



УДК 669.1.: 669.97

С.Г. Шахрай¹, А.А. Дектерев^{1,2}, А.В. Минаков^{1,2},
П.А. Необъявляющий^{1,2}, Н.А. Шарыпов¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

²Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: shahrai56@mail.ru

Дата поступления 09.02.2018

МОДЕРНИЗАЦИЯ АНОДНОГО КОЖУХА АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА СОДЕРБЕРГА

Аннотация

Проанализированы причины высокого расхода электроэнергии на преодоление сопротивления газового прианодного слоя электролизера с самообжигающимся анодом. Предложено техническое решение, обеспечивающее уменьшение объема газоелектролитного слоя за счет секционирования анода на отдельные ячейки в существующем, модернизируемом анодном кожухе. Выполнено моделирование поведения пузырей анодного газа под моноблочным и секционированным анодом. Проведена оценка влияния газового прианодного слоя на технико-экономические показатели электролизера с самообжигающимся анодом.

Ключевые слова: алюминиевый электролизер, самообжигающийся анод, газовый слой, сопротивление, электроэнергия, анодный кожух, модернизация, ячейки.

Введение

Одна из проблем современных электролизеров Содерберга – значительные габариты установленного в нем самообжигающегося анода, длиной 8,0...8,5 м и шириной 2,6...2,8 м. Такие габариты являются причиной образования под анодом газового слоя, на котором падение напряжения составляет 400 мВ и выше, а на преодоление его сопротивления электролизер расходует до 1200...1400 кВт·ч/т Al электроэнергии.

На электролизере с обожженным анодом, вследствие существенно меньших габаритов последнего (длина 1,0...1,5 м, ширина 0,6...0,9 м), потери напряжения на газовом слое составляют 150...300 мВ, а затраты электроэнергии на преодоление его сопротивления 600...800 кВт·ч/т Al электроэнергии [1].

В настоящей работе предлагается уменьшить объем газового слоя за счет секционирования самообжигающегося анода на отдельные ячейки. Ячейки размещаются в существующем модернизированном анодном кожухе. Снижение объема газового слоя происходит за счет уменьшения габаритов анода, который определяется зависимостью [1]:

$$V = Abl + 2(A + B)(h - l)l, \quad (1)$$

где A и B – длина и ширина анода, м;
 l – междуполосное расстояние (МПП), м;
 h – уровень электролита, м

Кроме этого, разделение анода на ячейки, согласно представленному техническому решению, позволяет исключить из системы газоудаления электролизера газосборный колокол, т.к. в этом случае пузыри анодного газа, под действием сил Архимеда, будут всплывать в зазоры между ячейками, откуда возможно организовать их отвод в горелки для дожигания и далее – в газоходную сеть корпуса электролиза.

Модернизация анодного кожуха электролизера Содерберга

Суть предлагаемой модернизации анодного кожуха заключается в следующем. В анодный кожух на уровне границы между коксо-пековой композицией и зоной полукокса устанавливается горизонтальная перфорированная перегородка с ячейками (рисунок 1) [2].

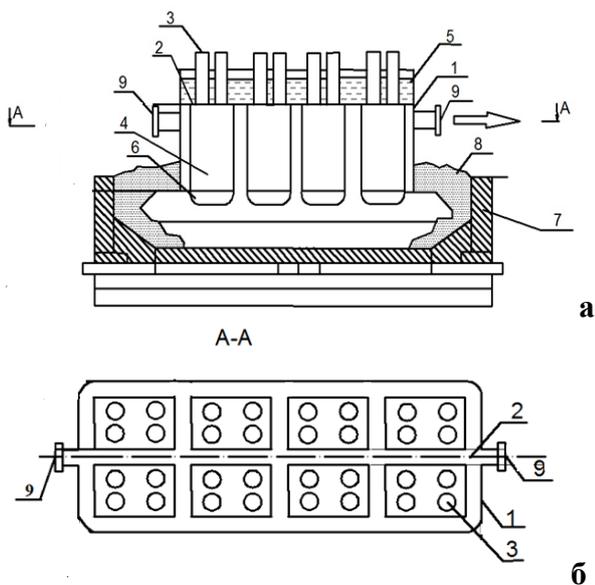


Рисунок 1. Электролизер с секционированным анодом:

- а и б – продольный разрез электролизера и его анодного узла; 1 – анодный кожух; 2 – горизонтальная перегородка; 3 – токоподводящие анодные штыри; 4 – ячейки для формирования анода; 5 – слой коксопечковой композиции; 6 – спекшиеся анодные блоки; 7 – катодный узел электролизера; 8 – криолитоглиноземная корка; 9 – газоотводящий патрубок

Между ячейками, а также между ними и внутренней стороной стенки анодного кожуха остаются зазоры шириной от 150 до 200 мм. Такая ширина зазора сопоставима с шириной подколольного пространства, в котором собираются анодные газы на «традиционном» электролизере Содерберга с моноблочным анодом.

Нижняя кромка ячейки по уровню совпадает с нижней кромкой анодного кожуха, что обеспечивает условия подобия схода анодных газов из-под моноблочного и секционированного анодов – равенство статического давления расплава, оказываемого на всплывающий пузырек газа. Размер окон в перфорированной горизонтальной перегородке соответствует внутренним габаритам ячейки, что обеспечивает свободное затекание коксо-печковой композиции в зону полукокса. В целях исключения коксования загружаемой в электролизер анодной массы на поверхности перегородки, по-

верхность последней, обращенная к расплаву, оборудуется тепловой изоляцией.

Минимальное количество ячеек, на которое делится моноблочный анод – две, максимальное – двенадцать. При делении моноблочного анода на 12 ячеек размер каждой из них приближается к габаритам обожженного анода и составляет примерно 1,2x1,2 м. При этом удержание каждого блока в ячейке и токоподвод к нему осуществляется 4...8 анодными штырями. Сбор анодных газов в зазорах между ячейками обеспечивает возможность их отвода в систему газоудаления через газоотводящие патрубки, размещенные в анодном кожухе ниже уровня расположения перфорированной перегородки.

Влияние газового прианодного слоя на технико-экономические показатели работы электролизера

В настоящем разделе статьи представлены результаты математического моделирования поведения газовых пузырей под моноблочным и секционированным анодами. Полная математическая модель движения анодного газа под анодом состоит в совместном решении уравнений гидродинамики и уравнения свободной границы жидкого электролита. Течение электролита описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса [2], включающими в себя уравнения сохранения массы (неразрывности) и сохранения импульса (движения).

Основные транспортные уравнения данной модели имеют вид:

$$\frac{d\rho k}{dt} + \nabla(\rho k) = \nabla \Gamma_k \nabla k + G_k; \quad (2)$$

$$\frac{d\rho \omega}{dt} + \nabla(\rho \omega v) = \nabla \Gamma_\omega \nabla \omega + G_\omega, \quad (3)$$

где ω – удельная скорость диссипации, Γ_k и Γ_ω – обобщенные коэффициенты диффузии, G_k и G_ω – источниковые слагаемые.

Для решения задачи со свободной поверхностью использовался метод жидкости в ячейках [3, 4] – жидкость и газ рассматриваются как единая двухкомпонентная среда, пространственное распределение фаз в пределах расчетной области определяется при помощи специальной функции маркера $F(x, y, z, t)$.

Величина функции F в начальный

момент задается следующим образом:

$$F(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, & \text{если ячейка пустая;} \\ 1, & \text{если ячейка полная;} \\ \text{объемная доля жидкости,} & \\ \text{если через ячейку проходит свободная граница.} & \end{cases}$$

Расчет выполнялся для области занятой электролитом. Вычислительный эксперимент по оценке поведения газового слоя проводили при следующих граничных условиях: габариты моноблочного анода 8,4 x 2,8 м, габариты ячеек секционированного анода около 1,35x1,60 м, криолитовое

отношение электролита 2,20...2,25, глубина погружения анода в электролит 15 см, расход анода 550 кг/т Al, сила тока процесса электролиза 175 кА. На нижней поверхности анода задавался удельный расход образующихся анодных газов 42...45 нм³/ч [5]. Результаты моделирования представлены на рис. 2 – 7.

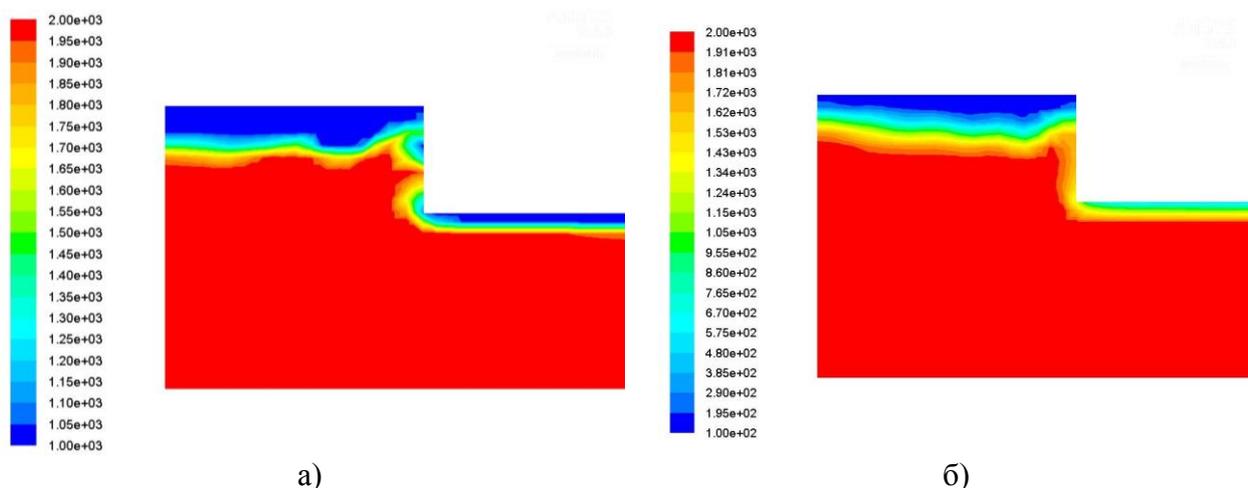


Рисунок 2. Толщина газового слоя: а) - под моноблочным анодом; б) – под секционированным

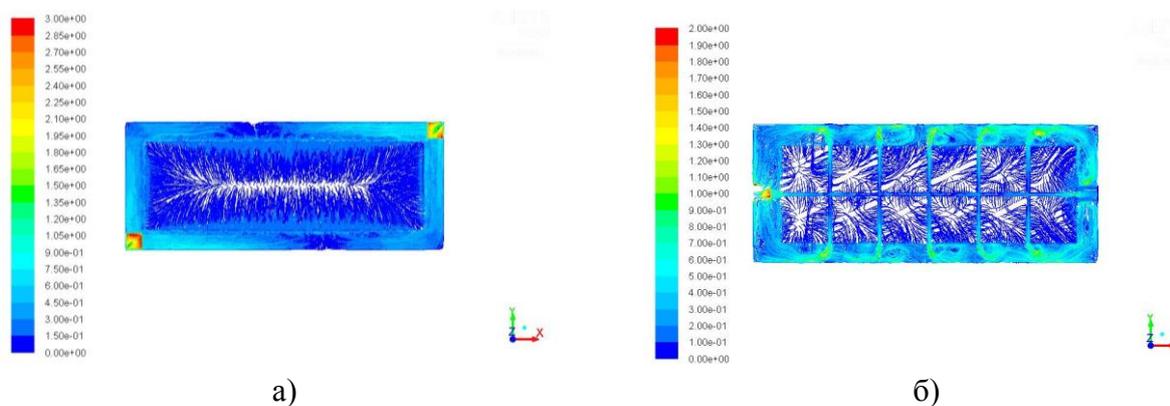
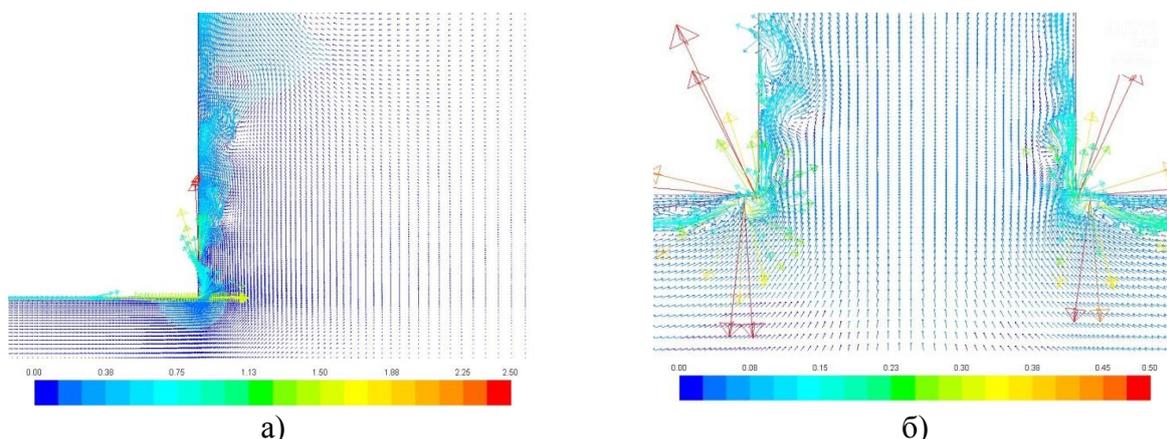
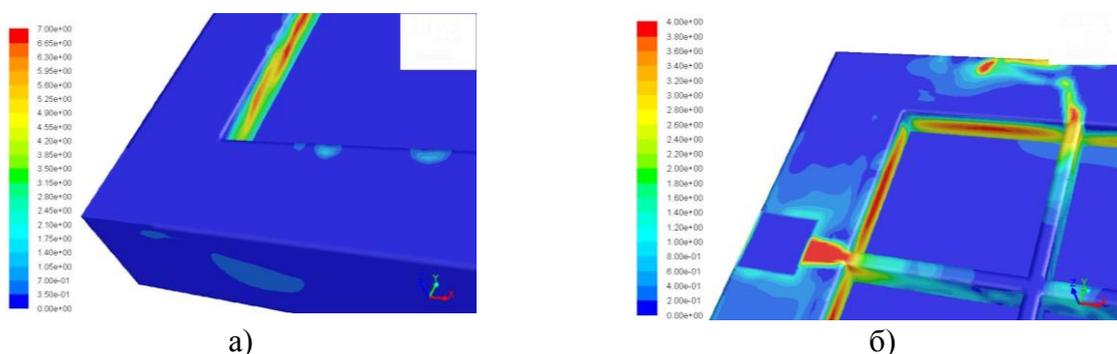


Рисунок 3. Линии тока газовых пузырей: а) - под моноблочным анодом; б) – под секционированным (цвет соответствует скорости, м/с)

Из рисунка 2 видно, что под секционированным анодом толщина газового слоя (3 мм) в 2,5 раза ниже, чем под моноблочным анодом (7,5 мм), а из рисунка 3 – что более 80 % площади подошвы моноблочного анода затянута газовыми пузырями, в то время как под секционированным анодом – не более 60 %.



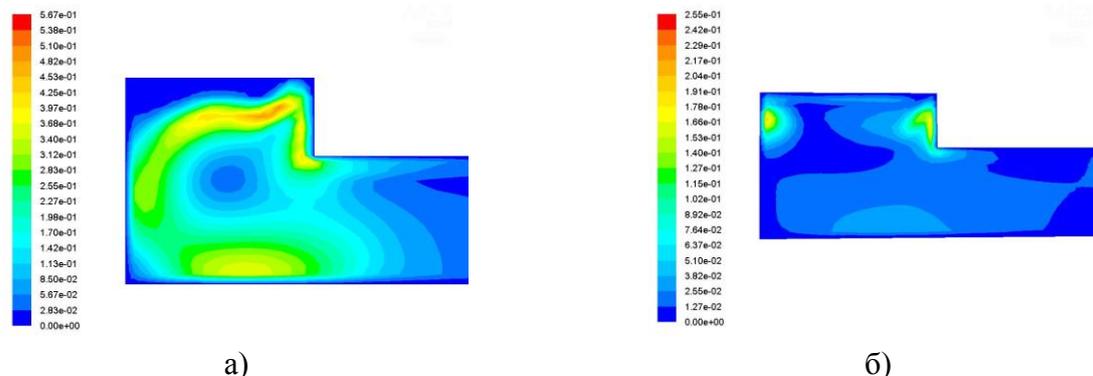
а) б)
Рисунок 4. Векторное поле скоростей газовых пузырей:
а) под моноблочным анодом; б) под секционированным



а) б)
Рисунок 5. Трение газовых пузырей, Па: а) на стенке моноблочного анода;
б) секционированного

Векторные поля скоростей, представленные на рисунке 4 показывают, что средняя скорость газовых пузырей при их сходе из-под моноблочного анода находится в диапазоне 0,70...0,75 м/с, и близка к данным, полученным в работе [6] экспериментальным путем для электролизера силой тока 156 кА. Однако, в локальных зонах скорость схода газовых пузырей из-под анода достигает 2,5 м/с, а при сходе из-под

ячейки секционированного анода не превышает 0,5 м/с (см. рисунок 4 б). Соответственно, трение на стенке моноблочного анода достигает 7 Па (см. рисунок 5 а), на стенке секционированного почти в 2 раза ниже, порядка 4 Па (см. рисунок 5 б). Таким образом, можно предположить, что при секционировании анода снижается его эрозионный износ и выход пены, обусловленный сходом газовых пузырей.



а) б)
Рисунок 6. Скорость циркуляции электролита от воздействия газовых пузырей:
а) сходящих из-под моноблочного анода; б) из-под секционированного

При секционировании анода скорость циркуляции электролита от воздействия газовых пузырей снижается с 0,3...0,5 м/с (см. рисунок 6,а) до 0,1...0,2 м/с (см. рисунок 6,б). За счет снижения скорости и зоны циркуляции в пространстве «борт анод» сокращается вынос теплоты из центральной зоны электролизера и ее потери через стенки катодного кожуха, а также уменьшается риск плавления настывшей от воздействия циркулирующего электролита. В то же время, появление зоны циркуляции в центральной части электролизера улучшает условия переноса и растворения глинозема во всем объеме электролита и снижает риск образования осадков на подине электролизера.

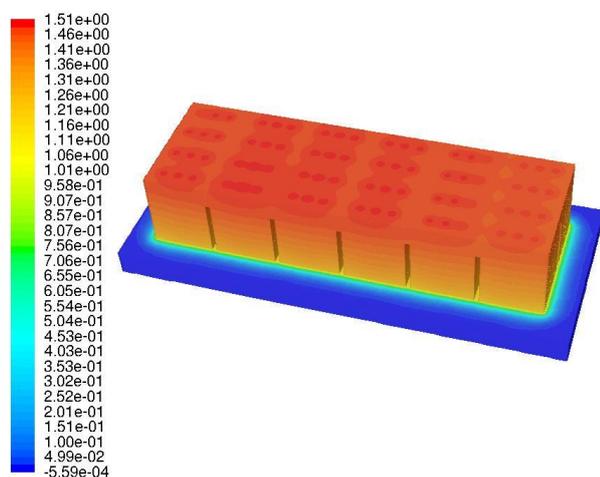


Рисунок 7. Падение напряжения на газосодержащем слое секционированного анода

Согласно данным рис. 7, за счет уменьшения толщины газового слоя, падение напряжения на газосодержащем прианодном слое секционированного анода снижается до 300...400, против 600...800 мВ на моноблочном аноде [1]. Соответственно, удельный расход электроэнергии на преодоление сопротивления газового слоя в электролизерах силой тока 175 кА уменьшается на 520...870 кВт·ч/тAl.

При секционировании самообжигающегося анода, помимо сокращения расхода электроэнергии отпадет потребность в газосборном колоколе, так как образующиеся анодные газы, под воздействием сил Архимеда, всплывают из-под анода и собираются непосредственно в зазорах между

ячейками, откуда они через газоотводящие патрубки направляются в горелки для сжигания. При удалении газосборного колокола возможно увеличение площади анодного кожуха на 6...7 м², а площади собственно самообжигающегося анода – на 3...4 м². Таким образом, возможно получить дополнительное снижение потери напряжения за счет уменьшения плотности тока в аноде, или, при сохранении ее существующего уровня, повысить силу тока процесса электролиза до 190...200кА, а производительность электролизера на 10...15 %. Кроме этого, увеличение площади анодного кожуха уменьшает площадь открытой корки ~ на 50 % и на такую же величину снижает объем выбросов анодных газов, фильтрующихся через криолито-глиноземную корку электролизера.

Заключение

Модернизация анодного кожуха по предлагаемому техническому решению позволяет снизить расход электроэнергии электролизером с самообжигающимся анодом на 3...5 %, а также исключить из системы газоудаления газосборный колокол, срок службы которого, как правило, не превышает 8...12 месяцев. Реализация предлагаемого технического решения потребует новых конструкционных материалов и изменения технологии изготовления анодного кожуха, оборудованного перфорированной перегородкой с ячейками. Эти материалы не должны деформироваться при воздействии высоких (до 940...960 °С) температур. Наиболее полно этому требованию отвечают чугуны, сварка которых более трудоемкий и дорогостоящий процесс, по сравнению со сваркой конструкционной стали, из которой в настоящее время изготавливают анодные кожухи. Однако, ожидаемые преимущества делают предлагаемую модернизацию анодного кожуха экономически привлекательной.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-

Библиографический список

1. Yiwen Zhou, Jiemin Zhou, Jianhong Yang and [etc.]. Simulation of anode bubble: volume of fluid method. - Light Metals, 2014, p. 783-788.
2. Ветюков, М.М., Цыплаков, А.М., Школьников, С.Н. Электрометаллургия алюминия и магния. М.: Металлургия, 1987. – 320 с.
3. Шахрай, С.Г., Дектерев, А.А., Скуратов, А.П. Электролизер для получения алюминия. Заявка на патент РФ на изобретение №2017123473 от 03.07.2017.
4. J. O. Hinze. Turbulence. McGraw-Hill Publishing Co., New York. 1975. 790 с.
5. Hirt C.W. Volume of fluid (VOF). Method for the dynamics of free boundaries. / C.W. Hirt, B.D. Nichols // Journal of computational physics. 1981. № 39. P.-201-226.
6. A.V. Minakov. Numerical algorithm for moving-boundary fluid dynamics problems and its testing. Computational Mathematics and Mathematical Physics.

Volume 54, Issue 10, 2014, P.- 1560- 1570.

7. Шахрай, С.Г. Совершенствование систем колокольного газоотсоса на мощных электролизерах Содерберга: монография / С.Г. Шахрай, В.В. Коростовенко, И.И. Ребрик. – Красноярск.: ИПК СФУ. – 2010. – 146 с.
8. Крюковский, В.А. Исследование циркуляции электролита и анодных газов в междуполусном зазоре мощных алюминиевых электролизеров: Автореферат дисс...канд. техн. наук / Ленинград: Всесоюзный институт алюминиевой и магниевой промышленности (ВАМИ), 1974. – 20 с.

Information about the paper in English

S.G. Shakhrai¹, A.A. Dekterev^{1,2}, A.V. Minakov^{1,2},
P.A. Neobyavlyayushchy^{1,2}, N.A. Sharyov¹

¹Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia

²The Thermophysics Institute of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

E-mail: fdv_viktor@mail.ru

Received 09.02.2018

MODERNIZATION OF AN ANODE SHELL OF A SODERBERG ALUMINUM ELECTROLYZER

Abstract

We have analyzed reasons for a high power consumption to overcome resistance of a gas anode layer of the electrolyzer with a self-baking anode. A suggested technical solution provides for a decreased gas electrolyte layer by sectioning the anode into cells in an existing, modernized anode shell. We have simulated behavior of anode gas bubbles under single-block and sectioned anodes. Influence of the gas anode layer on technical and economic performance of the electrolyzer with the self-baking anode was evaluated.

Keywords: aluminum electrolyzer, self-baking anode, gas layer, resistance, electric power, anode shell, modernization, cells
