with a micro ORC section. *Preliminary design of the ORC expander. Proc. of ECOS 2007*. Padova, Italy Publ., 2007, June. pp. 25–28.
11. Invernizzi C., Iora P., Silva P. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines Turboden presentation 09Z00156. *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, pp. 100–110.
12. Span G., Wagner M., Grasser T., Holmgren L. Miniaturized TEG with thermal generation of free carriers. *Physica Status Solidi (RRL)*, 2007, vol. 6, no. 6, pp. 241–243.
13. Karabarin D. Analysis of methods of utilizing the heat of the anode gases aluminum production. *Industrial power engineering*, 2017, vol. 1, pp. 25–29. In Rus.
14. Yu G., Shu G., Tian H., Wei H., Liu L. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE). *Energy*, 2013, vol. 51, pp. 281–290.
15. Zhang H.G., Wang E.H., Fan B.Y. A performance analysis of a novel system of a dual loop bottoming organic Rankine cycle (ORC) with a light-duty diesel engine. *Apply Energy*, 2013, vol. 102, pp. 1504–1513.
16. Tchanche B.F., Pétrissans M., Papadakis G. Heat resources and organic Rankine cycle machines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 1185–1199.
17. Blinov A. Efficiency of the use of ORC modules in a decentralized energy of the Russian Federation. *LesPromInform*, 2014. vol. 8, pp. 18–23. In Rus.
18. FAROL Pesquisa. Energetic and economic analysis of Kalina cycle for low Temperature geothermal sources in Brazil. *Procee-*

dings of ECOS 2012 – the 25th International conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems. Italy Perugia, June 26–29, 2012. pp. 82–88.
19. *Prikaz regionalnoy energeticheskoy komissii Krasnoyarskogo kraya «Ob ustanovlenii tarifov na elektricheskuyu energiyu, otpuskaemuyu obshchestvom s ogranichennoy otvetstvennostyu "Energiya"»* [Order of the Regional Energy Commission of the Krasnoyarsk Territory of December, 13.2016 N 328-p «On establishment of tariffs for electric energy released by the limited liability company «Energia»» (Khatanga village, INN 2411024040)]. Krasnoyarsk, Nash Krasnoyarsky kray No. 95 on 21.12.2016.
20. Besong Obia J. State of art on ORC applications for waste heat recovery and micro-cogeneration for installations up to 100kWe. *Energy Procedia*, 2015, vol. 82, pp. 994–1001.
21. Tchanche B.F., Pétrissans M., Papadakis G. Heat resources and organic Rankine cycle machines. *Renewable sustainable energy*. 2014, vol. 39, pp. 1185–1199.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

Denis I. Karabarin, postgraduate, senior lector, Siberian Federal University.

Sergei A. Mikhaylenko, Dr. Sc., professor, Siberian Federal University.