

Оптимизация конструкции теплообменных элементов при проектировании теплообменного устройства

И.А. Сысоев^a, В.В. Кондратьев^b, И.В. Колмогорцев^c, Е.И. Унагаев^d, Т.И. Зими́на^e

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^a ivansys@istu.edu, ^b kvv@istu.edu, ^c ivk@istu.edu, ^d unagaev@istu.edu, ^e ziminati@istu.edu

Статья поступила 3.11.2016, принята 20.11.2016

Стабильная технология электролиза алюминия при увеличении силы тока требует эффективного отвода тепла от элементов конструкции электролизера, в том числе с отходящими анодными газами. Целесообразность охлаждения технологических газов перед очисткой обусловлена стремлением уменьшить их физические объемы и, как следствие, снизить затраты на эксплуатацию газоочистных установок. Определено, что лучшим решением для повышения энергоэффективности производства является рекуперация тепла при использовании кожухотрубчатого теплообменного аппарата. При этом тепловая энергия может использоваться для предварительного подогрева анодов и глинозема, а также других технологических нужд. В статье представлены результаты математического моделирования проектируемого теплообменника. Оценка эффективности различных типов теплообменных элементов и их компоновки по ряду требуемых параметров позволила определить оптимальные технические решения для создания теплообменного аппарата. Впоследствии планируется проведение опытно-промышленных испытаний теплообменника при различных режимах эксплуатации в условиях действующего производства.

Ключевые слова: электролизер; анодные газы; теплообменный аппарат; моделирование; энергоэффективность.

Optimization of heat-exchange element construction when developing heat-exchanger

I.A. Sysoev^a, V.V. Kondratyev^b, I.V. Kolmogortsev^c, E.I. Unagaev^d, T.I. Zimina^e

Irkutsk National Research Technical University; 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia

^a ivansys@istu.edu, ^b kvv@istu.edu, ^c ivk@istu.edu, ^d unagaev@istu.edu, ^e ziminati@istu.edu

Received 3.11.2016, accepted 20.11.2016

When increasing current intensity in stable technology of aluminum electrolysis, effective heat removal from cell design elements is required, including that with the anode exhaust gas. Feasibility of gas cooling process prior to cleaning is due to the necessity to reduce their volumes and, as a consequence, to reduce the expenditures on gas-cleaning installations. It has been determined that the best solution to improve production efficiency is heat recovery when using a shell and tube heat exchanger. Thermal energy can be used for pre-heating the anodes and alumina as well as for other technological needs. The article presents the results of mathematical modeling of the heat exchanger designed. Assessing the effectiveness of various types of heat exchange elements and their arrangement on a number of required parameters has made it possible to determine optimum technical solutions to create a heat exchanger. Subsequently, pilot tests are being planned for the heat exchanger at various operating conditions in terms of current production.

Key words: electrolyzer; anode gases; heat exchanger; modeling; energy efficiency.

Введение

В настоящее время технология электролиза алюминия непрерывно совершенствуется в сторону увеличения единичной мощности электролизеров. Ведущие алюминиевые компании мира расширяют эксплуатацию мощных электролизеров с обожженными анодами, работающих на силе тока свыше 300 кА, так как их применение позволяет повысить экологическую и экономическую эффективность новых заводов. Тепловой баланс электролизера при производстве алюминия предусматривает отвод значительного количества высокотемпературных технологических газов [1]. Охлаждение газов перед очисткой обусловлено стремлением снизить их физические объемы и необходимо для обеспе-

чения работоспособности и долговечности газоочистного оборудования. При охлаждении электролизных газов происходит уменьшение их физических объемов (рис. 1), что, в свою очередь, уменьшает затраты на эксплуатацию газоочистных установок [2].

Необходимость охлаждения обусловлена тем, что в теплое время года температура газов на входе в газоочистную установку может достигать 190 °С, а рукавные фильтры из полиэстера, применяющиеся в последние годы в технологии газоочистки, имеют предельные эксплуатационные значения 140–145 °С. Применение фильтров из термостойких тканей, выдерживающих температуру свыше 200 °С, приведет к их 3–4-кратному удорожанию [3].

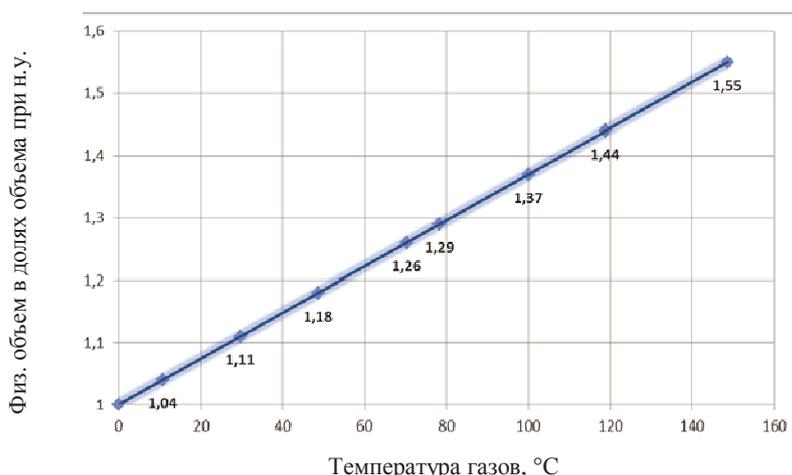


Рис. 1. Зависимость физического объема газов от температуры

В настоящее время предлагаются различные подходы к решению проблемы охлаждения технологических газов: добавление разбавленного воздуха в газоходы посредством регулируемых заслонок [4]; распыление воды в газовом потоке перед входом в газоочистные сооружения [5]; использование стержневых охладителей [6]; оснащение газоходной сети теплоотводящими ребрами, размещенными на наружных поверхностях газоходов [7]. Однако самым эффективным решением с точки зрения обеспечения энергоэффективности процесса утилизации тепла является применение теплообменных аппаратов [6; 8].

В части исполнения теплообменника можно разделить на два конструктивных типа:

- «пожарная труба» [9], где газы циркулируют по трубопроводу внутри трубы большего диаметра, заполненной охлаждающей жидкостью;

- «кожухотрубчатый» [3], в котором происходит циркуляция жидкости внутри труб малого диаметра, установленных перпендикулярно потоку горячих газов.

Авторы [6] отмечают, что кожухотрубчатый дизайн является гораздо более компактным и эффективным с точки зрения теплопередачи и менее дорогостоящим для построения. Именно этот тип теплообменного аппарата был принят за основу для дальнейшего проектирования и представлен в настоящей работе.

Постановка задачи для моделирования теплообменного устройства. Проектируемый теплообменный аппарат предназначен для охлаждения технологических газов с последующей рекуперацией тепла для вторичного использования, например для предварительного нагрева обожженных анодов и глинозема [10; 11].

Сечение рабочей части теплообменника — квадрат со сторонами 2x2 м, длина рабочей части — 6 м, теплообменные элементы (ТЭ) располагаются только в пределах рабочей части. На вход подается сухой воздух с температурой 200 °С, расход 76 000 н.м³/ч. Охлаждение выполняется водой с температурой на входе в теплообменник 20 °С. На выходе требуется получить температуру воздуха не более 100 °С и падение давления не более 100 Па [12].

Для достижения указанных целевых величин применен оптимизационный подход [13] на основе серии численных (виртуальных) экспериментов [14].

Виртуальное моделирование потоков охлаждаемого газа и теплообмена «газ – материал ТЭ – охлаждающая жидкость» выполнено с помощью программного комплекса ANSYS на основе метода контрольных объемов. Подготовка сетки контрольных объемов для расчетной модели выполнялась исходя из геометрических и размерных особенностей моделей для обеспечения достаточного уровня численной сходимости задач.

Решение каждой из задач выполнено в статической постановке итерационно до получения равновесия:

- по массовым расходам газа и жидкости на граничных условиях;

- по потерям и приходу тепла в модель на граничных условиях;

- энергии вязкого сопротивления и турбулентного сопротивления по объему модели, т. е. достижению расчетными моделями полностью равновесного и устойчивого состояния по полям скоростей и расходов моделируемых жидкостей, приносимому и уносимому из моделируемого пространства теплу, а также стабилизации вязкостных и турбулентных показателей.

Приоритетной задачей при разработке теплообменного аппарата является поиск оптимальной конструкции теплообменных элементов, а также их пространственной компоновки для максимальной эффективности теплоотдачи и достижения целевых параметров по температуре и падению давления.

Оптимизация конструкции теплообменных элементов. Оценка эффективности проводилась путем сравнения величин снижения температуры охлаждаемых газов и гидравлического сопротивления полученной конструкции с целевыми параметрами.

Подбор и оптимизация конструкции ТЭ и их компоновки были выполнены в четыре этапа:

- выбор перспективных конструкций на основе существующих рекомендаций по проектированию теплообменных устройств;

- определение требуемых температурных и скоростных параметров проектируемого теплообменника для промышленного использования;

- оптимизация компоновки ТЭ на основе виртуального моделирования;

– подтверждение эффективности использованных решений по выбор конструкции и компоновки ТЭ на основе сравнения величин снижения температуры и гидравлического сопротивления на контрольной виртуальной модели полной длины.

Для выбора наиболее перспективного варианта конструкции теплообменных элементов и их компоновки нами была введена оценочная величина качества:

$$k = \Delta T / \Delta P', \quad (1)$$

где ΔT — снижение температуры потока на теплообменном элементе; $\Delta P'$ — перепад полного давления потока (гидродинамическое сопротивление) рассматриваемой конструкции.

С целью оптимизации конструкции были подготовлены расчетные модели и проведены исследовательские испытания следующих типов теплообменных элементов (рис. 2):

- 1) с дисковыми ребрами на сплюснутых трубах, используемых в лабораторном теплообменнике (*a*);
- 2) с короткими ребрами на плоских трубах (*b*);
- 3) с соединенными сплюснутыми трубами (*в*);
- 4) с перфорированными сплошными ребрами на плоских трубах (*г*);
- 5) с сомкнутыми перфорированными сплошными ребрами с поперечным расположением круглых труб (*д*).

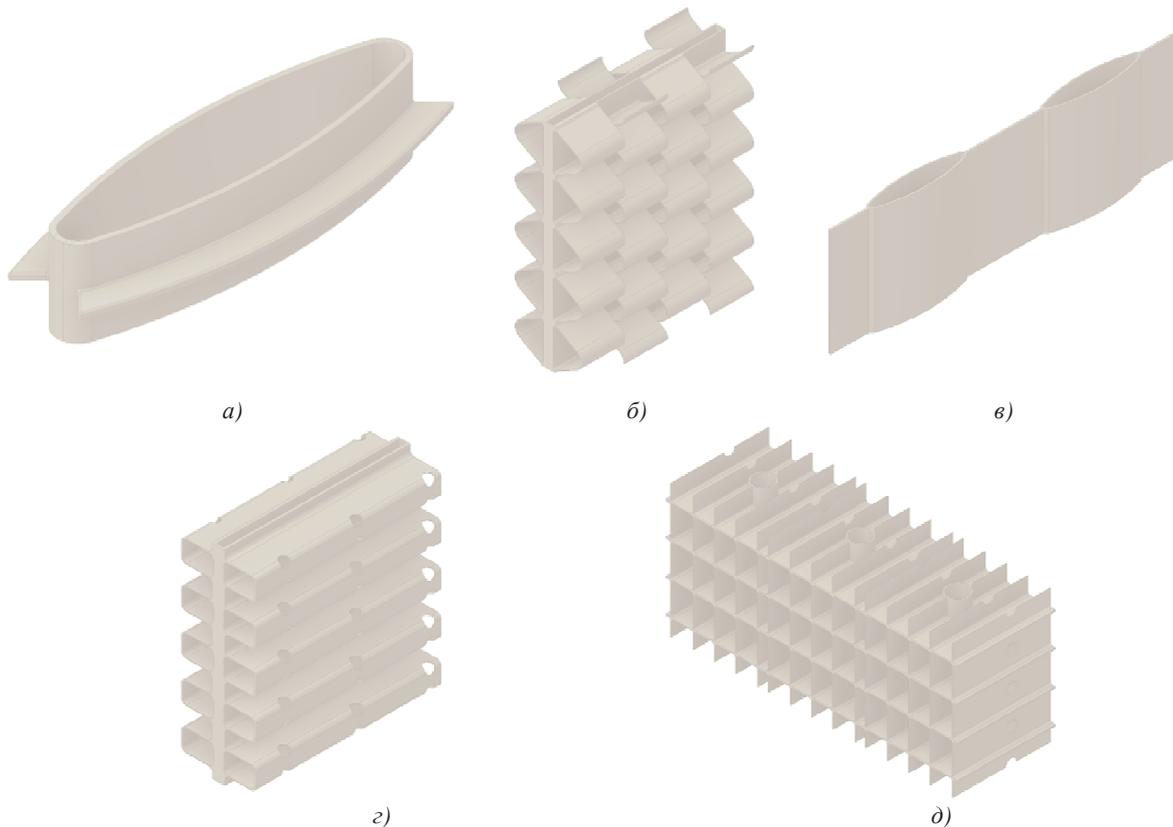


Рис. 2. Конструкция теплообменных элементов

Расчетные модели для представленных вариантов ТЭ представляют собой плотно разбитые минимальные объемы с граничными условиями периодичности. Данное преобразование позволяет получить детальные результаты одновременно с рациональной ресурсоемкостью модели.

Для обеспечения корректного учета теплообмена в пограничном слое, вязкости и сопротивления пограничный слой разрешен с высокой плотностью с большим (10–15) количеством слоев детализации с экспоненциальным убыванием толщины слоев детализации по мере приближения к поверхности стенки ТЭ.

В модели были заложены следующие внешние условия:

1) условие заданного массового расхода через входную поверхность, рассчитанное из соотношения полного расхода через моделируемый теплообменник к площади проходного сечения теплообменника;

2) условия периодической симметрии на всех границах сопряжения (симметрии);

3) условие открытости (отсутствия подпора давлением) на выходной поверхности;

4) условие заданной температуры поступающего в модель газа на входной поверхности;

5) условия заданной температуры охлаждающей жидкости.

Оценка результатов моделирования выполнялась только по достижению расчетными моделями полного баланса и стабилизации по всем перечисленным ранее показателям: массовым расходам газа и жидкости на граничных условиях; расходу и приходу тепла в модель на граничных условиях; энергии вязкого сопротивления и турбулентного сопротивления по объему модели.

Помимо ключевых интересных параметров (снижения температуры потока и сопротивления) для каждой модели были получены (рис. 3 – 5):

1) распределения температур в моделируемой зоне;



Рис. 3. Пример распределения температур (часть модели)



Рис. 4. Пример распределения статической составляющей давления (часть модели)



Рис. 5. Пример распределения скоростей (часть модели)

Полученные распределения не оказывают непосредственного влияния на выбор типа ТЭ, так как ключевым критерием выбора является критерий качества, приведенный выше, однако позволяют оценить и при последующем подборе компоновки оптимизировать размеры и интервалы взаимного расположения ТЭ,

уменьшить объемы застойных зон, препятствующих теплообмену, и другие нежелательные эффекты.

В табл. 1 представлены характеристики для всех принятых к моделированию типов ТЭ.

Таким образом, для дальнейшего выбора компоновок приняты ТЭ с наилучшим показателем качества — ТЭ типа 2, 3 и 4 (табл. 1).

Таблица 1

Результаты моделирования различных типов конструкции теплообменных элементов

Тип ТЭ	Материал ТЭ	Снижение температуры, К	Сопротивление, Па	Качество, К/Па
1	медь	6,8	5,3	1,28
2	медь	23	16	1,44
3	медь	8,5	4	2,10
	сталь	7,4	3,87	1,91
4	медь	24,4	15,7	1,55
	сталь	15,3	13,9	1,10
5	медь	22,5	36,7	0,61

Выбор компоновки теплообменных элементов.

На основании выбранных типов конструкции ТЭ были последовательно рассмотрены варианты их компоновки в теплообменной части с учетом различных вариантов размерного исполнения внутренней части теплообменника (рис. 6) «коридорного» (а) и «шахматного» (б) расположения.

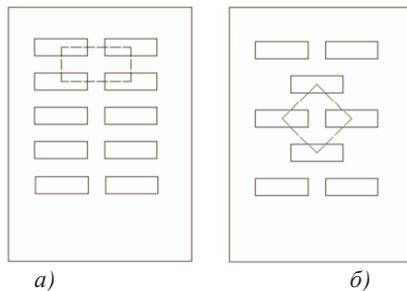


Рис. 6. Варианты компоновки расположения теплообменных элементов

В табл. 2 представлены результаты расчетов выбранных типов ТЭ и их компоновок с учетом различных вариантов размерного исполнения внутренней части теплообменника.

Изменение площади проходного сечения теплообменной части связано с конструктивно-технологической проработкой изготовителем конструкции теплообменника и вспомогательного оборудования, выполненной параллельно с работами по моделированию.

На основании результатов виртуального моделирования и в соответствии с целевыми параметрами проектируемого теплообменника принято решение об использовании теплообменных элементов прямоугольных плоских труб с оребрением в виде перфорированных сплошных ребер с шахматным расположением, изготовленных из меди.

Таблица 2

Результаты моделирования различных типов компоновки теплообменных элементов

Тип ТЭ	Материал ТЭ	Площадь проходного сечения, м ²	Расположение ТЭ	Шаг ТЭ по ширине, мм	Шаг ТЭ по длине, мм	Качество, К/Па
3	медь	4	шахматное	50	200	1,30
	сталь				350	2,60
					350	2,34
2	медь	3		140	270	1,07
3				50	200	0,66
				4	коридорное	140
140	460	0,83				
медь	шахматное	170	920		1,40	
		170	360	1,25		
		3,8		170	720	1,23

Контрольная виртуальная модель. Контрольная расчетная модель представляет собой продольную вырезку из полной геометрической модели в виде продольного канала, соответствующего по размерам и положению периодическому участку всей конструкции (рис. 7).

В модели заложены следующие внешние (граничные) условия:

1) условие заданного массового расхода через входную поверхность, рассчитанное из соотношения полно-

го расхода через моделируемый теплообменник к площади проходного сечения теплообменника;

2) условия периодической симметрии на всех границах сопряжения (симметрии);

3) условие открытости (отсутствия подпора давлением) на выходной поверхности;

4) условие заданной температуры поступающего в модель газа на входной поверхности;

5) условия заданной температуры охлаждающей жидкости.

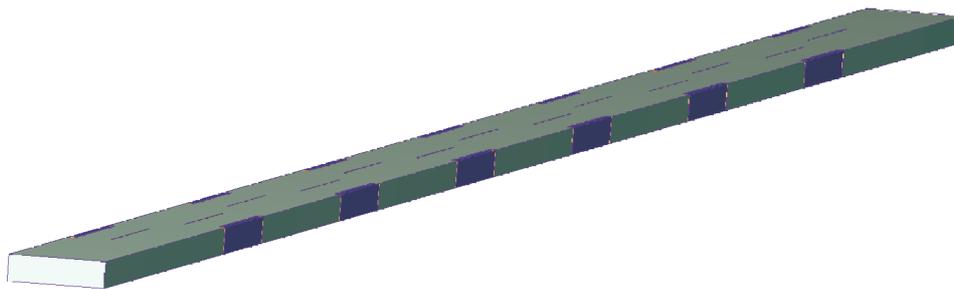


Рис. 7. Геометрическая модель теплообменного аппарата (продольная вырезка)

Аналогично ранее подготовленным моделям оценивались величины статического давления на входной поверхности (потребного давления для обеспечения заданного массового расхода через модель) и усредненной температуры газа на выходной поверхности. Дополнительно были получены данные распределения температур и скоростей потока по объему модели.

В результате обработки результатов виртуального моделирования теплообменного аппарата были получены следующие параметры:

- гидравлическое сопротивление — 20,2 Па;
- температура газов на выходном сечении — 98 °С.

Температура, полученная на выходном сечении, удовлетворяет целевым показателям для проектируемого теплообменника.

Приведенное здесь сопротивление (20,2 Па) — это сопротивление собственно теплообменной части. Сопротивление самого корпуса теплообменника составляет 80–120 Па в зависимости от особенностей конструкции и исполнения его отдельных конструктивных элементов.

Таким образом, от конструкции теплообменника, соответствующей данной модели, можно ожидать следующих показателей при расходе и температуре газов на входе, соответствующих целевым параметрам:

- 1) снижение температуры газа с 200 до 98 °С;
- 2) полное сопротивление порядка 100–140 Па.

Заключение

В статье обоснована актуальность создания кожухотрубчатого теплообменного аппарата для рекуперации тепла технологических газов алюминиевого электролизера. Авторами проведена оценка эффективности теплообменных элементов различных типов конструкции и компоновки по ряду требуемых параметров. Результаты моделирования подтвердили возможность достижения целевых показателей по снижению температуры анодных газов и перепаду давления. На основе полученных данных планируется создание экспериментального теплообменного аппарата для рекуперации тепла и его испытание в промышленных условиях при различных режимах эксплуатации. При этом извлеченное тепло будет направлено на повышение энергоэффективности производства путем использования тепловой энергии для предварительного подогрева

анодов и глинозема. Использование аккумулированной тепловой энергии позволит увеличить технико-экономические показатели заводов по производству алюминия, снизить капитальные затраты при эксплуатации и проектировании газоочистных систем и рационально решить проблему утилизации технологических газов.

Исследования проведены при поддержке гранта президента РФ МК-4752.2016.8 «Исследование и создание комплекса эффективного использования тепловой энергии технологических газов на алюминиевых электролизерах большой единичной мощности».

Литература

1. Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Кондратьев В.В., Ершов В.А. Утилизация теплоты анодных газов алюминий-нииевого электролизера // Цветные металлы. 2016. № 2. С. 52-56.
2. Зельберг Б.И., Рагозин Л.В., Баранцев А.Г., Ясевич О.И., Григорьев В.Г., Баранов А.Н., Кондратьев В.В. Справочник металлурга. Производство алюминия и сплавов на его основе: справочник. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2015. 764 с.
3. Bouhabila H., Næss E., Einejord V.K., Kristjansson K. An innovative compact heat exchanger solution for aluminum off-gas cooling and heat recovery // Light Metals. 2013. P.793-797.
4. Sørhuus A., Wedde G. Pot gas heat recovery and emission control // Light Metals. 2009. P. 281-286.
5. Bonnier M., Massambi S., Jolas J.-M., Girault G., Demetriou V., Wheaton D. Development of a System Based on Water Atomization to Decrease, Prior to Treatment, the Temperature of the Gas Emitted from Aluminum Cells // Light Metals 2007. P. 193-197.
6. Bouhabila E.H., Cloutier B., Malard T., Martineau P., Vendette H. Electrolytic cell gas cooling upstream of treatment center // Light Metals. 2012. P. 545-550.
7. 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.
8. Gromard A., Chin Lim, Bouhabila E.H., Bernard Cloutier B., Frainais M. Development on electrolytic cell gas cooling // Light Metals. 2014. P. 623-628.
9. Sørhuus A., Wedde G., Rye K., Nyland G. Increased energy efficiency and reduced HF emissions with new heat exchanger // Light Metals. 2010. P. 249-254.
10. Шахрай С.Г., Кондратьев В.В., Белянин А.В., Николаев В.Н., Гроть В.А. Охлаждение анодных газов алюминиевых электролизеров в теплообменниках нагрева глинозема // Ме-

таллург. 2015. № 2. С. 29-32.

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

12. 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.

13. Колесников А.В., Мироненко В.В., Чеславская А.А., Шмаков А.К. Оптимизация технологических процессов изготовления деталей из листа средствами виртуального технологического моделирования // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 12. С. 73-77.

14. Чеславская А.А., Мироненко В.В., Колесников А.В., Максименко Н.В., Котов В.В. Выбор рационального метода формообразования детали средствами инженерного анализа с применением САЕ-систем // Металлург. 2014. № 12. С. 24-31.

References

1. Shakhrai S.G., Skuratov A.P., Kondrat'ev V.V., Ershov V.A. Utilization of heat the anode gas aluminum electrolyzer // Non-ferrous Metals. 2016. № 2. P. 52-56.

2. Zel'berg B.I., Ragozin L.V., Barantsev A.G., Yasevich O.I., Grigor'ev V.G., Baranov A.N., Kondrat'ev V.V. Metallurgist Directory. Production of aluminum and its alloys: справочник. Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 2015. 764 p.

3. Bouhabila N., Næss E., Einejord V.K., Kristjansson K. An innovative compact heat exchanger solution for aluminum off-gas cooling and heat recovery // Light Metals. 2013. P.793-797.

4. Sørhuus A., Wedde G. Pot gas heat recovery and emission control // Light Metals. 2009. P. 281-286.

5. Bonnier M., Massambi S., Jolas J-M., Girault G., Demetriou V., Wheaton D. Development of a System Based on Water Atomization to Decrease, Prior to Treatment, the Temperature of

the Gas Emitted from Aluminum Cells // Light Metals 2007. P. 193-197.

6. Bouhabila E.H., Cloutier B., Malard T., Martineau P., Vendette H. Electrolytic cell gas cooling upstream of treatment center // Light Metals. 2012. P. 545-550.

7. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondrat'ev V.V., Mazurenko V.V., Shcheglov E.L. Technical solutions to cool the exhaust gases of aluminum electrolyzer // Metallurg. 2016. № 9. P. 73-77.

8. Gromard A., Chin Lim, Bouhabila E.H., Bernard Cloutier B., Frainais M. Development on electrolytic cell gas cooling // Light Metals. 2014. P. 623-628.

9. Sørhuus A., Wedde G, Rye K., Nyland G. Increased energy efficiency and reduced HF emissions with new heat exchanger // Light Metals. 2010. P. 249-254.

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

11. Kondrat'ev V.V., Ershov V.A., Shakhrai S.G., Ivanov N.A. Preheat of prebaked anode // Non-ferrous Metals. 2015. № 1. P. 54-56.

12. 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.

13. Kolesnikov A.V., Mironenko V.V., Cheslavskaya A.A., Shmakov A.K. Optimization of technological processes of manufacturing parts from sheet by means of virtual simulation technology // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. № 12. P. 73-77.

14. Cheslavskaya A.A., Mironenko V.V., Kolesnikov A.V., Maksimenko N.V., Kотов V.V. The choice of a rational method of forming parts by means of engineering analysis using CAE-systems // Metallurg. 2014. № 12. P. 24-31.