

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.71

EDN: XHFGYC

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-162-177



Изучение особенностей магнитогидродинамики электролизёров С-8БМ (С-8Б) при модернизации алюминиевых заводов

А.А. Пинаев¹, Е.Ю. Радионов², И.А. Орлов³, Н.В. Немчинова⁴✉¹⁻³ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», г. Красноярск, Россия^{3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – расчет показателей магнитной гидродинамики алюминиевого электролизера для сравнения разных видов ошинок, используемых на ваннах с анодом Содерберга. Для проведения расчетов электрических параметров электролизера (токораспределения по блюмсам и анодным штырям) и характеристик магнитного поля использовалась компьютерная программа «Blums V5.07» (ООО «Полифем», Россия). С помощью программы «MHD-Valdis» (разработчик В. Бояревич, университет Гринвич, Великобритания) были получены данные по скоростям циркуляции и перекосу металла в электролизере. В ходе выполнения исследований были построены математические модели электролизера типа С-8БМ (С-8Б) с различными конструкциями ошинок. Выбраны 3 варианта ошинок, на которых испытывалась установка перемычки, предназначенной для замыкания токораспределения анодной ошинок электролизера. Данные типы ошинок выполнялись в 2 вариациях: с перемычкой и без нее. По полученным данным рассчитанных скоростей циркуляции и перекоса металла была выполнена оценка возможности модернизации ванн с анодом Содерберга без значительных капитальных затрат. При использовании 1-го типа ошинок достигнуты наилучшие значения распределения тока по блюмсам с диапазонами, составляющими ~757 А (для варианта без перемычки) и ~656 А (для модернизированного варианта с замкнутыми рядами), и по анодным штырям с диапазонами ~1754 А и ~1609 А, соответственно. Показано, что при использовании 3-го варианта ошинок токораспределение после установки перемычки между анодными шинами незначительно ухудшается. По полученным результатам можно сделать вывод, что при модернизации электролизера С-8БМ (С-8Б) с различными видами ошинок токораспределение по блюмсам и анодным штырям, характеристики магнитного поля (компоненты B_y и B_z), а также скорости циркуляции и перекоса металла не оказывают значительного влияния на эффективность работы данного электролизера, что способствует более быстрому переходу на ведение электролиза на ваннах ЭкоСодерберг и без значительных экономических затрат.

Ключевые слова: производство первичного алюминия, электролизер С-8БМ (С-8Б), ЭкоСодерберг, ошинок, магнитное поле, токораспределение, перекоса металла, скорость циркуляции, модернизация, математическое моделирование

Для цитирования: Пинаев А.А., Радионов Е.Ю., Орлов И.А., Немчинова Н.В. Изучение особенностей магнитогидродинамики электролизёров С-8БМ (С-8Б) при модернизации алюминиевых заводов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 162–177. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-162-177>. EDN: XHFGYC.

METALLURGY

Original article

Analysis of the magnetohydrodynamic parameters of S-8BM (S-8B) electrolyzers in the modernization of aluminum smelters

Andrey A. Pinaev¹, Evgeniy Yu. Radionov², Ivan A. Orlov³, Nina V. Nemchinova⁴✉¹⁻³RUSAL Engineering and Technology Center LLC, Irkutsk, Russia^{3,4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article aims to determine the magnetohydrodynamic parameters of an aluminum electrolyzer in order to compare different types of bus arrangements used in baths with a Soderberg anode. The electrical parameters of the electrolyzer (current distribution across blooms and anode studs) and magnetic field parameters were computed using the Blums V5.07 program (Polyfem, Russia). Data on circulation rates and skew of the metal in the electrolyzer were obtained using the MHD-Valdis program (developed by V. Boyarevich, University of Greenwich, UK). In the course of the studies, mathematical models of the C-8BM (C-8B) electrolyzer with various bus arrangements were built. Three bus arrangements were selected for testing the installation of a bridge designed to close the current distribution in the anode bus arrangement

of the electrolyzer. These types of bus arrangements were realized in two variants: with and without a bridge. The obtained circulation rates and skew of the metal were used to evaluate the possibility of modernizing baths with a Soderberg anode without significant capital costs. When using the first type of bus arrangement, the best current distribution was achieved for the blooms with limits of ~757 A (for the variant without a bridge) and ~656 A (for the modernized variant with closed series), as well as for the anode studs having limits of ~1754 A and ~1609 A, respectively. With the use of the third bus arrangement variant, the current distribution was shown to slightly decrease following the installation of a bridge between the anode bus bars. The obtained results suggest that in the modernization of a C-8BM (C-8B) electrolyzer with different types of bus arrangements, current distribution across blooms and anode studs, magnetic field characteristics (By and Bz components), as well as circulation rates and skew of the metal, have no significant impact on the efficiency of this electrolyzer, which contributes to a faster transition to EcoSoderberg bath electrolysis without significant economic costs.

Keywords: primary aluminum production, S-8BM (S-8B) electrolyzer, EcoSoderberg, busbars, magnetic field, current distribution, metal distortion, circulation rate, modernization, mathematical modeling

For citation: Pinaev A.A., Radionov E.Yu., Orlov I.A., Nemchinova N.V. Analysis of the magnetohydrodynamic parameters of S-8BM (S-8B) electrolyzers in the modernization of aluminum smelters. *iPolytech Journal*. 2024;28(1): 152-167. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-162-177>. EDN: XHFGYC.

ВВЕДЕНИЕ

Российская алюминиевая промышленность является передовой отраслью металлургии, внося существенный вклад в экономику нашей страны. Производственники и ученые проводят исследования и внедряют разработки, направленные на вовлечение в производство новых и альтернативных видов глиноземного сырья [1–4], совершенствование технологических процессов получения первичного алюминия [5–7], решение экологических проблем [8–12].

Развитие отечественной алюминиевой промышленности направлено как на модернизацию существующих производств, эксплуатирующих ванны с анодом Содерберга, так и на строительство новых заводов. В настоящее время на действующих алюминиевых заводах осуществляется перевод электролизеров с анодом Содерберга на ванны с предварительно обожженными анодами (ОА).

Однако данный перевод требует большого количества затрат на изменение конструкций анодного и катодного узлов, ошиновки, системы газоудаления (СГУ). Поэтому до сих пор остается актуальной темой модернизация электролизеров с анодом Содерберга, которыми оснащены известные старейшие предприятия компании «РУСАЛ» (Красноярский, Братский, Иркутский, Новокузнецкий алюминиевые заводы). Согласно [13], технология электролиза с применением ванн с анодом Содерберга более привлекательна с точки зрения себестоимости производимого алюминия.

Однако данный тип ванн не отвечает экологическим требованиям, предъявляемым в настоящее время. Поэтому на российских алюминиевых заводах запущен проект, подразумевающий глубокую модернизацию

электролизеров с анодом Содерберга, которая включает в себя целый ряд мероприятий:

Совершенствование газосборного колокола, основанное на повышении пропускной способности и улучшении аэродинамических характеристик подколокольного пространства. Для этого была увеличена площадь поперечного сечения газоходного канала и изменены секции газосборного колокола (ГСК) с трапецеидальной на параболическую (рис. 1) [14]. За счет данного изменения удалось приблизиться к круглой форме ГСК, что привело к отсутствию застойных зон и снижению вероятности образования отложений.

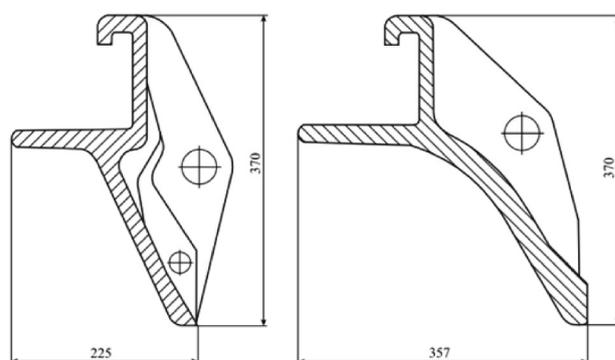


Рис. 1. Сечение секции газосборного колокола [14]:
а – трапецеидальная форма; б – параболическая форма

Fig. 1. Section of the gas collecting bell section [14]:
a – trapezoidal shape; b – parabolic shape

Совершенствование системы газоудаления (рис. 2), которое заключается в замене горелочных устройств щелевого типа [15] на четырехкупольные системы газоудаления. СГУ [11, 16] состоит из 4 куполов, 2 из них расположены по углам и 2 по продольным сторонам, между бункерами системы автоматической подачи глинозема (АПГ). Купола

соединены трубопроводом, по которому газы удаляются в систему организованного отсоса. Данные купола обеспечивают равномерный отвод газов из колокола, а наличие в них отверстий для подсоса воздуха – догорание анодных газов.



Рис. 2. Электролизер С-8БМ(Э), оборудованный четырехкупольной СГУ [14]

Fig. 2. S-8BM(E) electrolyzer equipped with a four-dome gas removal system [14]

В совокупности все перечисленные внедренные мероприятия позволяют снизить негативное воздействие на окружающую среду вблизи алюминиевых предприятий, а также повысить экономические показатели за счет меньшего расхода электроэнергии и более высокого выхода по току⁵.

После модернизации на опытной группе (рис. 3) были получены следующие экологические показатели [14]:

- КПД укрытия составил 99,3%;
- среднесуточная эффективность укрытия составила 97,4%;
- выбросы в атмосферу снизились на 15%;
- снижение выбросов фтора составило 34%.

Передовая технология, разработанная специалистами ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», дала фактически второе рождение традиционному способу производства алюминия на электролизерах с анодом Содерберга. Данный проект получил название «ЭкоСодерберг»⁶. Однако по факту реализации проекта модернизации были выявлены некоторые особенности, связанные с тем, что ошиновка на электролизерах с самообжигающимися анодами разного типа на различных алюминиевых заводах имеет отличительные конструкционные особенности [14, 17–20].

На примере филиала ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (Иркутского алюминиевого завода (ИркАЗа)) авторы при помощи математического моделирования проанализировали работу электролизеров ЭкоСодерберг при использовании на них ошиновок различных конструкций.



Рис. 3. Электролизер С-8БМ(Э), оборудованный автоматической подачей глинозема и четырехкупольной системой газоудаления⁷

Fig. 3. S-8BM(E) electrolyzer equipped with an automatic alumina supply and a four-dome gas removal system⁷

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Нами были построены математические модели электролизеров С-8БМ (С-8Б) с разными видами ошиновки, для дальнейшего анализа работы ванн в конструкцию вносились изменения.

Для расчетов токораспределения и магнитного поля математические модели ванн выполнялись в программе «Blums v5.07» (ООО «Полифем», Россия), прототипом которой послужила трехмерная модель расчета МГД-параметров алюминиевого электролизера [21]. Данная программа была опробована на многих типах электролизеров, в ее разработке принимали участие специалисты различных научно-исследовательских и отраслевых институтов. Современные электролизеры РА-300, РА-400 и РА-550 были разработаны в разное время и в разных версиях данной программы. Также для моделирования и выбора оптимальных магнитогидродинамических (МГД) параметров использовалась и другая программа, зарекомендовавшая себя во многих странах, – «MHD-Valdis» (разработчик В. Бояревич, университет Гринвич, Великобритания) [22, 23]. Данная программа, основанная

⁵ИТС 11-2022. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство алюминия (утв. Приказом Росстандарта от 16.12.2022 № 3197).

⁶ЭкоСодерберг // РУСАЛ. Режим доступа: <https://rusal.ru/innovation/technology/ekosoderberg/> (дата обращения: 20.09.2023).

⁷«РУСАЛ»: миллиардные вложения не только в производство. Режим доступа: https://prom-siberia.ru/industry/metallurgy/rusal-milliardnye-vlozheniya-ne-tolko-v-proizvodstvo/?tdb_action=tdb_ajax (дата обращения: 20.09.2023).

на теории «мелкой воды», как и в отечественных разработках, предназначена для расчета электрических характеристик и МГД-процессов в алюминиевых электролизерах.

Данные программы были разработаны для изучения методом моделирования электролизеров различных типов, в том числе и электролизеров с анодом Содерберга с верхним токоподводом. Программы зарекомендовали себя с лучшей стороны, поскольку с их помощью были разработаны и рассчитаны различные параметры (МГД-параметры, перекося металла, скорости циркуляции, плотности тока, значения тока, проходящего по шинам, температура ошиновки, распределение тока в блюмсах и анодах) таких электролизеров, как ОА-300М1, ОА-300М2, РА-167, РА-300, РА-400, РА-500.

При построении математических моделей, а также их верификаций были приняты следующие исходные данные:

- уровень металла = 30 см;
- уровень электролита = 20 см;
- междуполосное расстояние (МПП) = 4,5 см.

По выбранным данным были выполнены расчеты различных ошиновок для электролизера С-8Б (С-8БМ).

Для каждого из вариантов были проведены расчеты без перемычки и перемычки с закольцованными рядами. Перемычка представляет собой шину, которая замыкает между собой ряды анодных шин и меняет токораспределение и МГД-параметры (рис. 4).

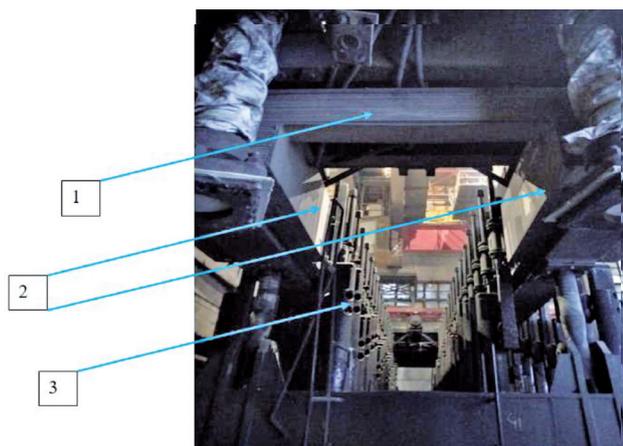


Рис. 4. Анодное устройство электролизера С-8БМ (С-8Б): 1 – перемычка; 2 – анодные шины; 3 – штыри
Fig. 4. S-8BM (S-8B) electrolyzer anode: 1 – bridge; 2 – anode buses; 3 – pins

В алюминиевых электролизерах, которые работают на электрическом токе, возникают мощные электромагнитные силы. Однако в конструктивных элементах электролизера эти силы не проявляются, они возникают в жидком алюминии, который является проводником тока.

При прохождении тока через проводник, вокруг него возникает магнитное поле, которое создается движущимися электрическими зарядами. Силовой характеристикой магнитного поля служит вектор магнитной индукции \vec{B} , Т:

$$\vec{B} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2},$$

где B_x – горизонтальная составляющая магнитной индукции, направленная вдоль тока серии; B_y – горизонтальная составляющая магнитной индукции, направленная поперек тока серии; B_z – вертикальная составляющая магнитной индукции.

Компонента B_x не рассматривалась в данной работе, так как ее влияние минимально для электролизеров с продольным расположением в корпусе [24].

Под воздействием электромагнитных сил форма поверхности металла изменяется, а также изменяется МПП. В результате возникает циркуляция расплава, которая может привести к замыканию подошвы анода с жидким алюминием и перекося поверхности алюминия⁸ [25].

Ток в алюминиевых электролизерах течет в разных направлениях. Он движется вертикально: вверх и вниз по аноду и стоякам. Также ток движется горизонтально – вдоль и поперек ванны по анодным и катодным шинам, а также по блюмсам. Из-за того, что ток движется в разных направлениях, магнитная индукция в каждой точке ванны имеет сложную структуру.

МПП является переменной величиной и зависит от различных факторов: состояния подошвы анода, волнения металла, присутствия газа и угольных частиц в электролите. Фактическая плотность тока в электролите также является переменной и невозможно ею управлять напрямую. В расчетах приходится принимать плотность тока, равную анодной

⁸Гефтер С.Э., Евдокимов С.В., Тимченко Б.И. Исследование магнитных полей на алюминиевых электролизерах усовершенствованных конструкций различного типа и мощности. Этапы 1,2,4. Промышленные испытания. Отчет ВАМИ по теме 5-67-067. Л., 1968. 40 с.

плотности тока, чтобы упростить моделирование процессов в электролизере [26].

Также было изучено двухфазное газожидкостное движение, которое возникает в электролизерах при выделении газа из-под анода [27].

Под воздействием больших объемов выходящего газа возникают сильные движения газа в междуполлюсном зазоре и пространстве «борт-анод». Эти движения трудно поддаются расчету, так как они зависят от множества факторов: силы тока, физических свойств газа и жидкости, геометрии электролизера и других.

Газовая фаза под анодом может находиться в виде пузырьков или протяженных пленок, или в комбинации этих структур. Толщина пленок мало зависит от плотности тока и составляет около 5 мм для анодов Содерберга и 3–4 мм для ОА. Скорость перемещения пузырьков и пленок на подошве анода зависит от их размеров. Крупные пузыри имеют более высокую скорость перемещения, достигающую 20–25 см/с, в то время как маленькие пузыри движутся со скоростью 6–8 см/с.

Известно, что размер и скорость перемещения газовых пузырьков может влиять на процессы, происходящие в электролизере. Например, большие пузыри могут вызывать неоднородное распределение потока электролита и создавать неэффективные зоны обработки. Понимание этих процессов имеет важное значение для оптимизации работы электролизеров и повышения их эффективности⁷ [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5–8 приведены примеры моделей расчета МГД-параметров электролизера, представленного на рис. 3.

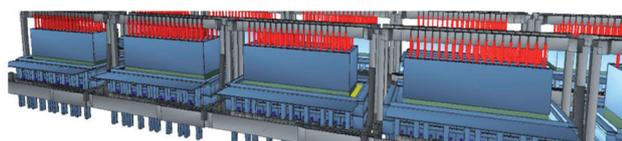


Рис. 5. Общий вид рассчитываемой модели электролизера

Fig. 5. General view of the calculated electrolysis cell model

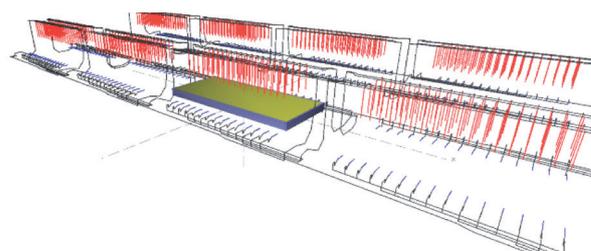


Рис. 6. Модель для расчета МГД-параметров электролизеров – система электрических проводников

Fig. 6. A model for calculating magnetohydrodynamical parameters of electrolysis cells – a system of electrical conductors

В наших исследованиях рассчитывались 3 типа ошиновки (рис. 7): 1-й – классическая 4-стоячная ошиновка «Цыплакова»⁸ [29], в которой глухая сторона находится ниже лицевой (рис. 7 а); 2-й – модернизированная ошиновка, в которой катодная шина располагается на 2-х уровнях для компенсации вертикальной компоненты B_z в местах максимального ее влияния, а именно в районе выходного торца (рис. 7 б); 3-я – модернизированная ошиновка, на глухой стороне которой выполнена перекоммутация по блокам, т.е. перераспределение подключенных блоков по шинам, и на лицевой стороне добавлена шина; данные изменения выполнены с целью перераспределения тока по блокам, снижения перепада напряжения [30–32], а, главное, снижения расхода электроэнергии (рис. 7 с).

На рис. 8 представлены модели различных типов ошиновки электролизера после проведения частичной модернизации (установки переключки для закольцовывания рядов анодных шин).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Для рассмотренных вариантов были проведены расчеты токораспределения, магнитного поля, скоростей циркуляции и перекоса металла.

На рис. 9–14 представлены результаты математического моделирования скорости циркуляции (ось V_m , м/с), перекоса металла (ось DH , м). Общие оси X и Y отображают геометрические размеры электролизера (м).

⁸А.с. № 463348, СССР, С25С 3/16. Ошиновка алюминиевых электролизеров / В.П. Никифоров, В.И. Носиков, И.Г. Киль, И.К. Цыбуков, А.Н. Смородинов, А.М. Цыплаков, Н.П. Будкевич, Н.И. Выходов; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт алюминиевой, магниевой и электродной промышленности. № 1286459. Заявл. 02.12.1968; опубл. 25.11.1977. Бюл. № 43.

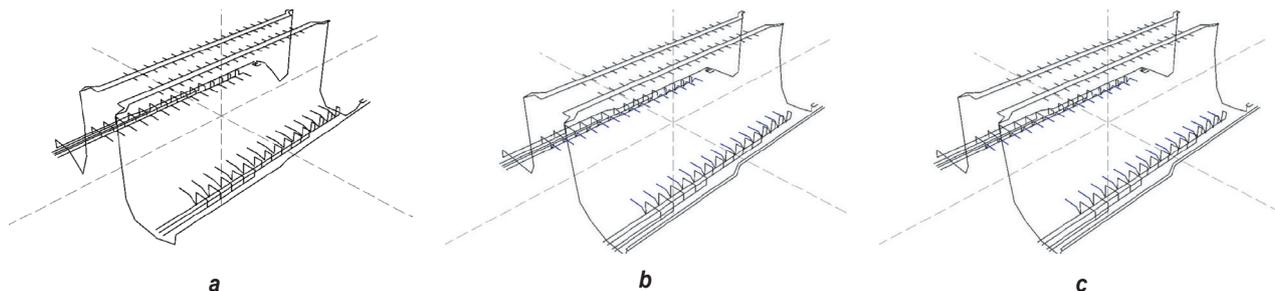


Рис. 7. Типы ошинок в моделях: а – 1-й; б – 2-й; с – 3-й
 Fig. 7. Types of busbars in models: a – 1st; b – 2nd; c – 3rd

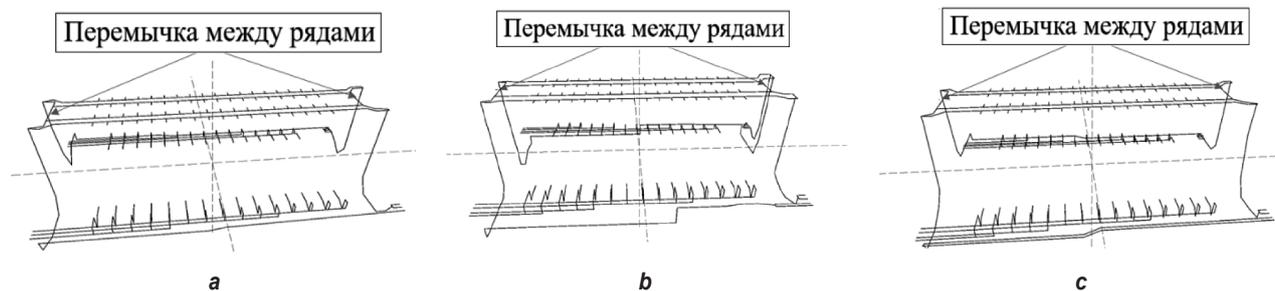


Рис. 8. Типы ошинок в моделях с закольцованными рядами: а – 1-й; б – 2-й; с – 3-й
 Fig. 8. Types of busbars in the models with looped rows: a – 1st; b – 2nd; c – 3rd

Как видно из рис. 9, 10, при использовании 1-го типа ошиновки зафиксирована многоконтурная система циркуляции металла с выраженным большим контуром, на данном

варианте – минимальные скорости циркуляции и статический перекося. После установки перемычки наблюдается уменьшение перекося металла.

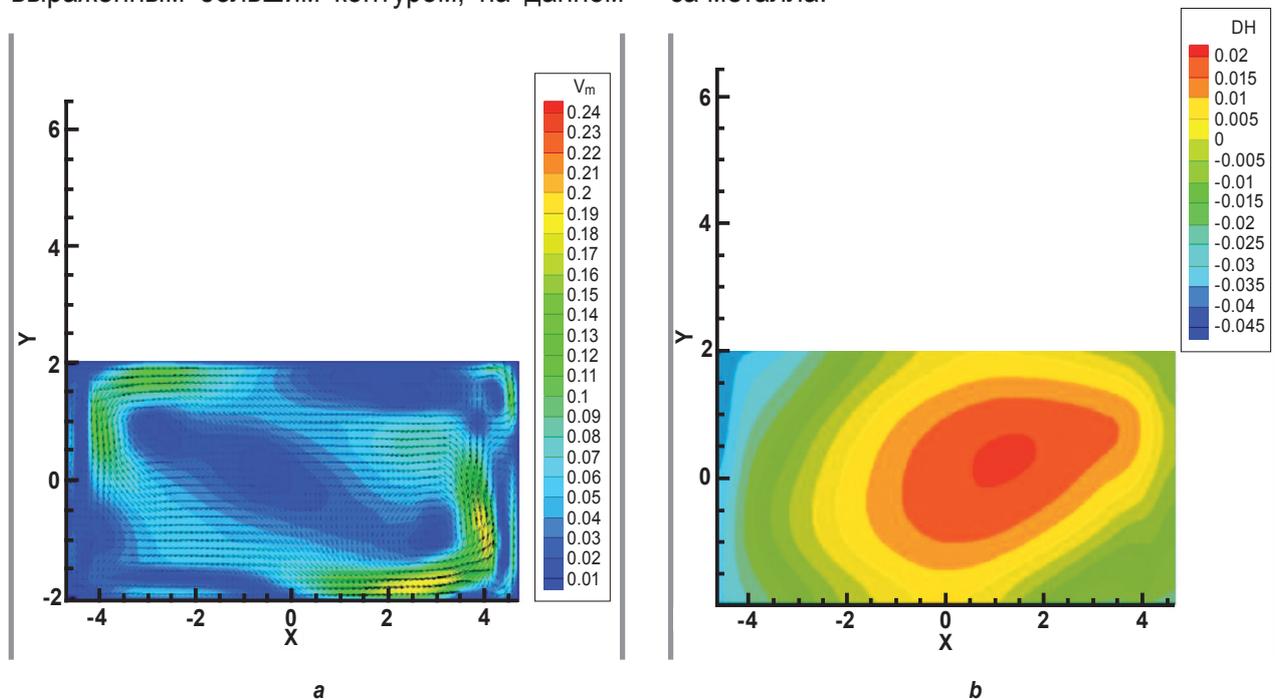


Рис. 9. Результаты моделирования для 1-го типа ошиновки без перемычки:
 а – скорости циркуляции металла; б – перекося металла
 Fig. 9. Simulation results for the 1st busbar type without a bridge:
 a – metal circulation rates; b – metal distortion

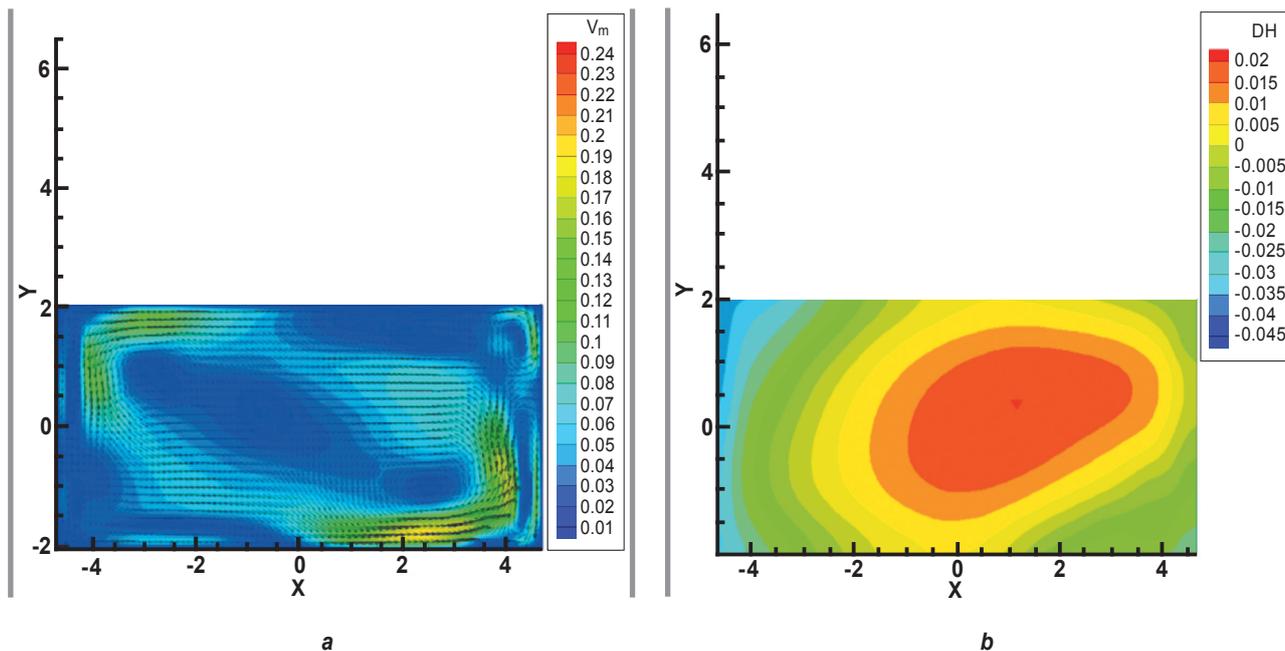


Рис. 10. Результаты для 1-го типа ошиновки с перемычкой:
a – скорости циркуляции металла; b – перекося металла
Fig. 10. Results for the 1st busbar type with a bridge:
a – metal circulation rates; b – metal distortion

При использовании 2-го типа ошиновки (см. рис. 11, 12) также получена выраженная многоконтурная система циркуляции с выраженным большим контуром, на данном варианте стати-

ческий перекося металла смещен ближе к глухой стороне электролизера. После установки перемычки наблюдается уменьшение перекося металла и смещение зеркала к центру.

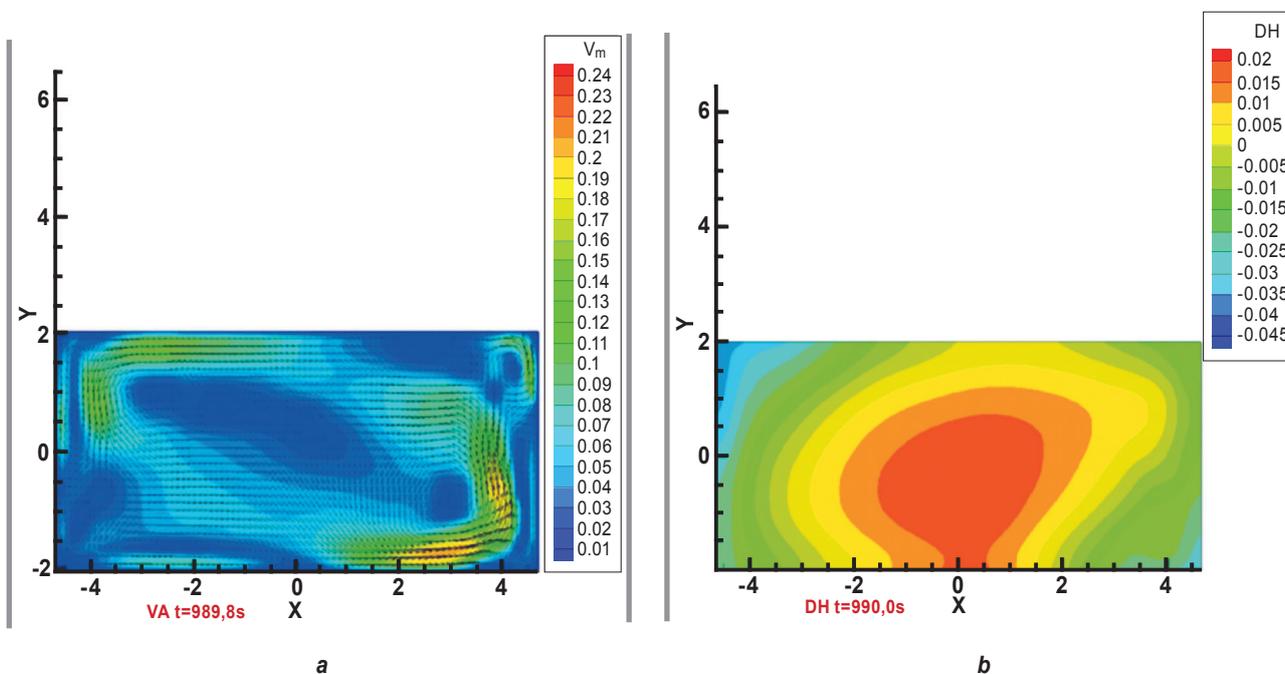


Рис. 11. Результаты для 2-го типа ошиновки без перемычки:
a – скорости циркуляции металла; b – перекося металла
Fig. 11. Simulation results for the 2nd busbar type without a bridge:
a – metal circulation rates; b – metal distortion

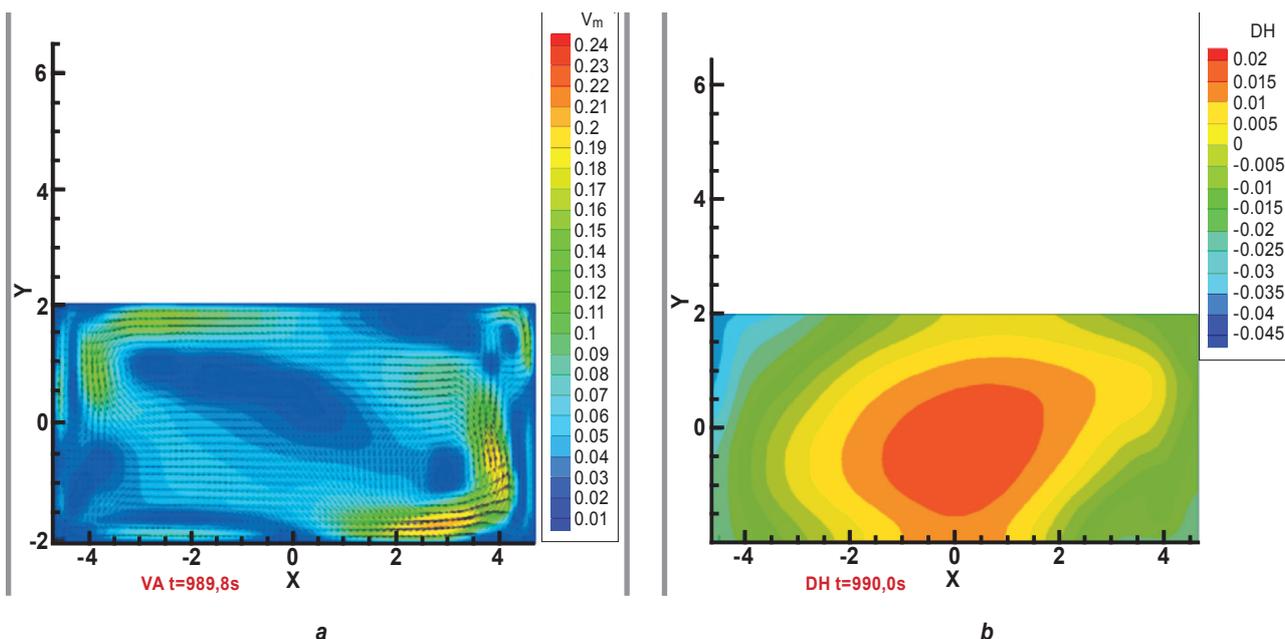


Рис. 12. Результаты для 2-го типа ошиновки с перемычкой:
 а – скорости циркуляции металла; б – перекося металла
 Fig. 12. Results for the 2nd busbar type with a bridge:
 а – metal circulation rates; б – metal distortion

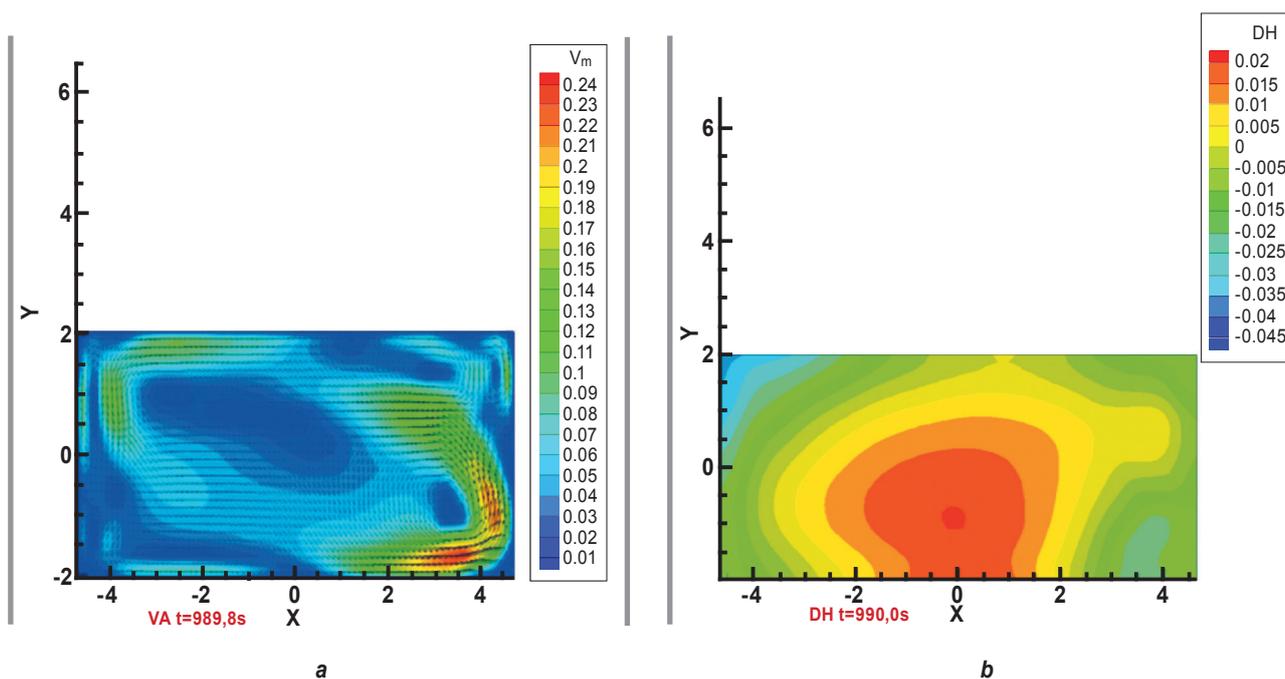


Рис. 13. Результаты для 3-го типа ошиновки без перемычки:
 а – скорости циркуляции; б – перекося металла
 Fig. 13. Simulation results for the 3rd busbar type without a bridge:
 а – circulation rates; б – metal distortion

При использовании 3-го типа ошиновки, согласно данным моделирования (см. рис. 13, 14), в металле преобладают самые большие скорости циркуляции со смещением зеркала металла к глухой стороне.

Для всех вариантов ошиновки характерна многоконтурная система циркуляции катодного металла с преобладанием одного большого контура по центру электролизера. Области с максимальными скоростями циркуляции на-

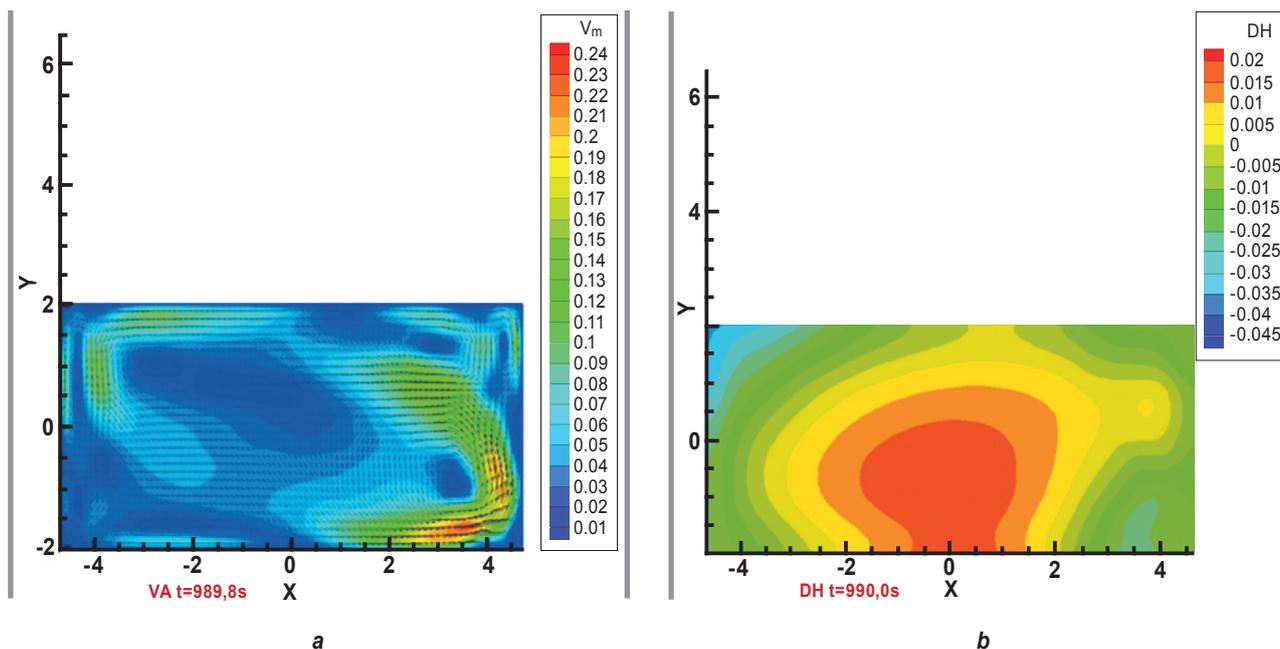


Рис. 14. Результаты для 3 типа ошиновки с перемычкой:
 а – скорости циркуляции; б – перекося металла
 Fig. 14. Results for the 3rd busbar type with a bridge:
 а – circulation rates; б – metal distortion

ходятся ближе к периферии ванны в районе анодных стояков. Форма статического перекося металла имеет ярко выраженный так называемый «пинч-эффект» [33].

На 2-м и 3-м вариантах ошиновок ванн с анодом Содерберга область максимального перекося металла имеет смещение ближе к продольной левой по ходу тока (глухой) стороне электролизера. Такое смещение характерно в большей степени для ванн, имеющих

двухрусную конструкцию катодной ошиновки.

При установке перемычки, которая закольцует между собой ряды анодной ошиновки, снижается перекося металла и уменьшается смещение зеркала от продольной стороны, а также уменьшаются скорости циркуляции металла.

Рассмотренные параметры магнитного поля для 3 вариантов электролизеров, работающих с перемычкой и без, сведены в таблицу.

Рассчитанные данные для 1, 2 и 3 типа ошиновки без перемычки и с перемычкой
 Calculated data for the 1st, 2nd and 3rd busbar types with and without a bridge

Магнитные поля, B_y							
Показатель	Единицы измерения	1 тип		2 тип		3 тип	
		Без перемычки	С перемычкой	Без перемычки	С перемычкой	Без перемычки	С перемычкой
min	мТ	-15,31	-15,32	-15,94	-15,94	-14,55	-14,57
max	мТ	19,33	19,32	18,48	18,48	17,57	17,57
Диапазон	мТ	4,02	4	2,54	2,54	3,02	3
Среднее значение	мТ	0,15	0,1	-0,14	-0,18	-0,2	-0,25
Среднее значение по модулю	мТ	6,23	6,23	6,3	6,3	6	6
Магнитные поля, B_z							
min	мТ	-15,34	-15,27	-15,24	-15,12	-17,16	-17,09
max	мТ	17,12	17,08	16,38	16,7	17,8	17,75
Диапазон	мТ	1,78	1,81	1,14	1,58	0,64	0,66
Среднее значение	мТ	1,78	1,71	1,82	1,77	1,71	1,66
Среднее значение по модулю	мТ	4,49	4,44	4,35	4,31	4,62	4,57

В таблице представлены следующие показатели магнитного поля: максимальные, минимальные значения компоненты B_y магнитного поля, диапазон, среднее значение и среднее значение измеряемых величин по модулю. Для компоненты магнитного поля B_y диапазон значений минимален для 1-го и 3-го типов ошиновки, для 2-го – не изменяется. Для компоненты B_z установка переемычки улучшает средние значения, а на диапазон влияет минимально. Таким образом, характеристики магнитного поля имеют незначительную разницу для представленных вариантов, следовательно, установка переемычки не окажет негативного влияния на работу электролизной ванны.

При использовании на электролизере 1-го типа ошиновки (рис. 15, 16) достигнуты

наилучшие значения распределения тока по блумсам с диапазонами (интервалами между максимальным и минимальным значениями), составляющими ~757 А (от 5277,42 до 6034,27) для варианта без переемычки и ~656 А (от 5330,45 до 5986,1) для модернизированного варианта с замкнутыми рядами, и по анодным штырям с диапазонами ~1754 А (от 1770 до 3524) и ~1609 А (от 1836 до 3445) соответственно.

На рис. 17 и 18 представлены результаты моделирования с использованием 2-го типа ошиновки на ванне, где наблюдается худшее токораспределение по анодным штырям: диапазон составляет ~1953 А (от 1722 до 3675) и ~1820 А (от 1759 до 3579) для вариантов без переемычки и с ней соответственно.

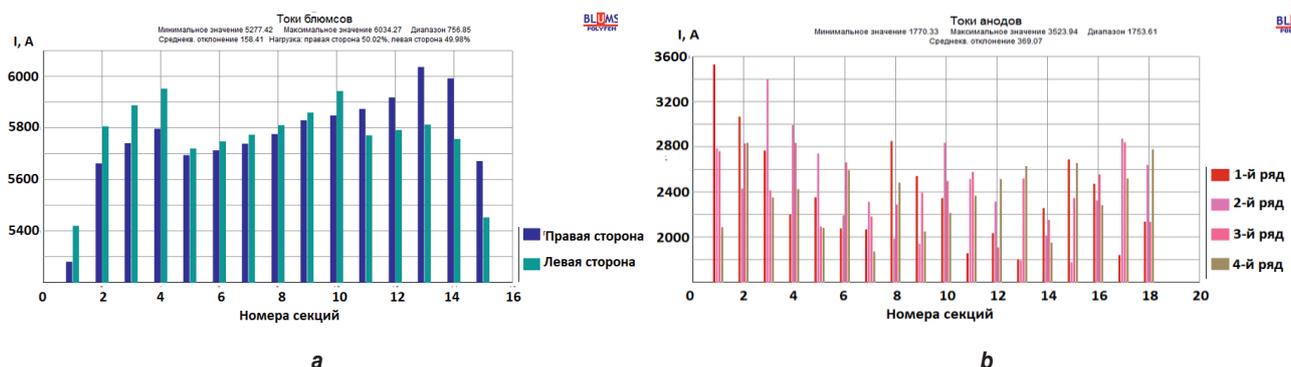


Рис. 15. Рассчитанное токораспределение с использованием 1-го типа ошиновки (без переемычки):
 а – по блумсам; б – по анодным штырям
 Fig. 15. Calculated current distribution using the 1st busbar type (without a bridge):
 а – by blums; б – by anode pins

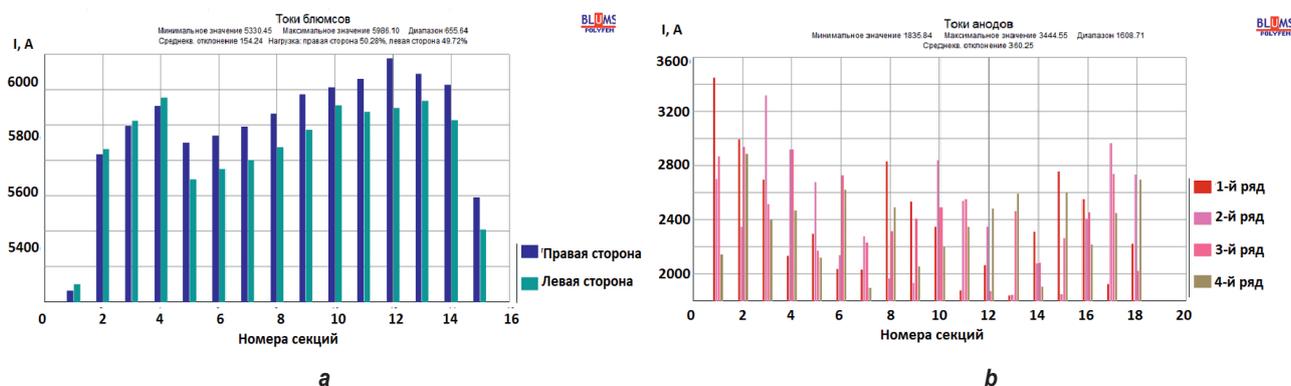
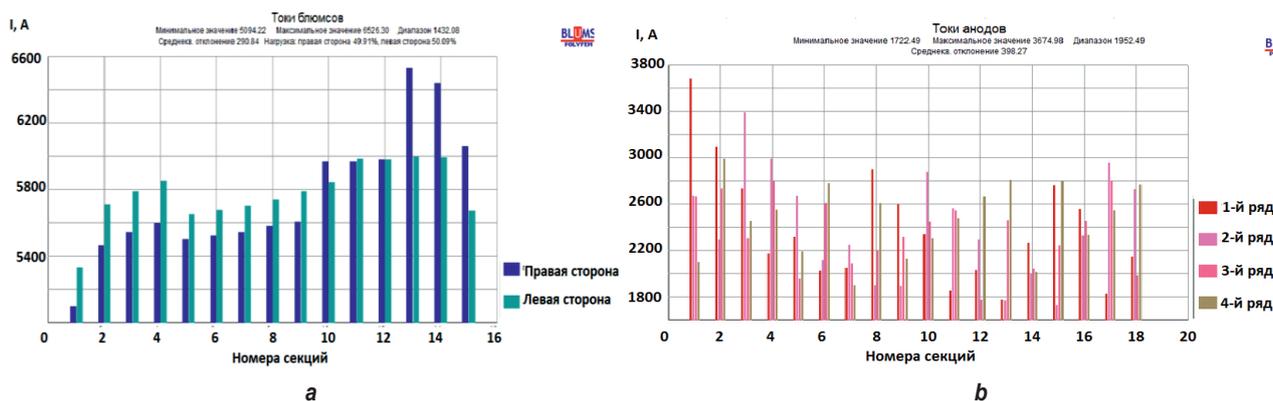
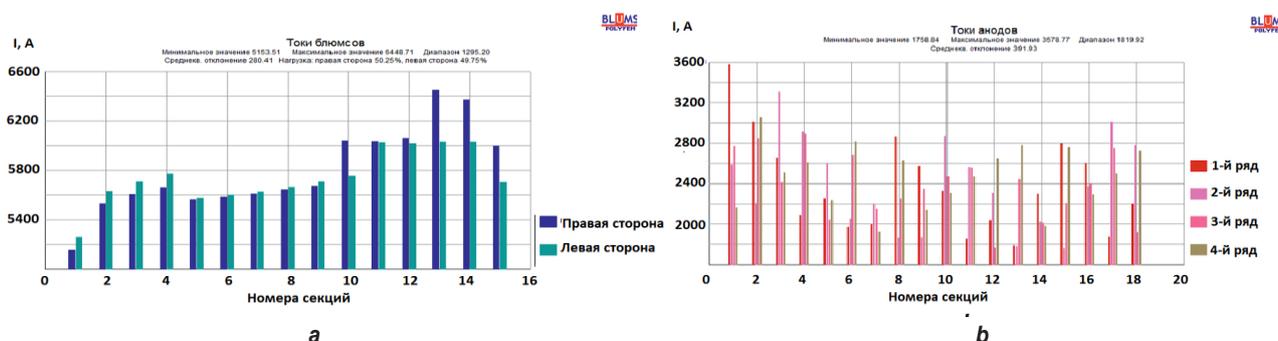


Рис. 16. Рассчитанное токораспределение по 1 типу ошиновки с закольцованными рядами:
 а – по блумсам; б – по анодным штырям
 Fig. 16. Calculated current distribution using the 1st busbar type with looped rows:
 а – by blums; б – by anode pins



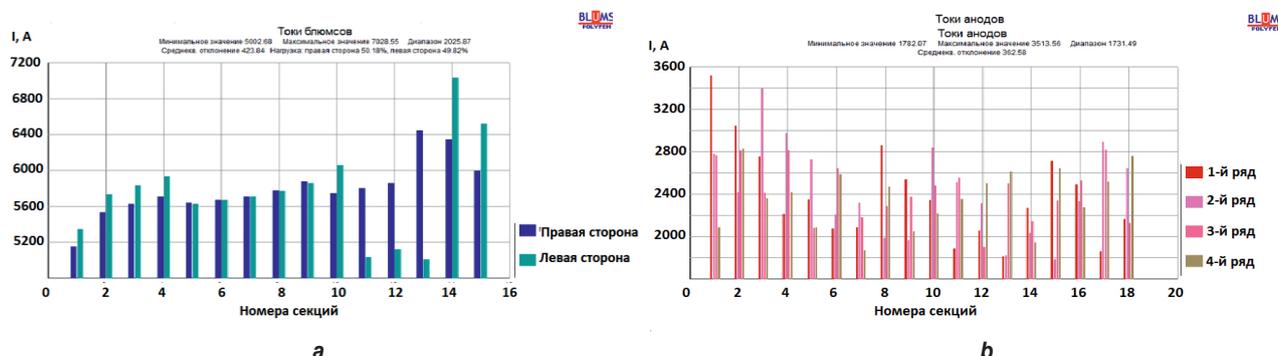
**Рис. 17. Рассчитанное токораспределение с использованием 2-го типа ошиновки (без перемычки):
 a – по блумсам; b – по анодным штырям**
**Fig. 17. Calculated current distribution using the 2nd busbar type (without a bridge):
 a – by blums; b – by anode pins**



**Рис. 18. Рассчитанное токораспределение по 2 типу ошиновки с закольцованными рядами:
 a – по блумсам; b – по анодным штырям**
**Fig. 18. Calculated current distribution using the 2nd busbar type with looped rows:
 a – by blums; b – by anode pins**

При использовании 3-го типа ошиновки (рис. 19, 20) наблюдается наихудшее распределение тока по блумсам, интервалы которого составляют 2026 А (от 5003 до 7029) для варианта без перемычки и 2046 А (от 5040

до 7086) для модификации с закольцованными рядами. Также это единственный вариант ошиновки, на котором незначительно ухудшается токораспределение после установки перемычки между анодными шинами.



**Рис. 19. Рассчитанное токораспределение с использованием 3-го типа ошиновки (без перемычки):
 a – по блумсам; b – по анодным штырям**
**Fig. 19. Calculated current distribution using the 3rd busbar type (without a bridge):
 a – by blums; b – by anode pins**

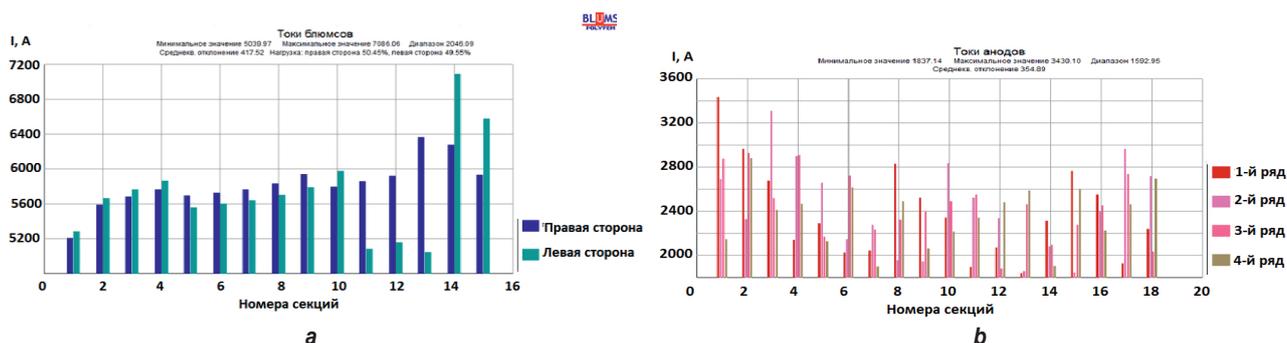


Рис. 20. Рассчитанное токораспределение по 3 типу ошиновки с закольцованными рядами:
 а – по блумсам; б – по анодным штырям
 Fig. 20. Calculated current distribution using the 3rd busbar type with looped rows:
 а – by blums; б – by anode pins

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект «ЭкоСодерберг» занимает ключевое место в компании по модернизации электролизеров с самообжигающимися анодами. Благодаря замене ванн типа С-8БМ (С-8Б) на ЭкоСодерберг удастся снизить экологическую нагрузку на окружающую среду за счет повышения КПД укрытия и уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу.

При изучении особенностей магнетогидродинамики было проведено математическое моделирование электролизеров С-8БМ для выявления особенностей в работе при использовании ошиновки 3-х разных типов.

Показано, что на электролизере с 1-м типом ошиновки достигается лучшее токораспределение по блумсам с диапазонами ~757 А (для варианта без перемычки) и ~656 А (для модернизированного варианта с замкнутыми рядами), а также анодным штырям с диапазонами ~1754 А и ~1609 А соответственно.

При использовании 2-го типа ошиновки математическое моделирование показало, что

наблюдается худшее токораспределение по анодным штырям: диапазон составляет ~1953 А и ~1820 А для вариантов без перемычки и с ней.

При использовании 3-го типа ошиновки наблюдается наихудшее распределение тока по блумсам, интервалы которого составляют 2026 А (для варианта без перемычки) и 2046 А (для модификации с закольцованными рядами). Также это единственный вариант ошиновки, на котором незначительно ухудшается токораспределение после установки перемычки между анодными шинами.

Таким образом, можно сделать вывод, что на 1-м типе ошиновки наблюдается более равномерное токораспределение и выравненные скорости циркуляции и перекося металла, на 3-м типе – более скомпенсированное магнитное поле. Полученные результаты незначительно отличаются друг от друга, что позволяет вносить конструкционные изменения на все виды предлагаемых типов ошиновки при модернизации электролизеров типа С-8Б и С-8БМ на ЭкоСодерберг.

Список источников

- Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process // Metals. 2023. Vol. 13. Iss. 9. P. 1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
- Шелелев И.И., Головных Н.В., Сахачев А.Ю., Жижаев А.М., Котлягин А.Г. Улучшение качества спека известняково-нефелиновой шихты путем ввода в нее гипсоангидритового техногенного сырья // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5. С. 225–239. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>. EDN: XPSDUL.
- Александров А.В., Немчинова Н.В. Влияние модульных характеристик спека на извлечение глинозема при переработке нефелиновых руд // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2022. Т. 22. № 4. С. 21–30. <https://doi.org/10.14529/met220403>. EDN: GEQNXN.
- Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // Non-ferrous Metals. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV.

5. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014 // *Light Metals* / eds. M. Huland. Cham: Springer, 2015. P. 757–762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128. EDN: VADMNZ.
6. Григорьев В.Г., Тепикин С.В., Кузаков А.А., Пьянкин А.П., Тимкина Е.В., Пинаев А.А. Автоматическая подача сырья в производстве алюминия // *Вестник Горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2017. № 39. С. 97–104. EDN: YVARCO.
7. Радионов Е.Ю., Немчинова Н.В., Третьяков Я.А. Моделирование магнитогидродинамических процессов в электролизерах при получении первичного алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 7. С. 112–120. EDN: UBLOMB.
8. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development // *Light Metals* / eds. C. Chesonis. Cham: Springer, 2019. P. 553–563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUYU.
9. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter // *Light metals* / eds. B.A. Sadler. Cham: Springer, 2013. P. 573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>. EDN: XXNZDN.
10. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Vologin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021. Vol. 62. P. 659–667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
11. Фризоргер В.К., Шадрин В.Г., Пузин А.В., Виноградов А.М., Аникин В.В., Моренко А.В. [и др.]. Совершенствование системы удаления газов на электролизерах экологического Содерберга // *Алюминий Сибири: сб. науч. статей XVIII Междунар. конф. (г. Красноярск, 5–7 сентября 2012 г.)*. Красноярск: Версо, 2012. С. 408–415.
12. Зенкин Е.Ю., Гавриленко А.А., Немчинова Н.В. О переработке отходов производства первичного алюминия ОАО «РУСАЛ БРАТСК» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 3. С. 123–132. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>. EDN: YHPQYD.
13. Чалых В.И., Немчинова Н.В., Аюшин Б.И., Богданов Ю.В. Техничко-экономическое сравнение электролизеров с обожженными анодами и самообжигающимися анодами и верхним токоподводом // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2005. № 2. С. 21–26. EDN: JVUCFH.
14. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В. [и др.]. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. № 1. С. 19–30. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>. EDN: XWTXTX
15. Куликов Б.П., Сторожев Ю.И. Пылегазовые выбросы алюминиевых электролизеров с самообжигающимися анодами. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. 268 с. EDN: SUPCCN.
16. Пат. № 2443804, Российская Федерация, С25С 3/22. Устройство для сбора и удаления газов из алюминиевого электролизера Содерберга / Г.В. Архипов, В.Х. Манн, В.В. Пингин, В.К. Фризоргер, Я.А. Третьяков, А.Г. Архипов, В.Г. Шадрин; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». № 2010141366/02. Заявл. 08.10.2010; опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6.
17. Немчинова Н.В., Радионов Е.Ю., Сомов В.В. Исследование влияния формы рабочего пространства на МГД-параметры работы электролизера производства алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 1. С. 169–178. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-169-178>. EDN: YVBIOT.
18. Пат. № 2516415, Российская Федерация, С25 С3/16 Способ замены четырехстоячной ошиновки на трехстоячную в алюминиевом электролизере Содерберга / В.В. Пингин, В.В. Платонов, Е.Ю. Радионов, Я.А. Третьяков; заявитель и патентообладатель ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». № 2012149277. Заявл. 19.11.2012; опубл. 20.05.2014. Бюл. № 13.
19. Пат. № 2505626, Российская Федерация, С25С 3/16. Ошиновка электролизера для получения алюминия / В.В. Пингин, В.В. Платонов, Е.Ю. Радионов; заявитель и патентообладатель ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». № 2012145698/02. Заявл. 25.10.2012; опубл. 27.01.2014. Бюл. № 6.
20. Радионов Е.Ю. Расчет магнитогидродинамических параметров работы электролизеров с различным типом катодного кожуха // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. С. 684–693. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>. EDN: LRHDLJ.
21. Деркач А.С., Скворцов А.П., Цибуков И.К., Шрамко В.А., Калимов А.Г., Сведенцев М.Л. Трехмерная модель расчета МГД-параметров алюминиевого электролизера // *Цветные металлы*. 2000. № 1. С. 30–34.
22. Vojarovics V. MHD of aluminium cells with the effect of channels and cathode perturbation elements // *Light metals* / eds. B.A. Sadler. Cham: Springer, 2013. P. 609–614. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65136-1_104.
23. Бояревич В.В., Калис Х.Э., Миллере Р.П., Пагодина И.Э. Математическая модель для расчета параметров алюминиевого электролизера // *Цветные металлы*. 1988. № 7. С. 63–66.
24. Крюковский В.А., Миневиц Л.И. Применение математического моделирования в оптимизации магнитных полей электролизеров // *Цветные металлы*. 1996. № 6. С. 40–42.
25. Меерович Э.А. Магнитное поле и электродинамические силы в зоне расплава мощных электролизеров алюминия. М.: Изд. АН СССР, 1962. 124 с.
26. Пингин В.В. Исследование теплоэлектрических и магнитогидродинамических явлений в электролизерах // *Алюминий Сибири-96: сб. тр. Междунар. научного семинара (г. Красноярск, сентябрь 1997 г.)*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 1997. 315 с.

27. Бегунов А.И. Газогидродинамика и потери металла в алюминиевых электролизерах. Иркутск: Иркутский ун-т, 1992. 286 с.
28. Fraser K.J., Billingham D., Chen K.L., Keniry J.T. Some application of mathematical modelling of electric current distributions in Hall-Heroult cells // *Light Metals*. Cham: Springer, 1989. P. 219–226.
29. Пингин В.В., Третьяков Я.А., Радионов Е.Ю., Немчинова Н.В. Перспективы модернизации ошиновки электролизера С-8БМ (С-8Б) // *Цветные металлы*. 2016. № 3. С. 35–41. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>. EDN: WBFSDP.
30. Кирко В.И., Галемов Т.Т., Петров А.М. Соединение алюминиевых деталей ошиновки электролизера «гибкий катодный спуск – катодная шина» // *Журнал Сибирского федерального университета*. Серия: Техника и технология. 2013. Т. 6. № 5. С. 534–542. EDN: RAQRXV.
31. Пат. № 2295589, Российская Федерация, С25С 3/06, С25С 3/16. Ошиновка алюминиевых электролизеров / В.В. Васильевич, Ю.В. Богданов, Б.И. Аюшин, Л.В. Рагозин, Ю.В. Шемет, А.М. Надточий, О.М. Сапожников, А.В. Ермаков; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский, конструкторский и проектный институт алюминийевой и электродной промышленности» (ОАО «СибВАМИ»). № 2005129387. Заявл. 20.09.2005; опубл. 20.03.2007. Бюл. № 8.
32. Пат. № 2682507, Российская Федерация, С25С 3/12. Способ снижения контактного напряжения в алюминиевом электролизере / П.В. Поляков, С.Г. Шахрай, И.И. Пузанов, Ю.Г. Михалев, А.В. Завадяк, В.А. Крюковский, Ю.Н. Попов, А.А. Поляков, А.С. Ясинский; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2018101004. Заявл. 10.01.2018; опубл. 19.03.2019. Бюл. № 8.
33. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах // *Черная металлургия*. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 9. С. 65–76. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-9-65-76>. EDN: UZUIHY.

References

1. Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process. *Metals*. 2023;13(9):1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
2. Shepelev I.I., Golovnykh N.V., Sakhachev A.Yu., Zhyzhaev A.M., Kotlyagin A.G. Improving limestone-nepheline charge sinter quality by gypsum anhydrate technogenic raw material introduction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(5):225-239. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>. EDN: XPSDUL.
3. Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V. Impact of modular sinter characteristics on the extraction of alumina when processing nepheline ores. *Vestnik Yuzhno Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya = Bulletin of the South Ural state University. Series: Metallurgy*. 2022;22(4):21-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/met220403>. EDN: XPSDUL.
4. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-ferrous Metals*. 2018;2:11-16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV.
5. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's smelters 2012–2014. In: Huland M. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2015, p. 757-762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128. EDN: VADMNZ.
6. Grigoriev V.G., Tepikin S.V., Kuzakov A.A., Pyankin A.P., Timkina E.V., Pinaev A.A. Automatic feed of raw materials in aluminum production. *Vestnik Gorno-metallurgicheskoy sekcii Rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2017;39:97-104. (In Russ.). EDN: YVARCO.
7. Radionov E.Yu., Nemchinova N.V., Tretiakov Ya.A. Magnetohydrodynamic processes modeling in electrolyzers at primary aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;7:112-120. (In Russ.). EDN: UBLOMB.
8. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development. In: Chesonis C. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2019, p. 553-563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUYU.
9. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter. In: Sadler B.A (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2013, p. 573-576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>. EDN: XXNZDN.
10. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Vologin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62:659-667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
11. Frizorger V.K., Shadrin V.G., Puzin A.V., Vinogradov A.M., Anikin V.V., Morenko A.V., et al. Improving a gas removal system at ecological Soderbergh electrolyzers. In: *Alyuminij Sibiri: sbornik nauchnyh statej XVIII Mezhdunarodnoj konferencii = Aluminum of Siberia: collected scientific articles of the 18th International Conference*. 5–7 September 2012, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Verso; 2012, p. 408-415. (In Russ.).
12. Zenkin E.Yu., Gavrilenko A.A., Nemchinova N.V. On «RUSAL Bratsk» JSC primary aluminum production waste recycling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(3):123-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>. EDN: YHPQYD.
13. Chalykh V.I., Nemchinova N.V., Ayushin B.I., Bogdanov Yu.V. Technical and economic comparison of electrolyzers with baked anodes and self-baking anodes and upper current carrier. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. NonFerrous Metallurgy*. 2005;2:21-26. (In Russ.). EDN: JVUCFH.

14. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., et al. Increasing covering efficiency of Soderberg cells. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;1:19-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>. EDN: XWTXTX.
15. Kulikov B.P., Storozhev Yu.I. *Dust and gas emissions from aluminum electrolyzers with self-baking anodes*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2012, 268 p. (In Russ.). EDN: SUPCCH.
16. Arkhipov G.V., Mann V.H., Pingin V.V., Frizorger V.K., Tretyakov Ya.A., Arkhipov A.G., Shadrin V.G. *Device for gas collection and removal from Soderbergh aluminum electrolyzers*. Patent RF, no. 2443804; 2012. (In Russ.).
17. Nemchinova N.V., Radionov E.Yu., Somov V.V. Studying working space shape effect on electrolyzer MHD parameters at aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):169-178. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-169-178>. EDN: YYBIOT.
18. Pingin V.V., Platonov V.V., Radionov E.Yu., Tretyakov Ya.A. *Method of replacing a four-pin busbar with a three-pin one in an aluminum Soderberg electrolyzer*. Patent RF, no. 2516415; 2014. (In Russ.).
19. Pingin V.V., Platonov V.V., Radionov E.Yu. *Electrolyzer busbar for aluminum production*. Patent RF, no. 2505626; 2014. (In Russ.).
20. Radionov E.Yu. Calculation of magnetohydrodynamic electrolyser parameters with various types of cathode shell. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(3):684-693 P. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>. EDN: LRHDLJ.
21. Derkach A.S., Skvortsov A.P., Tsubukov I.K., Shramko V.A., Kalimov A.G., Swedentsev M.L. A three-dimensional model for calculating aluminum electrolyzer MHD parameters. *Tsvetnye Metally*. 2000;1:30-34. (In Russ.).
22. Bojarevics V. MHD of aluminium cells with the effect of channels and cathode perturbation elements. In: Chesonis C. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2013, p. 609-614. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65136-1_104.
23. Boyarevich V.V., Kalis H.E., Miller R.P., Pagodina I.E. A mathematical model for calculating the parameters of an aluminum electrolyzer. *Tsvetnye Metally*. 1988;7:63-66.
24. Kryukovsky V.A., Minevich L.I. Using mathematical modeling in electrolyzer magnetic field optimization. *Tsvetnye Metally*. 1996;6:40-42. (In Russ.).
25. Meerovich E.A. *Magnetic field and electrodynamic forces in the melt zone of high-power aluminum electrolyzers*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1962, 124 p. (In Russ.).
26. Pingin V.V. Study of thermoelectric and magnetohydrodynamic phenomena in electrolyzers. In: *Aluminum of Siberia-96: proceedings of the International Scientific Seminar*. September 1997, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 1997, 315 p. (In Russ.).
27. Begunov A.I. *Gasohydrodynamics and metal losses in aluminium electrolytic cells*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 1992, 286 p. (In Russ.).
28. Fraser K.J., Billingham D., Chen K.L., Keniry J.T. Some application of mathematical modelling of electric current distributions in Hall-Heroult cells. In: *Light Metals*. Cham: Springer; 1989, p. 219-226.
29. Pingin V.V., Tretyakov Ya.A., Radionov E.Yu., Nemchinova N.V. Modernization prospects for the bus arrangement of electrolyzer S-8BM (S-8B). *Tsvetnye Metally*. 2016;3:35-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>. EDN: WBFSDP.
30. Kirko V.I., Galemov T.T., Petrov A.M. Aluminum busbar connection parts of the cell «Flexible cathode descent – cathode bus». *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2013;6(5):534-542. (In Russ.). EDN: RAQRXV.
31. Vasilyevich V.V., Bogdanov Yu.V., Ayushin B.I., Ragozin L.V., Shemet Yu.V., Nadochiy A.M., Sapozhnikov O.M., Ermakov A.V. *Busbar arrangement of aluminum electrolyzers*. Patent RF, no. 2295589; 2007. (In Russ.).
32. Polyakov P.V., Shakhray S.G., Puzanov I.I., Mikhalev Yu.G., Zavadyak A.V., Kryukovsky V.A., Popov Yu.N., Polyakov A.A., Yasinsky A.S. *A method to reduce contact voltage in an aluminum electrolyzer*. Patent RF, no. 2682507; 2019. (In Russ.).
33. Troitskiy O.A. Electroplastic effect in metals. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2018;9:65-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-9-65-76>. EDN: UZUIHY.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пинаев Андрей Александрович,
заместитель директора
по природоохранным технологиям,
ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,
660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1, Россия
Andrey.Pinaev@rusal.com

Andrey A. Pinaev,
Deputy Director
for Environmental technologies,
RUSAL Engineering and Technology Center LLC,
37/1, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia
Andrey.Pinaev@rusal.com

Радионон Евгений Юрьевич,
кандидат технических наук,
начальник отдела разработки
ошиновки и измерений,
ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,
660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1, Россия
evgeniy.radionov@rusal.com

Evgeniy Yu. Radionov,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Busbars and Measurements Development
Department,
RUSAL Engineering and Technology Center LLC,
37/1, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia
evgeniy.radionov@rusal.com

Орлов Иван Александрович,
менеджер отдела разработки
ошиновки и измерений,
ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,
660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1, Россия
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
fainafaina262@gmail.com

Ivan A. Orlov,
Manager of the Busbars and Measurements Development
Department,
RUSAL Engineering and Technology Center LLC,
37/1, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia;
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
fainafaina262@gmail.com

Немчинова Нина Владимировна,
д.т.н., профессор,
заведующая кафедрой металлургии
цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Nina V. Nemchinova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Вклад авторов

Пинаев А.А. осуществлял руководство исследованиями. Радионов Е.Ю. предложил идею для исследований, руководил моделированием и вводом исходных данных для моделирования, обобщил полученные результаты, сделал выводы. Орлов И.А. выполнил подбор исходных данных для моделирования, литературных источников по тематике исследования и провел с помощью компьютерных программ моделирование электролизеров с различными видами ошинок. Немчинова Н.В. осуществила подбор литературных источников по тематике исследования и провела общее редактирование текста рукописи.

Contribution of the authors

Pinaev A.A. supervised the research. Radionov E.Yu. put forward an idea for research, supervised the modeling and input of initial modeling data, summarized the results obtained and derived conclusions. Orlov I.A. selected initial modeling data, literary sources on the research topic, carried out computer modeling of electrolyzers with various types of busbars. Nemchinova N.V. selected literary sources on the research topic and performed general editing of the manuscript.

Конфликт интересов

Немчинова Нина Владимировна является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Conflict of interests

Nina V. Nemchinova has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 15.02.2024 г.; принята к публикации 20.02.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 20.01.2024 г.; approved after reviewing 15.02.2024 г.; accepted for publication 20.02.2024 г.