УДК 621.565 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-83-88

Экспериментальная модель и результаты исследований процессов термоэлектрического преобразования

И.А. Сысоев[a], Т.И. Сысоева[b], Н.Н. Иванов[c], А.С. Суханов[d]

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия
[a]ivansys@istu.edu, [b]ziminati@istu.edu, [c]crist2003@mail.ru, [d]baizile94@gmail.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-8561-5383, [b]http://orcid.org/0000-0001-6301-1901,
[c]https://orcid.org/0000-0002-4755-3644, [d]https://orcid.org/0000-0002-1445-667X
Статья поступила 28.03.2018, принята 4.05.2018

В данной работе представлены исследования по разработке эффективного способа утилизации тепла технологических газов при производстве алюминия. Использовались методы математического моделирования и экспериментальных измерений. Описана необходимость использования кожухотрубчатых теплообменных аппаратов в системах газоходов алюминиевого производства для утилизации тепловой энергии. Для проведения исследований оптимальных режимов работы термоэлектрического преобразователя (ТЭП) и создания экспериментальных условий была создана модель участка газохода с диапазоном температуры на поверхности от 100 до 220 °С, обеспеченная источником охлаждения с температурой от 30 до 80 °С для задания разности температур между поверхностями термоэлектрического модуля. Достигнуты результаты, подтверждающие целесообразность применения ТЭП для рекуперации тепловой энергии. Доказана целесообразность применения термоэлектрических преобразователей с целью рекуперации тепла и выработки электроэнергии для технологических нужд. Исходя из значения мощности 2 Вт от одного модуля и с учетом использования 12 модулей в составе ТЭП, средняя мощность одного ТЭП составила 24 Вт. Необходимая площадь поверхности участка газохода для преобразования тепловой энергии в электроэнергию выходной мощностью 1 кВт составит 1,17 м^2 без учета площади коммутации ТЭП между собой и дальнейшего подсоединения к системе водоснабжения. В системах газоходов, где существует достаточное количество тепловой энергии, которую необходимо утилизировать, представляется возможным использовать ТЭП с целью выработки электроэнергии для технологических нужд.

Ключевые слова: электролизер; автоматизация; утилизация тепла отходящих газов; теплообменник; моделирование; термоэлектрический преобразователь; напряжение; ток; экологическая оценка; фториды.

Experimental model and results of studies of thermoelectric conversion processes

I.A. Sysoev[a], T.I. Sysoeva[b], N.N. Ivanov[c], A.S. Sukhanov[d]

National Research Irkutsk State Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia
[a]ivansys@istu.edu, [b]ziminati@istu.edu, [c]crist2003@mail.ru, [d]baizile94@gmail.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-8561-5383, [b]http://orcid.org/0000-0001-6301-1901,
[c]https://orcid.org/0000-0002-4755-3644, [d]https://orcid.org/0000-0002-1445-667X
Received 28.03.2018, accepted 4.05.2018

In this paper, studies are presented on the development of efficient methods for utilizing heat from process gases in the production of aluminum. Methods of mathematical modeling and experimental measurements were used. The necessity of using shell-and-tube heat exchangers in aluminum flue gas systems for the utilization of thermal energy is described. To conduct research on the optimum operating conditions of a thermoelectric transducer (TET) and to create experimental conditions, a model of a gas flue section was created with a temperature range on the surface from 100 to 220 °C provided by a cooling source with a temperature of 30 to 80 ° C to determine the temperature difference between the surfaces of the thermoelectric module. The results confirming the feasibility of using TET for heat energy recovery have been achieved. It is proved expedient to use TETs for the purpose of heat recuperation and power generation for technological needs. Based on the power value of 2 W from 1 module and, taking into account the use of 12 modules in the TET, the average power of one TET was 24 W. The required surface area of the gas flue section for conversion of thermal energy into electricity with an output of 1 kW will be 1.17 m2, excluding the area of switching TETs among themselves and further connection to the water supply system. In flue gas systems, where there is a sufficient amount of heat energy, which has to be utilized, it is possible to use TETs to generate electricity for technological needs.

Key words: electrolyzer; automation; recycling waste heat; heat exchanger; modeling; thermoelectric transducer; voltage; current; environmental assessment; fluorides.

Введение

В связи с требованиями российского законодательства в сфере эффективного и рационального использования энергетических ресурсов актуальными являются исследования путей увеличения энергоэффективности производства [1–5]. На многих отечественных промышленных предприятиях технологический процесс связан с выбросом высокотемпературных газов в окружающую среду. Увеличить работоспособность и уменьшить затраты на эксплуатацию газоочистных установок (ГОУ) можно за счет снижения температуры технологических газов, так как при охлаждении отходящих газов происходит уменьшение их физических объемов [6].

Одним из самых эффективных решений для утилизации тепла газов является применение теплообменных аппаратов [7–18]. Преимуществом данной технологии является рекуперация тепловой энергии, что позволяет добиться большей энергоэффективности производства за счет нагрева воды на производственные нужды, для отопления, производства электроэнергии, предварительного нагрева глинозема или обожженных анодов [19–25].

В результате проработки конструктивных особенностей разрабатываемого авторами работы теплообменного аппарата было определено, что большей эффективности утилизации тепловой энергии газов можно достичь за счет использования принципа термоэлектрического преобразования (ТЭП). Термоэлектрический преобразователь представляет собой полупроводниковый генератор, вырабатывающий электрический ток за счет разницы температур на его противоположных поверхностях. В настоящей работе представлены результаты исследований процессов термоэлектрического преобразования на экспериментальной модели газохода.

Описание оборудования и материалов для проведения исследований процессов термоэлектрического преобразования. Для проведения исследований оптимальных режимов работы ТЭП и создания экспериментальных условий необходимо было создать модель участка газохода с диапазоном температуры на поверхности от 100 до 200 °С, обеспечить источником охлаждения с температурой от 30 до 80 °С для задания разности температур между поверхностями термоэлектрического модуля. Для этого были подобраны следующие комплектующие:

– технический фен Bosch GHG 660 с возможностью формирования скорости потока с температурой от 50 до 660 °С;

– измеритель скорости потока воздуха (анемометр) Testo 410-2;

– 8-канальный измеритель температуры ОВЕН;

– высокоточный стационарный цифровой мультиметр UTM 1804;

– цифровой термометр;

– комплектующие для радиатора охлаждения ТЭП;

– прочие вспомогательные устройства: узлы крепления системы, электропроводка, система водопитающих и водоотводящих шлангов.

Описание экспериментальной модели для исследования процессов ТЭП. Участок системы газохода, на который планируется размещать термоэлектрический преобразователь, представляет собой трубу из стали толщиной 3 мм, по которой движется газ с температурой 150–200 °С. Эти условия являются стационарным режимом работы данного участка газохода. Экспериментальная модель газохода была изготовлена из стальной трубы сечением 50х50 мм, длиной 700 мм и толщиной стенок 3 мм, в которую направлялся поток горячего воздуха, отходящий от технического фена. Сопло фена располагалось горизонтально на входе в стальную трубу газохода. Путем корректировки температуры подачи горячего воздуха техническим феном в участок газохода и регулировки заслонки, установленной на выходе из газохода, удавалось стабилизировать температуру наружной поверхности стенки газохода в диапазоне от 100 до 220 °С со скоростью газового потока порядка 9 м/с.

Для обеспечения необходимой разности температур и съема тепла с термоэлектрического модуля использовались специально изготовленные стальные радиаторы с водяным охлаждением, обеспечивающие снижение температуры поверхностей термоэлектрических модулей до необходимых значений. Радиаторы при помощи сантехнической арматуры подключались к системе водоснабжения лаборатории. Для подачи (отключения) теплоносителя были установлены шаровые краны, а для настройки скорости потока теплоносителя смонтированы терморегулируемые радиаторные клапаны.

С учетом того, что поверхности газохода и радиатора имеют свою шероховатость, для обеспечения хорошего контакта поверхностей термоэлектрических модулей с поверхностями источника места контактов были покрыты теплопроводной кремнийорганической пастой КПТ-8.

Для измерения и контроля температур были установлены термопары для измерения температуры потока газа на выходе, а также температуры поверхности стенки газоходной трубы и радиатора охлаждения. Обработка данных с термопар велась при помощи 8-канального измерителя температуры ОВЕН УТК38.

Температура теплоносителя измерялась при помощи контактной термопары, размещенной на входной муфте радиатора.

Измерения выходных параметров напряжения и силы тока, осуществлялись при помощи стационарных цифровых мультиметров UTM 1804.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

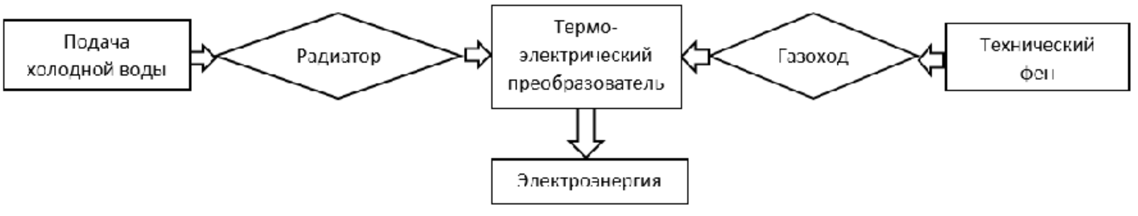

Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки термоэлектрического преобразования

Результаты исследований процессов термоэлектрического преобразования. Исследование процессов термоэлектрического преобразования производилось в следующей последовательности:

– запуск источника холодного теплоносителя (от системы водоснабжения);

– запуск источника горячего теплоносителя (от технического фена);

– стабилизация температуры и аэродинамики потока;

– стабилизация режима теплообмена;

– фиксирование результатов испытаний.

Динамика изменения температур в контрольных точках на основе данных, зафиксированных в ходе эксперимента, представлена на рис. 2–6.

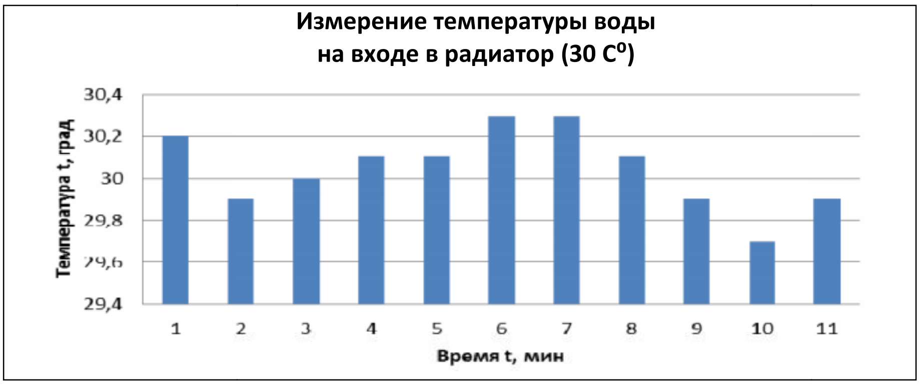

Рис. 2. Изменение температуры в точке входа в радиатор в течение 10 мин. при плановой температуре теплоносителя 30 °С

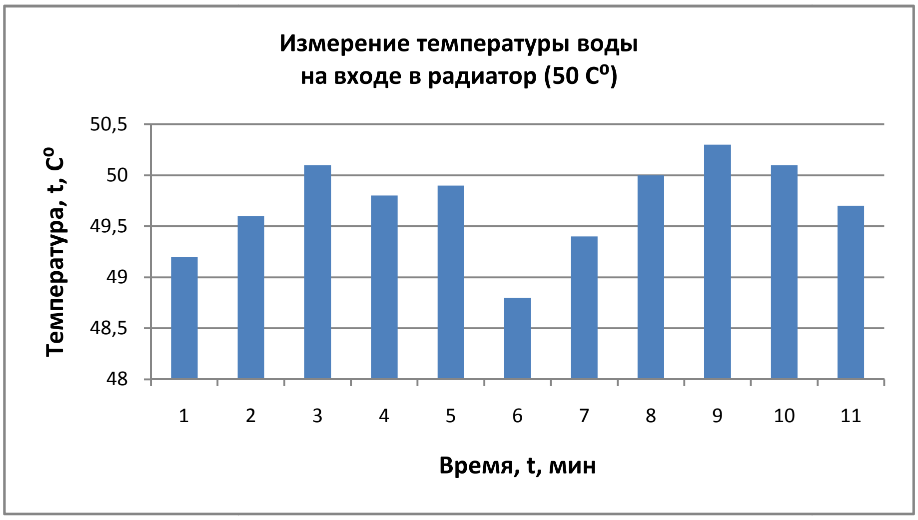

Рис. 3. Изменение температуры в точке входа в радиатор в течение 10 мин. при плановой температуре теплоносителя 50 °С

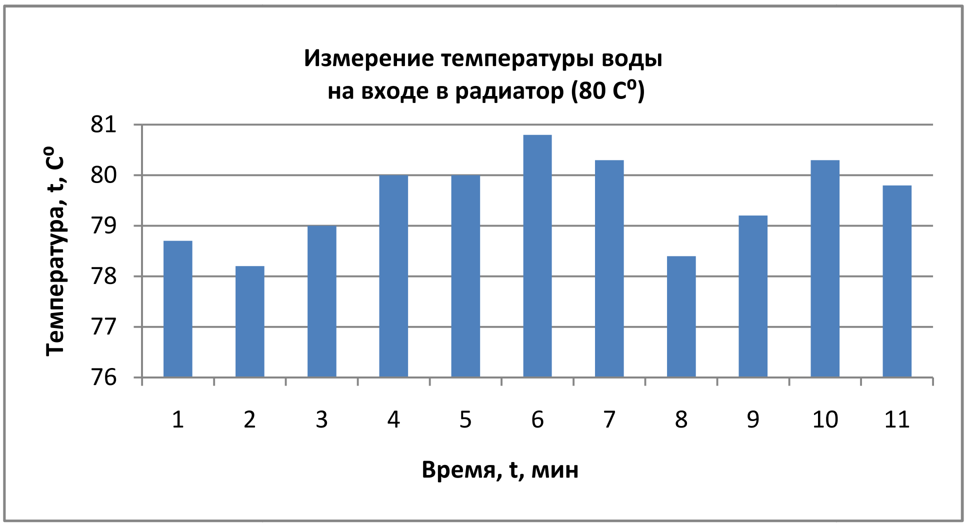

Рис. 4. Изменение температуры в точке входа в радиатор в течение 10 мин. при плановой температуре теплоносителя 80 °С

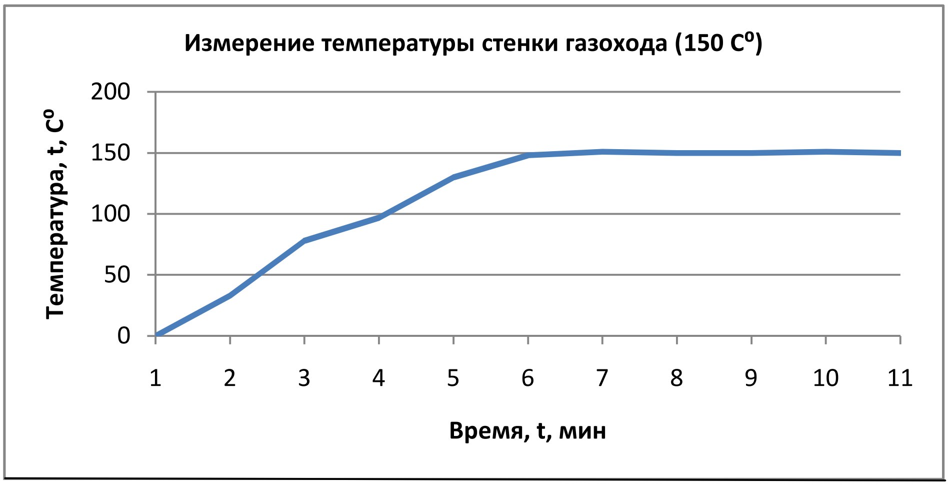

Рис. 5. Изменение температуры на поверхности экспериментального газохода при плановой температуре 150 °C

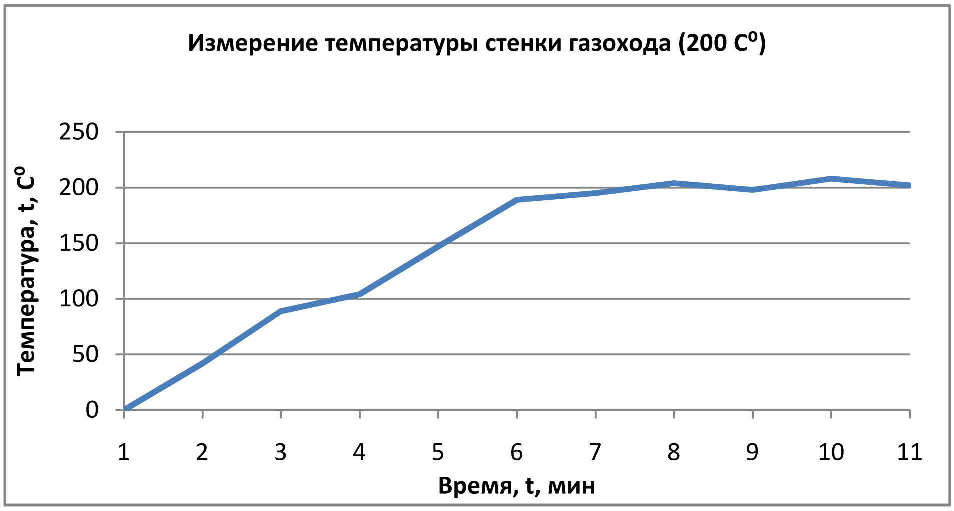

Рис. 6. Изменение температуры на поверхности экспериментального газохода при плановой температуре 200 °C

Обсуждение результатов исследований. В результате проведенных экспериментов были измерены основные рабочие параметры (напряжение и сила тока) термоэлектрического преобразователя при различных температурных режимах. Испытания показали стабильную работу преобразователя при установившемся режиме теплообмена между газом и теплоносителем.

Значения выходных характеристик ТЭП при различных градиентах температуры представлены в таблице.

Таблица 1

Основные выходные величины (напряжение, сила тока, мощность) одного термоэлектрического модуля при различных градиентах температур поверхностей

Температура поверхности стенки газоходной трубы, *°C*	Температура радиатора охлаждения, *°C*	Напряжение U, *V*	Сила тока I, *A*	Мощность W, *Вт*
150	30	2,4	0,8	1,92
	50	2,2	0,7	1,54
	80	1,5	0,5	0,75
200	30	3,4	1,2	4,08
	50	3,1	1,05	3,25
	80	2,4	0,75	1,8

Таким образом (см. таблицу), наилучшие результаты измерений были получены при градиенте температур 170 °C (200 °C горячая сторона и 30 °C — холодная) между поверхностями термоэлектрического модуля, при этом вырабатываемая мощность для одного модуля составила 4 Вт.

Худшие показатели наблюдались при градиенте температур в 70 °C (150°C горячая сторона и 80 °C — холодная) между поверхностями термоэлектрического модуля, при этом вырабатываемая мощность для одного модуля составила 0,75Вт.

Для определения требуемой площади поверхности газохода рассмотрим задачу, при которой на участке в виде трубы, по которой движется газ с температурой порядка 150 °С, планируется с помощью термоэлектрического преобразования выработать мощность в размере 1 кВт. Средняя мощность, генерируемая одним модулем ТЭП при охлаждении радиатора до 50 °С, составляет 1,54 Вт. Определим требуемое количество модулей ТЭП ($N_{ТЭП}$), которое необходимо использовать:

$$N_{ТЭП} = 1000/1,54 \approx 650 \text{ шт.}$$

Рассчитаем площадь участка газохода, необходимую для размещения требуемого количества ТЭП, с учетом размеров одного модуля (0,0016 м^2):

$$S_{ТЭП} = 650 * 0,0016 = 1,04 \text{ м}^2.$$

Таким образом, необходимая площадь поверхности участка газохода для преобразования тепловой энергии в электроэнергию выходной мощностью 1 кВт составит 1,04 м^2 без учета площади коммутации ТЭП между собой и расположения на радиаторе охлаждения.

Заключение

Опытным путем было установлено, что в системах газоходов, где существует достаточное количество тепловой энергии, целесообразно использование процесса термоэлектрического преобразования. При этом генерируемая электроэнергия может использоваться для технологических нужд, например, освещения или питания электроприборов. Таким образом, применение теплообменных аппаратов наряду с термоэлектрическими преобразователями является инновационной технологией утилизации тепловой энергии газов и позволит увеличить энергетическую эффективность производства, а также достичь экономических преимуществ в технологии газоочистки при производстве алюминия.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ с использованием результатов работ, выполненных в ходе проекта 02.G25.31.0181 «Разработка сверхмощной энергоэффективной технологии получения алюминия РА-550» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.

Литература

1. Кузьмин М.П., Шестаков С.С., Кузьмина М.Ю., Журавлева А.С. Инновационное развитие металлургического комплекса Иркутской области // Вестник ИрГТУ. 2015. № 5 (100). С. 236–240.

2. Ларионов Л.М., Кондратьев В.В., Кузьмин М.П. Пути использования углеродсодержащих отходов алюминиевого производства // Вестник ИрГТУ. 2017. № 4 (123). С. 139-146.

3. Ножко С.И., Турусов С.Н., Никитин В.И. Технологический подход к управлению энергетическим режимом электролизера // Цветные металлы. 2006. № 8. С. 85-87.

4. Nozhko S.I. A method for determining the productivity of electrolyzers for aluminum production // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2011. Т. 52. № 1. Р. 16-18.

5. Ножко С.И., Блашков А.А. Перспективы повышения мощности алюминиевых электролизеров // Цветные металлы. 2012. № 10. С. 65-68.

6. Зельберг Б.И., Рагозин Л.В., Баранцев А.Г., Ясевич О.И., Григорьев В.Г., Баранов А.Н., Кондратьев В.В. Производство алюминия и сплавов на его основе: справочник металлурга. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2015. 764 с.

7. El Hani Bouhabila, Erling Næss, Victoria Kielland Einejord and Kolbeinn Kristjansson. An innovative compact heat exchanger solution for aluminum off-gas cooling and heat recovery // Light Metals. 2013. P. 793–797.

8. Anders Sørhuus, Geir Wedde. Pot gas heat recovery and emission control // Light Metals. 2009. P. 281–286.

9. M. Bonnier, S. Massambi, J-M. Jolas, G. Girault, V. Demetriou, D. Wheaton. Development of a System Basedon Water Atomization to Decrease, Prior to Treatment, the Temperature of the Gas Emitted from Aluminum Cells // Light Metals 2007. P. 193–197.

10. El Hani Bouhabila, Bernard Cloutier, Thierry Malard, Philippe Martineau, Hugues Vendette. Electrolytic cell gas cooling upstream of treatment center // Light Metals. 2012. P. 545–550.

11. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondratiev V.V., Mazurenko V.V., Sheglov E.L. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases // Metallurgist. 2017. № 9-10. P. 973–977.

12. Antoine de Gromard, Chin Lim, El Hani Bouhabila, Bernard Cloutie, Mathieu Frainais. Development on electrolytic cell gas cooling // Light Metals. 2014. P. 623–628.

13. Anders Sørhuus, Geir Wedde, Ketil Rye, Gaute Nyland. Increased energy efficiency and reduced HF emissions with new heat exchanger // Light Metals. 2010. P. 249–254.

14. Anders K. Sørhuus, Sivert Ose, Bent M. Nilsen. Possible use of 25 mW thermal energy recovered from the potgas at Alba line 4 // Light Metals. 2015. P. 631– 636.

15. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Горовой В.О., Зимина Т.И. Лабораторные испытания кожухотрубчатого теплообменного устройства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 12. С. 155–164.

16. Kondrat’ev V., Govorkov A., Lavrent’eva M., Sysoev I., Karlina A.I. Description of the heat exchanger unit construction, created in IRNITU // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 19. С. 9979-9983.

17. Ершов В.А., Говорков А.С., Иванов Н.Н. Разработка научных основ повышения производительности и улучшения эксплуатационных параметров экспериментального теплообменного аппарата при различных режимах работы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3 (55). С. 36-42.

18. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Горовой В.О., Зимина Т.И., Карлина А.И. Разработка и испытания опытного образца устройства по преобразованию тепла в электрическую энергию (ТЭП) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 7 (126). С. 132-142.

19. Шахрай С.Г., Кондратьев В.В., Белянин А.В., Николаев В.Н., Гронь В.А. Охлаждение анодных газов алюминиевых электролизеров в теплообменниках нагрева глинозема // Металлург. 2015. № 2. С. 29–32.

20. Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Кондратьев В.В., Ершов В.А., Карлина А.И. Обоснование возможности нагрева глинозема теплом анодных газов алюминиевого электролизера // Вестник ИрГТУ. 2016. № 3. С. 131–138.

21. Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Кондратьев В.В., Ершов В.А. Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера // Цветные металлы. 2016. № 2. С. 52–56.

22. Шахрай С.Г., Немчинова Н.В., Кондратьев В.В., Мазуренко В.В., Щеглов Е.Л. Технические решения по охлаждению отходящих газов алюминиевых электролизеров // Металлург. 2016. № 9. С. 73–77.

23. Кондратьев В.В., Ершов В.А., Шахрай С.Г., Иванов Н.А. Предварительный нагрев обожженного анода // Цветные металлы. 2015. № 1. С. 54–56.

24. Shahrai S.G., Sharapov N.A., Mikhalev U.G., Kondrat'ev V.V. and Karlina A.I. Quality of anode. Overview of Problems and Some Methods of their Solution Part 1. Coal Foam in an aluminum electrolyzer // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. T. 12. № 19. C. 8976-8985.

25. Shahrai S.G., Sharypov N.A., Polyakov P.V., Kondratiev V.V., Karlina A.I. Quality of anode. overview of problems and some methods of their solution Part 2. Improving the quality of the anode // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. T. 12. № 21. C. 11268-11278.

References

1. Kuz'min M.P., Shestakov S.S., Kuz'mina M.Ju., Zhuravljova A.S. Innovative Development of Irkutsk Region Metallurgical Complex // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2015. № 5 (100). P. 236–240.

2. Larionov L.M., Kondratiev V.V., Kuz'min M.P. The ways to utilize aluminum production carbon-containing wastes. // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2015. № 5 (100). P. 236–240.

3. Nozhko S.I., Turusov S.N., Nikitin V.I. Technological approach to managing the power parameters of electrolyzer // Tsvetnyye metally. 2006. № 8. P. 85-87.

4. Nozhko S.I. A method for determining the productivity of electrolyzers for aluminum production // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2011. T. 52. № 1. P. 16-18.

5. Nozhko S.I., Blashkov A.A. Perspectives of capacity increasing of aluminium electrolyzers// Tsvetnyye metally. 2012. № 10. P. 65-68.

6. Zel'berg B.I., Ragozin L.V., Barantsev A.G., Yasevich O.I., Grigor'yev V.G., Baranov A.N., Kondrat'yev V.V. Metallurgist Directory. Production of aluminum and its alloys/ Irkutsk. Publishing ISTU. 2015. 764p.

7. El Hani Bouhabila, Erling Næss, Victoria Kielland Einejord and Kolbeinn Kristjansson. An innovative compact heat exchanger solution for aluminum off-gas cooling and heat recovery // Light Metals. 2013. P. 793–797.

8. Anders Sørhuus, Geir Wedde. Pot gas heat recovery and emission control // Light Metals. 2009. P. 281– 286.

9. M. Bonnier, S. Massambi, J-M. Jolas, G. Girault, V. Demetriou, D. Wheaton. Development of a System Basedon Water Atomization to Decrease, Prior to Treatment, the Temperature of the Gas Emitted from Aluminum Cells // Light Metals 2007. P. 193–197.

10. El Hani Bouhabila, Bernard Cloutier, Thierry Malard, Philippe Martineau, Hugues Vendette. Electrolytic cell gas cooling upstream of treatment center // Light Metals. 2012. P. 545–550.

11. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondratiev V.V., Mazurenko V.V., Sheglov E.L. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases // Metallurgist. 2017. № 9-10. P. 973–977.

12. Antoine de Gromard, Chin Lim, El Hani Bouhabila, Bernard Cloutie, Mathieu Frainais. Development on electrolytic cell gas cooling // Light Metals. 2014. P. 623–628.

13. Anders Sørhuus, Geir Wedde, Ketil Rye, Gaute Nyland. Increased energy efficiency and reduced HF emissions with new heat exchanger // Light Metals. 2010. P. 249–254.

14. Anders K. Sørhuus, Sivert Ose, Bent M. Nilsen. Possible use of 25 mW thermal energy recovered from the potgas at Alba line 4 // Light Metals. 2015. P. 631–636.

15. Sysoev I.A., Kondratiev V.V., Gorovoi V.O., Zimina T.I. Laboratory tests of shell and tube heat exchanger// Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2016. T. 20. № 12. P. 155–164.

16. Kondrat'ev V., Govorkov A., Lavrent'eva M., Sysoev I., Karlina A.I. Description of the heat exchanger unit construction, created in IRNITU // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. T. 11. № 19. P. 9979-9983.

17. Ershov V.A., Govorkov A.S., Ivanov N.N. Development of scientific bases of productivity increase and im-provement of operational parameters of experimental heat exchanger under different operation modes // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. 2017. № 3 (55). P. 36-42.

18. Sysoev I.A., Kondratiev V.V., Gorovoy V.O., Zimina T.I., Karlina A.I. Development and testing of a prototype device for converting heat into electrical energy (HEE) // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2017. № 7. P. 132-142.

19. Shakhray S.G., Kondrat'yev V.V., Belyanin A.V., Nikolayev V.N., Gron' V.A. Cooling of the anode gas in the electrolytic aluminum heat exchangers heating alumina // Metallurg. 2015. № 2. P. 29-32.

20. Shakhrai S.G., Skuratov A.P., Kondratiev V.V., Ershov V.A., Karlina A.I. Justification of the possibility of heating alumina by aluminum electrolyzer anode gases warmth // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2016. № 3. P. 131–138.

21. Shakhray S.G., Scuratov A.P., Kondrat'yev V.V., Ershov V.A. Utilization of heat the anode gas aluminum electrolyzer // Tsvetnyye metally. 2016. № 2. P. 52-56.

22. Shakhray S.G., Nemchinova N.V., Kondrat'yev V.V., Mazurenko V.V., Shcheglov E.L. Technical solutions to cool the exhaust gases of aluminum electrolyzer // Metallurg. 2016. № 9. P. 73–77.

23. Kondratev V.V., Ershov V.A.,, Shakhrai S.G., Ivanov N.A. Preliminary heating of calcined anode // Tsvetnyye metally. 2015. № 1. P. 54–56.

24. Shahrai S.G., Sharapov N.A., Mikhalev U.G., Kondrat'ev V.V. and Karlina A.I. Quality of anode. Overview of Problems and Some Methods of their Solution Part 1. Coal Foam in an aluminum electrolyzer // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. T. 12. № 19. P. 8976-8985.

25. Shahrai S.G., Sharypov N.A., Polyakov P.V., Kondratiev V.V., Karlina A.I. Quality of anode. overview of problems and some methods of their solution Part 2. Improving the quality of the anode // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. T. 12. № 21. P. 11268-11278.