

**Ершов Владимир Александрович,***доцент кафедры автоматизации производственных процессов,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: ershov@istu.edu***Говорков Алексей Сергеевич,***директор технопарка, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: govorkov_as@istu.edu***Иванов Никита Николаевич,***аспирант ФТИ, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: crist2003@mail.ru***V. A. Ershov,***Assoc. Prof., the Subdepartment of Production Process Automation,
Irkutsk National Research Technical University,
e-mail: ershov@istu.edu***A. S. Govorkov,***Director of the science park,
Irkutsk National Research Technical University,
e-mail: govorkov_as@istu.edu***N. N. Ivanov,***Ph.D. student, Physics and Engineering Institute,
Irkutsk National Research Technical University,
e-mail: crist2003@mail.ru***Информация о статье**

Дата поступления: 28 мая 2017 г.

Article info

Received: May 28, 2017

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC BASES OF PRODUCTIVITY INCREASE AND IMPROVEMENT OF OPERATIONAL PARAMETERS OF EXPERIMENTAL HEAT EXCHANGER UNDER DIFFERENT OPERATION MODES**

Аннотация. В данной работе проведены инструментальные измерения и расчеты тепловых и аэродинамических параметров экспериментального теплообменника в различных режимах эксплуатации ГОУ – в межоперационном режиме и режиме моделирования операции замены анодов. Было определено, что падение температуры отходящих газов при межоперационном режиме эксплуатации ГОУ составило 83,7 °С и обеспечило снижение физического объема газов практически на 20 % (до 58732,5 м³/ч), что является значением, удовлетворяющим требованиям Технического задания по обеспечению снижения температуры до уровня не более 140 °С при потоке газов через теплообменник до 75000 м³/ч. Скорость газового потока соответствует проектной величине (>10 м/с) для снижения массы пылевых отложений на элементах конструкции ЭТА. Следует предположить, что после монтажа оборудования автоматической системы, регулирующей подачу теплоносителя, появится возможность управления нагревом теплоносителя для использования воды на технологические нужды и, как следствие, увеличения охлаждения отходящих газов. По результатам проведения исследований по оптимизации функционирования экспериментального теплообменника в различных режимах работы, действующих на ОАО «РУСАЛ Саяногорск», подготовлен Акт корректировки ЭКД экспериментального теплообменного аппарата. Для получения более точных данных о тепловых и аэродинамических характеристиках экспериментального теплообменника и накопления статистических данных необходимо проведение повторных исследований после выхода всех 8 электролизеров на рабочий режим эксплуатации, после монтажа и введения в эксплуатацию всех элементов функциональной автоматики, а также в летний период года.

Ключевые слова: моделирование, теплообменник, электролизер.

Abstract. In this paper, the authors have carried out instrumental measurements and calculations of thermal and aerodynamic parameters of the experimental heat exchanger (EHE) in different operating modes of the gas-cleaning unit: in interoperable mode or simulation of the anodes replacement operation. It has been determined that the drop in temperature of exhaust gases during the interoperable mode of the gas-cleaning unit amounted to 83.7 °C and ensured the reduction of the physical volume of gases by nearly 20 % (up to 58732.5 m³/h), which is a value that meets the requirements of the Technical specifications on ensuring the temperature reduction to not more than 140 °C, with a flow of gases through the heat exchanger up being to 75,000 m³/h. The gas flow rate corresponds to the design value (>10 m/s) to reduce mass of the dust deposits on the elements of the EHE design. It should be assumed that after installation of equipment of automatic system for regulating the flow of coolant, it would become possible to control the coolant heating to use water for process needs and, as a consequence, to increase the cooling of the exhaust gases. According to the results of research on optimization of functioning of the experimental heat exchanger in various operational modes that are in force at JSC "RUSAL Sayanogorsk", the Document on adjustment of the preliminary design documentation for the experimental heat exchanger. To obtain more accurate data on the thermal and aerodynamic characteristics of the experimental heat exchanger and to accumulate the statistical data, it is necessary to conduct repeated studies after all the 8 electrolyzers are in normal operating mode, after installation and commissioning of all the elements of functional automation, as well as in summer.

Keywords: modeling, heat exchanger, electrolyzer.**Введение**

В связи с проблемой нарастающего дефицита электроэнергии в настоящее время ужесточаются требования к энерго- и ресурсосбережению.

При этом на многих промышленных предприятиях технологический процесс связан с выбросами высокотемпературных газов в окружающую среду. Для того чтобы уменьшить затраты на эксплуата-



цию газоочистных установок, целесообразно охладить технологические газы. Цель данной работы – представить результаты инструментальных измерений и расчетов тепловых и аэродинамических параметров экспериментального теплообменника в различных режимах эксплуатации ГОУ, в рамках исследования по разработке кожухотрубчатого теплообменного устройства [1-6].

В последние годы опубликовано немало предложений по оптимизации энергоэффективности производства алюминия [7-39].

В рамках выполнения предыдущего этапа работ по проекту 02.G25.31.0181 «Разработка сверхмощной энергоэффективной технологии получения алюминия РА-550» была разработана ЭКД и изготовлена конструкция экспериментального теплообменного аппарата. Впоследствии, для проведения предварительных и приемочных испытаний теплообменник был транспортирован в республику Хакасия, г. Саяногорск на площадку опытно-промышленного корпуса электролиза ООО «РУСАЛ Саяногорск». Монтаж произведен в соответствии со сборочно-монтажными чертежами и руководством по эксплуатации экспериментального теплообменного аппарата.

Постановка и решение задачи

Исследования эксплуатационных параметров экспериментального теплообменника при различных режимах работы газоочистки проводились при температуре окружающего воздуха 4 °С. Атмосферное давление при замерах составляло 98,1 кПа. Приточные проемы в корпусе электролиза и щиты на аэрационном фанаре были открыты полностью.

Следует отметить, что на момент проведения исследований произведен пуск и выход на рабочий режим 5 из 8 электролизеров РА-550.

Исследования по оптимизации функционирования ЭТА проводили при разных объемах газоотсоса в два этапа - в межоперационном режиме эксплуатации ГОУ и режиме операции замены анодов.

Система исследований при межоперационном режиме эксплуатации газоочистки проводилась в следующей последовательности:

- направление потока электролизных газов посредством регулируемой заслонки из обводного газохода в газоход ЭТА;
- стабилизация температуры и аэродинамики потока;
- подача охлаждающей воды в трубопровод ЭТА;

- стабилизация режима теплообмена между газом и теплоносителем;
- фиксирование результатов испытаний.

Для проведения исследований функционирования ЭТА в условиях моделирования операции замены анодов производили увеличение объемов газоотсоса на 40 % от базового значения. При этом исследования проводились по схожему с предыдущим вариантом порядку:

- перевод дымососов на режим «операция замены анодов»;
- стабилизация температуры и аэродинамики потока;
- подача охлаждающей воды в трубопровод ЭТА;
- стабилизация режима теплообмена между газом и теплоносителем;
- фиксирование результатов испытаний.

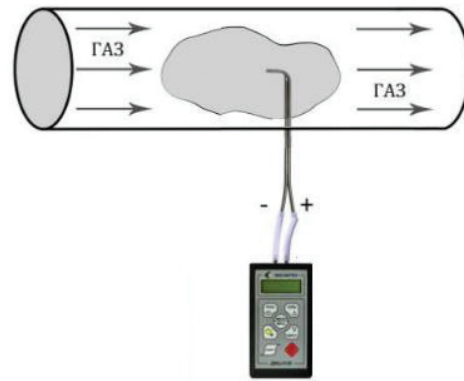


Рис. 1. Схема подключения пневмометрической трубки «НИОГАЗ» и дифференциального манометра цифрового ДМЦ-01



Рис. 2. Термометр цифровой «ТК-5.04» с погружной и контактной термопарой

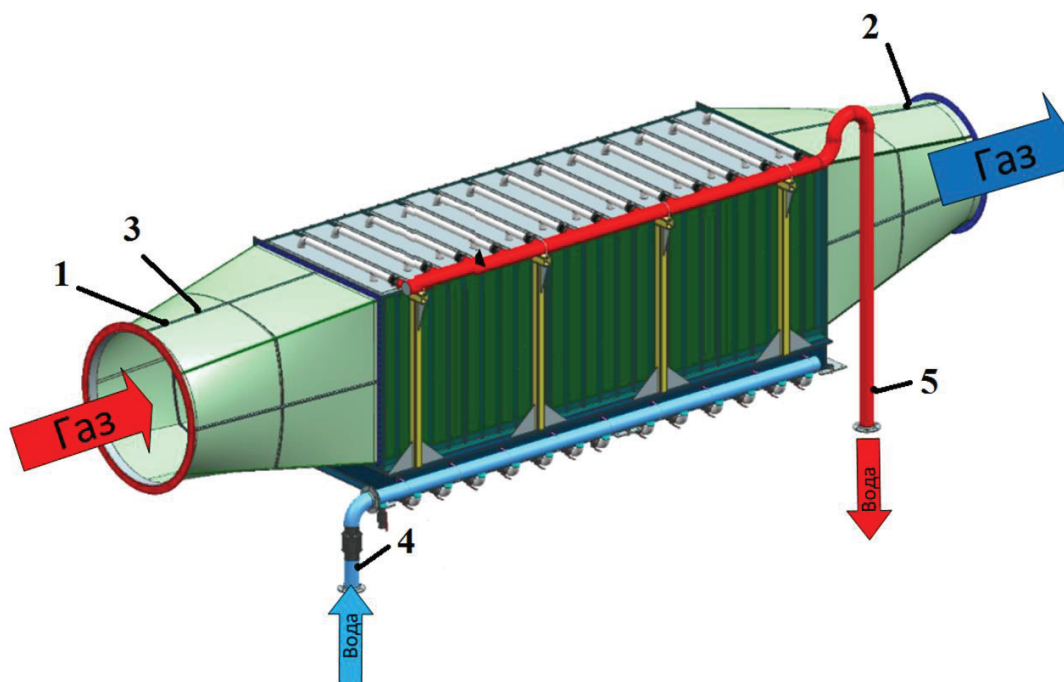


Рис. 3. Схема размещения точек замера тепловых и аэродинамических параметров

Инструментальные замеры аэродинамических характеристик газоздушных потоков произведены в соответствии с ГОСТ 17.2.4.06-90 «Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения» с помощью поверенных приборов: пневмометрической трубки конструкции «НИОГАЗ» и дифференциального манометра цифрового ДМЦ-01 (рис. 1), а также цифрового термометра «ТК-5.01М» с погружными и контактными термопарами (рис. 2).

Измерение аэродинамических параметров электролизных газов, а также температуры охлаждающей жидкости производились на входе и, соответственно, на выходе из ЭТА, в местах размещения соответствующих датчиков функциональной автоматической системы, как это показано на рис. 3

Цифрами на рис. 3 обозначены: позиции 1, 2 – расположение точки замера температур газового потока на входе и выходе из ЭТА; позиция 3 – расположение точки замера динамического давления газового потока; позиции 4, 5 – расположение точки замера температур теплоносителя на входе и выходе из ЭТА.

В результате инструментальных исследований и с использованием расчетных формул, приведенных ниже, определялись аэродинамические параметры газов до и, соответственно, после охлаждения:

- плотность газовой среды при рабочих условиях;

- скорость движения газового потока на участке замера;
- расход газа при рабочих условиях;
- расход газа при нормальных условиях.

Плотность газовой среды при рабочих условиях:

$$\gamma_p = \gamma_0 \cdot \frac{273}{760} \cdot \frac{(B_{атм} \pm P_{ст})}{(273 + T_z)}, \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

где $\gamma_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при нормальных условиях;

$B_{атм}$ – барометрическое давление на момент проведения замеров, бар;

$P_{ст}$ – статическое давление (разряжение) в газоходе, бар;

T_z – температура газовой среды, °С.

Скорость движения газа на участке замера:

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot P_d}{\gamma_p}}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

P_d – динамический напор газа на участке замера.

Расход газа на участке замера при рабочих условиях:

$$Q_p = w \cdot S \cdot 3600, \text{ м}^3/\text{час}, \quad (3)$$

где S – площадь поперечного сечения газохода на участке замера, м^2 .

Расход газа на участке замера при нормальных условиях:

$$Q_0 = \frac{273}{760} \cdot \frac{(Bmm - P_{cm})}{(273 + T_c)} \cdot Q_p, \text{ нм}^3/\text{час}. \quad (4)$$

Результаты инструментальных измерений и расчетов при межоперационном режиме работы

газоочистки приведены в табл. 1.

Результаты инструментальных измерений и расчетов при режиме моделирования операции замены анодов в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

Результаты исследований при межоперационном периоде

Расход газа р. у., м ³ /час	Расход газа н. у., м ³ /час	Скорость газа, м/сек	Температура газа, °С (вход)	Температура газа, °С (выход)	Температура теплоносителя, °С (вход)	Температура теплоносителя, °С (выход)
72961	44631	14,7	156,2	72,5	8,2	31,7

Т а б л и ц а 2

Результаты исследований при режиме моделирования операции замены анодов

Расход газа р. у., м ³ /час	Расход газа н. у., м ³ /час	Скорость газа, м/сек	Температура газа, °С (вход)	Температура газа, °С (выход)	Температура теплоносителя, °С (вход)	Температура теплоносителя, °С (выход)
95576	61785	18,9	132,1	62,0	8,7	28,3

Из табл. 1 и 2 следует, что снижение температуры отходящих газов при межоперационном режиме эксплуатации ГОУ составило 83,7 °С, а в режиме моделирования операции замены анодов 70,1 °С, что является значением, удовлетворяющим требованиям Технического задания по обеспечению снижения температуры до уровня не более 140 °С при потоке газов через теплообменник до 75000 м³/ч. Скорость газового потока соответствует проектной величине (>10 м/с) для снижения пылевых отложений на элементах конструкции ЭТА.

Измерения показали, что нагрев теплоносителя при межоперационном режиме эксплуатации ГОУ составил 23,5 °С, а в режиме моделирования операции замены анодов 19,6 °С. В связи с тем, что на момент проведения испытаний в трубопроводе ЭТА не был установлен магнитно-индукционный расходомер, расход теплоносителя не был измерен.

Заключение и обсуждение результатов исследований

Проведены инструментальные измерения и расчеты тепловых и аэродинамических параметров экспериментального теплообменника в различных режимах эксплуатации ГОУ - в межоперационном режиме и режиме моделирования операции замены анодов.

Было определено, что падение температуры отходящих газов при межоперационном режиме эксплуатации ГОУ составило 83,7 °С и обеспечило снижение физического объема газов практически на 20 % (до 58732,5 м³/ч), что является значением, удовлетворяющим требованиям Технического задания по обеспечению снижения температуры до уровня не более 140°С при потоке газов через теплообменник до 75000 м³/ч.

Скорость газового потока соответствует проектной величине (>10 м/с) для снижения массы пылевых отложений на элементах конструкции ЭТА.

Следует предположить, что после монтажа оборудования автоматической системы, регулирующей подачу теплоносителя, появится возможность управления нагревом теплоносителя для использования воды на технологические нужды и, как следствие, увеличения охлаждения отходящих газов.

По результатам проведения исследований по оптимизации функционирования экспериментального теплообменника в различных режимах работы, действующих на ОАО «РУСАЛ Саяногорск», подготовлен Акт корректировки ЭКД экспериментального теплообменного аппарата.

Для получения более точных данных о тепловых и аэродинамических характеристиках экспериментального теплообменника и накопления статистических данных необходимо проведение повторных исследований после выхода всех 8 электролизеров на рабочий режим эксплуатации, после монтажа и введения в эксплуатацию всех элементов функциональной автоматики, а также в летний период года.

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, утвержденной постановлением Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лабораторные испытания кожухотрубчатого теплообменного устройства / И.А. Сысоев и др. // Вестник ИрГТУ. 2016. Т. 20. № 12 (119). С. 155–164.
2. Кондратьев В.В., Николаев В.Н., Карлина А.И. Моделирование и лабораторные испытания высокоэффективного теплообменника с низким статистическим сопротивлением // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 80–83.
3. Description of the heat exchanger unit construction, created in IRNITU / V. Kondrat'ev et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 19. С. 9979–9983.
4. Разработка способа управления энергетическим режимом электролизеров для производства алюминия / И.А. Сысоев и др. // Цветные металлы. 2016. № 5 (881). С. 38–43.
5. Шахрай С.Г., Кондратьев В.В., Белянин А.В. Энерго- и ресурсосбережение в производстве алюминия. Иркутск : Издательство ИрГТУ. 2014. 146 с.
6. Исследования параметров термоэлектрических генераторов изготовленных по толстопленочной технологии / И.Ю. Шелехов и др. // Metallurgia: технологии, инновации, качество / под общ. ред. Е.В. Протопопова. 2015. С. 373–377.
7. Кондратьев В.В., Ржечицкий Э.П. Пути решения проблемы отложений в аппаратах глиноземного производства // Вестник ИрГТУ. 2011. № 5 (52). С. 120–125.
8. Охлаждение анодных газов алюминиевых электролизеров в теплообменниках нагрева глинозема / С.Г. Шахрай и др. // Metallurg. 2015. № 2. С. 29–32.
9. Дошлов О.И., Кондратьев В.В., Угапьев А.А. Применение тяжелой смолы пиролиза в качестве компонента связующего для производства анодной массы // Metallurg. 2015. № 5. С. 72–77.
10. Предварительный нагрев обожженного анода / В.В. Кондратьев и др. // Цветные металлы. 2015. № 1 (865). С. 54–56.
11. Снижение энергозатрат в системах газоудаления и газоочистки алюминиевых электролизеров с обожженными анодами / В.В. Кондратьев и др. // Современное состояние и перспективы улучшения экологии и безопасности жизнедеятельности Байкальского региона «Белые ночи-2016». Иркутск, 2016. Т. 1. С. 209–218.
12. Белянин А.В., Карлина А.И. Некоторые прикладные аспекты повышения энергетической эффективности алюминиевых электролизеров // Проспект Свободный-2016. Красноярск, 2016. С. 4–9.
13. Разработка мероприятий охлаждения газоходных сетей корпусов электролиза / А.В. Белянин и др. // Проспект Свободный-2016. Красноярск, 2016. С. 10–14.
14. Компаундирование как перспективная технология производства альтернативных связующих материалов для производства анодной массы / О.И. Дошлов и др. // Кокс и химия. 2015. № 1. С. 34–41.
15. Повышение энергетической эффективности производства алюминия снижением газонапыленности электролита / С.Г. Шахрай и др. // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1 (25). С. 103–107.
16. Повышение эффективности газозащиты в рабочей зоне электролизеров с предварительно обожженными анодами с силой тока свыше 300 КА / С.Г. Шахрай и др. // Экология и промышленность России. 2012. № 7. С. 8–11.
17. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production / V.V. Kondrat'ev et al. // Metallurgist. 2016. Т. 60, № 7-8. С. 877–882.
18. Исследование проблемы образования отложений в аппаратах глиноземного производства и пути ее решения / М.Д. Николаев и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2015. Т. 1. С. 198–208.
19. Оптимизация конструкции теплообменных элементов при проектировании теплообменного устройства / И.А. Сысоев и др. // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4 (32). С. 118–124.
20. Кузьмин М.П., Кузьмина М.Ю. Повышение эффективности деятельности Иркутского алюминиевого завода за счёт увеличения производства ронделей // Вестник ИрГТУ. 2013. № 2 (73). С. 193–197.
21. Кузьмин М.П. Определение устойчивости интерметаллидов в техническом алюминии // Вестник ИрГТУ. 2013. № 8 (79). С. 138–143.
22. Kuz'min M.P., Begunov A.I. Thermodynamic stability of intermetallic compounds in technical aluminum // Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii 2014. Т. 7. № 2. Р. 132–137.
23. Инновационное развитие металлургического комплекса Иркутской области / М.П. Кузьмин и др. // Вестник ИрГТУ. 2015. № 5 (100). С. 236–240.
24. Николаев В.Н., Кондратьев В.В. Технологическое решение интенсификации процессов газоудаления и газоочистки алюминиевого производства // Вестник ИрГТУ. 2012. № 7 (66). С. 142–147.
25. Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера / С.Г. Шахрай и др. // Цветные металлы. 2016. № 2 (878). С. 52–56.
26. Анализ влияния повышения силы и плотности анодного тока на показатели работы электролизера Содерберга / В.В. Кондратьев и др. // Цветные металлы -2011. Красноярск, 2011. С. 185–192.
27. Ржечицкий Э.П., Кондратьев В.В., Тенигин А.Ю. Технологические решения по охране окружающей среды при производстве алюминия. Иркутск : Издательство ИрГТУ. 2013. 159 с.
28. Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Ребрик И.И. Совершенствование систем колокольного газоотсоса на мощных электролизерах Содерберга // Красноярск : ИПК СФУ, 2010. 146 с.
29. Техничко-экологические и правовые аспекты производства алюминия / В.В. Кондратьев и др. СПб. : Изд-во МАНЭБ, 2011. 224 с.
30. Влияние коэффициентов фильтрации на достоверность прогноза изменения напряжения алюминиевого электролизера / В.А. Ершов и др. // Вестник ИрГТУ. 2010. № 5 (45). С. 184–187.
31. Сысоев И.А. Опыт управления энергетическим режимом электролизеров с обожженными анодами (ОД) На силу тока 300 КА // Вестник ИрГТУ. 2007. Т. 2, № 2 (30). С. 23–26.
32. Сысоев И.А. Исследование энергетического состояния и разработка способа управления тепловым режимом электроли-



зеров большой единичной мощности : дис. ... канд. техн. наук / И.А. Сысоев ; Иркутский национальный исследовательский технический университет. Иркутск, 2007.

33. Справочник металлурга. Производство алюминия и сплавов на его основе / Б.И. Зельберг и др. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2015. 764 с.

34. Наноструктуры и алюминиевая промышленность / В.В. Кондратьев и др. // Вестник ИрГТУ. 2015. № 8. С. 77–85.

35. Обоснование возможности нагрева глинозема теплом анодных газов алюминиевого электролизера / С.Г. Шахрай и др. // Вестник ИрГТУ. 2016. № 3 (110). С. 131–138.

36. Сысоев И.А., Николаев В.Н. Моделирование и оценка эффективности двухконтурной системы газоотвода // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3 (47). С. 104–110.

37. Сысоев И.А. Управление и контроль энергорежима электролизеров для производства алюминия // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 84–87.

38. Управление тепловым процессом электролиза посредством определения химического состава электролита / И.А. Сысоев и др. // III Респ. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов алюминиевой и электродной промышленности : тезисы докл. Иркутск, 2005. С. 54–55.

39. Сысоев И.А., Пинаев А.А., Николаев В.Н. Аппаратурно-технологическая схема и автоматизированный контроль параметров процесса эвакуации газов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 98–103.

REFERENCES

1. Sysoev I.A., et al. Laboratornye ispytaniya kozhukhotrubchatogo teploobmennogo ustroystva [Laboratory tests of shell-and-tube heat exchanger device]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2016, Vol. 20, No. 12 (119), pp. 155–164.

2. Kondrat'ev V.V., Nikolaev V.N., Karlina A.I. Modelirovanie i laboratornye ispytaniya vysokoeffektivnogo teploobmennika s nizkim statisticheskim soprotivleniem [Modeling and laboratory tests of a high-efficiency heat exchanger with low statistical resistance]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2015, No. 2 (46), pp. 80–83.

3. Kondrat'ev V. et al. Description of the heat exchanger unit construction, created in IRNITU. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, Vol. 11, No. 19, pp. 9979–9983.

4. Sysoev I.A. et al. Razrabotka sposoba upravleniya energeticheskim rezhimom elektrolizerov dlya proizvodstva alyuminiya [Development of a method for controlling the energy regime of electrolyzers for the production of aluminum]. *Tsvetnye metally [Non-ferrous metals]*, 2016, No. 5 (881), pp. 38–43.

5. Shakhrai S.G., Kondrat'ev V.V., Belyanin A.V. Energo- i resursosberezhenie v proizvodstve alyuminiya [Energy and resource saving in aluminum production]. Irkutsk: ISTU Publ., 2014, 146 p.

6. Shelekhov I.Yu. et al. Issledovaniya parametrov termoelektricheskikh generatorov izgotovlennykh po tolstoplenochnoi tekhnologii [Investigations of the parameters of thermoelectric generators manufactured by a thick-film technology]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo [Metallurgy: technologies, innovations, quality]*. In Protopopova E.V. (ed.), 2015, pp. 373–377.

7. Kondrat'ev V.V., Rzhchitskii E.P. Puti resheniya problemy otlozhenii v apparatakh glinozemnogo proizvodstva [Ways to solve the problem of deposits in the apparatus of alumina production]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2011, No. 5 (52), pp. 120–125.

8. Shakhrai S.G. et al. Okhlazhdenie anodnykh gazov alyuminievykh elektrolizerov v teploobmennikakh nagreva glinozema [Cooling of anode gases of aluminum electrolyzers in heat exchangers of alumina heating]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2015, No. 2, pp. 29–32.

9. Doshlov O.I., Kondrat'ev V.V., Ugap'ev A.A. Primenenie tyazheloi smoly piroliza v kachestve komponenta svyazuyushchego dlya proizvodstva anodnoi massy [The use of a heavy pyrolysis resin as a component of a binder for the production of an anode mass]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2015, No. 5, pp. 72–77.

10. Kondrat'ev V.V. et al. Predvaritel'nyi nagrev obozhzhennogo anoda [Preheating the baked anode]. *Tsvetnye metally [Non-ferrous metals]*, 2015, No. 1 (865), pp. 54–56.

11. Kondrat'ev V.V. et al. Snizhenie energozatrat v sistemakh gazoudaleniya i gazoочистki alyuminievykh elektrolizerov s obozhzhennymi anodami [Reduction of energy costs in gas removal and gas cleaning systems of aluminum electrolyzers with baked anode]. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy uluchsheniya ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti Baikalskogo regiona «Belye nochi-2016» [Current state and prospects for improving the ecology and life safety of the Baikal region "White Nights-2016"]*. Irkutsk, 2016, Vol. 1, pp. 209–218.

12. Belyanin A.V., Karlina A.I. Nekotorye prikladnye aspekty povysheniya energeticheskoi effektivnosti alyuminievykh elektrolizerov [Some applied aspects of improving the energy efficiency of aluminum electrolyzers]. *Prospekt Svobodnyi-2016 [Svobodnyi Avenue-2016]*. Krasnoyarsk, 2016, pp. 4–9.

13. Belyanin A.V. et al. Razrabotka meropriyatiy okhlazhdeniya gazokhodnykh setei korpusov elektroliza [Development of measures for cooling the gas-flow networks of electrolysis blocks]. *Prospekt Svobodnyi-2016 [Svobodnyi Avenue-2016]*. Krasnoyarsk, 2016, pp. 10–14.

14. Doshlov O.I. et al. Kompaundirovanie kak perspektivnaya tekhnologiya proizvodstva al'ternativnykh svyazuyushchikh materialov dlya proizvodstva anodnoi massy [Compounding as a promising technology for the production of alternative binding materials for the production of anode mass]. *Koks i khimiya [Coke and Chemistry]*, 2015, No. 1, pp. 34–41.

15. Shakhrai S.G. et al. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti proizvodstva alyuminiya snizheniem gazonapylennosti elektrolita [Increasing the energy efficiency of aluminum production by reducing the gas-dust content of the electrolyte]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2015, No. 1 (25), pp. 103–107.

16. Shakhrai S.G. et al. Povyshenie effektivnosti gazoulavlivaniya v rabochei zone elektrolizerov s predvaritel'no obozhzhennymi anodami s siloi toka svyshe 300 kA [Improving the efficiency of gas collection in the working zone of electrolyzers with prebaked anodes with a current strength of over 300 kA]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and industry of Russia]*, 2012, No. 7, pp. 8–11.

17. Kondrat'ev V.V. et al. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production. *Metallurgist*, 2016, Vol. 60, No. 7-8, pp. 877–882.

18. Nikolaev M.D. et al. Issledovanie problemy obrazovaniya otlozhenii v apparatakh glinozemnogo proizvodstva i puti ee resheniya [Investigation of the problem of formation of deposits in the apparatuses of alumina production and ways to solve it]. *Transportnaya*



infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region], 2015, Vol. 1, pp. 198–208.

19. Sysoev I.A. et al. Optimizatsiya konstruktivnykh elementov pri proektirovaniy teplotnoobmennogo ustroystva [Optimization of the design of heat exchange elements in the design of a heat exchanger device]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2016, No. 4 (32), pp. 118–124.

20. Kuz'min M.P., Kuz'mina M.Yu. Povyshenie effektivnosti deyatelnosti Irkutskogo alyuminievogo zavoda za schet uvelicheniya proizvodstva rondelei [Increase of efficiency of activity of Irkutsk aluminum plant due to increase in production of slugs]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2013, No. 2 (73), pp. 193–197.

21. Kuz'min M.P. Opredelenie ustoychivosti intermetallidov v tekhnicheskoy alyuminiy [Determination of the stability of intermetallic compounds in technical aluminum]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2013, No. 8 (79), pp. 138–143.

22. Kuz'min M.P., Begunov A.I. Thermodynamic stability of intermetallic compounds in technical aluminum. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii [Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies]*, 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 132–137.

23. Kuz'min M.P. et al. Innovatsionnoye razvitiye metallurgicheskogo kompleksa Irkutskoy oblasti [Innovative development of the metallurgical complex of the Irkutsk region]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2015, No. 5 (100), p. 236–240.

24. Nikolaev V.N., Kondrat'ev V.V. Tekhnologicheskoye resheniye intensivatsii protsessov gazoudaleniya i gazoochistki alyuminievogo proizvodstva [Technological solution of intensification of processes of gas removal and gas purification of aluminum production]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2012, No. 7 (66), p. 142–147.

25. Shakhrai S.G. et al. Utilizatsiya teploty anodnykh gazov alyuminievogo elektrolizera [Utilization of heat of anode gases of an aluminum electrolyzer]. *Tsvetnye metally [Non-ferrous metals]*, 2016, No. 2 (878), pp. 52–56.

26. Kondrat'ev V.V. et al. Analiz vliyaniya povysheniya sily i plotnosti anodnogo toka na pokazateli raboty elektrolizera Soderberga [Analysis of the effect of increasing the strength and density of the anode current on the performance of Soderberg electrolyzer]. *Tsvetnye metally-2011 [Non-ferrous metals-2011]*, Krasnoyarsk, 2011, pp. 185–192.

27. Rzhchitskiy E.P., Kondrat'ev V.V., Tenigin A.Yu. Tekhnologicheskoye resheniye po okhrane okruzhayushchei sredy pri proizvodstve alyuminiya [Rzhchitskiy EP, Kondrat'ev VV, Tenigin A.Yu. Technological solutions for environmental protection in the production of aluminum]. Irkutsk: ISTU Publ., 2013, 159 p.

28. Shakhrai S.G., Korostovenko V.V., Rebrik I.I. Sovershenstvovaniye sistem kolokol'nogo gazootsosa na moshchnykh elektrolizerakh Soderberga [Perfection of systems of a bell-shaped gas pump on powerful Soderberg electrolyzers]. Krasnoyarsk: IPK SFU Publ., 2010, 146 p.

29. Kondrat'ev V.V. et al. Tekhniko-ekologicheskoye i pravovoye aspekty proizvodstva alyuminiya [Technical, environmental and legal aspects of aluminum production]. St. Petersburg: MANEB Publ., 2011, 224 p.

30. Ershov V.A. et al. Vliyaniye koeffitsientov fil'tratsii na dostovernost' prognoza izmeneniya napryazheniya alyuminievogo elektrolizera [Influence of the filtration coefficients on the reliability of the prediction of the voltage change of an aluminum electrolyzer]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2010, No. 5 (45), pp. 184–187.

31. Sysoev I.A. Opyt upravleniya energeticheskim rezhimom elektrolizerov s obozhzhennymi anodami (OD) na silu toka 300 kA [Experience in controlling the energy regime of electrolyzers with baked anodes (OD) at a current strength of 300 kA]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2007, Vol. 2, No. 2 (30), pp. 23–26.

32. Sysoev I.A. Issledovaniye energeticheskogo sostoyaniya i razrabotka sposoba upravleniya teplovym rezhimom elektrolizerov bol'shoi edinichnoi moshchnosti : dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of the energy state and development of a method for controlling the thermal regime of electrolyzers of a large unit capacity. Ph.D (Engineering) thesis]. Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 2007.

33. Zel'berg B.I. et al. Spravochnik metallurga. Proizvodstvo alyuminiya i splavov na ego osnove [Handbook of metallurgists. Production of aluminum and alloys based on it]. Irkutsk : ISTU Publ., 2015, 764 p.

34. Kondrat'ev V.V. et al. Nanostruktury i alyuminievaya promyshlennost' [Nanostructures and aluminum industry]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2015, No. 8, pp. 77–85.

35. Shakhrai S.G. et al. Obosnovaniye vozmozhnosti nagreva glinozema teplotom anodnykh gazov alyuminievogo elektrolizera [Substantiation of the possibility of heating alumina by the heat of anode gases of an aluminum cell]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2016, No. 3 (110), pp. 131–138.

36. Sysoev I.A., Nikolaev V.N. Modelirovaniye i otsenka effektivnosti dvukhkol'turnoy sistemy gazootvoda [Modeling and evaluation of the efficiency of a two-circuit gas extraction system]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2015, No. 3 (47), pp. 104–110.

37. Sysoev I.A. Upravleniye i kontrol' energorezhima elektrolizerov dlya proizvodstva alyuminiya [Control and monitoring of the energy regime of electrolyzers for the production of aluminum]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2014, No. 4 (24), pp. 84–87.

38. Sysoev I.A. et al. Upravleniye teplovym protsessom elektroliza posredstvom opredeleniya khimicheskogo sostava elektrolita [Control of the thermal process of electrolysis by determining the chemical composition of the electrolyte]. *III Resp. nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov alyuminievoy i elektrodnoy promyshlennosti : tezisy dokl. [III Republican Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Aluminum and Electrode Industry: Abstracts of Reports]*. Irkutsk, 2005, pp. 54–55.

39. Sysoev I.A., Pinaev A.A., Nikolaev V.N. Apparaturno-tekhnologicheskaya skhema i avtomatizirovannyy kontrol' parametrov protsessa evakuatsii gazov [Instrument-technological scheme and automated control of parameters of disposal of gases]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2016, No. 1 (49), pp. 98–103.