

РАЗДЕЛ VIII

---

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
В МЕТАЛЛУРГИИ  
И ГОРНОМ ДЕЛЕ

## ИННОВАЦИИ ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ АЛЮМИНИЯ

С.А. Бояков<sup>1</sup>, В.Б. Осипенко<sup>3</sup>, В.Н. Тимофеев<sup>1</sup>, М.В. Первухин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Министерство экономики и регионального развития Красноярского края, Россия

Показана роль цветных металлов в разработке новых материалов и технологий. Обосновывается экономическая необходимость замены алюминиевых проводников на медные, на текущий момент развития мировой экономики. Анализируются объемы рынков сбыта алюминиевого электротехнического алюминия. Приводится описание электротехнологии получения алюминиевого прутка и проволоки с уникальными физико-механическими свойствами. Представлены результаты инжиниринговой деятельности предприятия по внедрению разработанной наукоемкой продукции на российских и зарубежных рынках. Обозначена стратегия дальнейших научных исследований в области энергоэффективности и энергосбережения.

### **Роль цветных металлов в разработке новых материалов и технологий**

Разработка новых материалов и технологии их получения является объективной необходимостью технического и социального развития общества. Новые материалы принято называть материалами XXI века. Без них нельзя представить существенные достижения ни в одном из важных направлений развития науки и техники. Роль новых материалов с каждым годом возрастает. По оценке американских экспертов, в ближайшие 10 лет 90% современных материалов будут заменены принципиально новыми, что приведет к технической революции практически во всех отраслях техники.

По опубликованным данным, сегодня наиболее быстро развивающимися секторами науки являются медико-биологические исследования, далее следуют информационные технологии и третье место занимают новые материалы. В 1998 году расходы только на эти исследования в США значительно превышали расходы на оборону и космические исследования. Материалы, обладающие необычной атомно-кристаллической решеткой и демонстрирующие уникальные свойства, в России получили название ультрадисперсных материалов, а в зарубежной литературе – наноматериалов. Актуальность проблемы производства таких материалов определяется особенностью их физико-химических свойств, позволяющих создавать материалы с качественно и количественно новыми свойствами для использования на практике. Это связано с тем, что для материала таких малых размеров приобретает большее значение квантовая механика, а это существенным образом изменяет механические, оптические и электрические свойства веществ.

Исходными материалами, из которых в цветной металлургии получают алюминиевый прутки и проволоку, являются электрические жаропрочные сплавы направленной кристаллизации, имеющие более высокие удельные прочность и жесткость по сравнению с обычными конструкционными. Задачей проводимых исследований является разработка опытно-промышленной технологии получения из специальных сплавов алюминиевой проволоки диаметром до 100 микрон.

### **Замена медных проводников на алюминиевые – современная мировая тенденция**

Доля России в суммарном мировом производстве 6 основных видов цветных металлов (алюминия, никеля, меди, цинка, свинца, олова) составляет почти 8,5%. Предприятия металлургической промышленности в значительной степени опреде-

ляют жизнеспособность экономики нашей страны, поставляя 95 % конструкционных материалов, без которых невозможны функционирование и технический прогресс в авиакосмической индустрии, машиностроении, атомной энергетике, строительстве и других отраслях.

Как известно, основным проводниковым материалом, используемым для пропускания электрического тока является медь. В настоящее время объем потребления меди в мировой кабельной промышленности в целом составляет около 13 млн. т, \$116 млрд., объем потребления алюминия – порядка 3,5 млн. т, \$9 млрд. (денежные объемы потребления меди и алюминия даны без учета стоимости их переработки в конечную продукцию). Исторически сложилось так, что цены на алюминий всегда были более стабильными (меньше отклонений от базового процентного соотношения), чем цены на медь. Однако, в последние 3 года цена на мировом рынке на медь повысилась в 4,5 раза, а на алюминий выросла лишь в 2 раза, поэтому вновь стал актуальным вопрос замены медных проводников на алюминиевые, не смотря на их недостатки. Если сравнивать по весу два отрезка алюминиевой и медной проволоки одной и той же длины и одного и того же электрического сопротивления, то алюминиевый проводник будет иметь больший диаметр или сечение, но будет легче приблизительно в 2 раза. Поэтому он широко применяется в электротехнике для изготовления проводов, их экранирования и даже в микроэлектронике при изготовлении проводников в чипах. Меньшую электропроводность алюминия ( $37 \text{ Ом}^{-1}$ ) по сравнению с медью ( $63 \text{ Ом}^{-1}$ ) компенсируют увеличением сечения алюминиевых проводников.

### **Потенциальные рынки сбыта электротехнического алюминия**

Объемы применения алюминия в электротехнике достаточно высоки и составляют от 10 до 11 % всего потребления алюминия. При этом уровень расходов топливно-энергетических ресурсов на производство металлопродукции на ведущих российских предприятиях больше в 1,3–1,5 раза, чем в аналогичных зарубежных компаниях. Цена вопроса, по сути повышения конкурентоспособности металлургического комплекса России до мирового уровня, составляет, по расчетам аналитиков 165 млрд. руб. Таков общий ежегодный перерасход энергоресурсов по основным производствам. Чем глубже переработка первичного алюминия и выше цена реализации готовой продукции, тем рентабельнее алюминиевая промышленность в целом. Проволока малых диаметров благодаря низкому весу незаменима для изготовления бортовых и монтажных проводов аэрокосмических летательных аппаратов взамен проводов из меди. Из проволоки диаметром 2–6 мм изготавливаются электрические провода для воздушных линий электропередач (ЛЭП) с высокой механической прочностью, электропроводностью и рабочей температурой, что особенно актуально для повышения пропускной способности и надежности эксплуатации ЛЭП. Специальная алюминиевая проволока используется для сварки и раскисления сталей.

В последние годы многие регионы и города России сталкиваются с проблемой ограниченной пропускной способности ЛЭП. По данным ОАО «ФСК ЕЭС» список регионов пиковых нагрузок включает 16 областей, в числе которых Московская, Ленинградская области, Краснодарский и Пермский край, республика Коми, Карелия и др. Уже сегодня энергопотребление этих районов в несколько раз превышает величины, заложенные в Энергетической стратегии РФ до 2020 года, и потребление энергии в них постоянно растёт. Значительное увеличение спроса на электроэнергию за последние 10 лет требует постоянного расширения или обновления распределительных сетей энергоснабжающих предприятий.

В космонавтике для доставки на низкую орбиту 1 кг веса необходимо затратить от \$1 500 – одноразовая ракетополетель «Протон», до \$40 000 – многоразовый космический корабль Спейс-шаттл. Грузоподъемность последнего достигает 120 т, вес полезного груза 25 т, стоимость запуска 500 млн. дол. США. Учитывая, что бортовая кабельная сеть космических кораблей и летательных аппаратов составляет значительную долю веса объектов и возрастающий мировой спрос на новые летательные аппараты и вывод космических кораблей на геостационарную орбиту и освоение глубокого космоса, становятся понятны перспективы коммерциализации предлагаемых разработок.

### **Электротехнология получения алюминиевого прутка и проволоки**

В мировой практике металлообработки в последнее время особую актуальность приобрели технологии для получения изделий из цветных металлов и сплавов по схеме обработки в одной непрерывной линии расплав-кристаллизация-формоизменение. За рубежом при производстве длинномерных пресс-изделий небольшого сечения из алюминиевых сплавов в качестве базовых технологий используются технологии нового поколения, названные технологиями непрерывного прессования (Конформ) и непрерывного литья-прессования (Кастер). Модульное оборудование, предназначенное для реализации таких технологий, характеризуется высокой мобильностью, гибкостью перехода от одного типоразмера к другому, а также сравнительно высокой производительностью. Однако эти установки имеют ряд недостатков, которые существенно ограничивают возможности данного метода непрерывного прессования. Следует отметить, что для деформации даже мягких алюминиевых сплавов требуются большие энергозатраты. Свойства пресс-изделий характеризуются неоднородностью из-за неравномерной деформации, что не вполне приемлемо, например, для продукции электротехнического назначения. Что касается пресс-изделий из твердых алюминиевых сплавов, то их производство на данном виде оборудования весьма затруднительно. Большой вклад в разработку методов обработки цветных металлов, получение специальных сплавов из них, технологий получения заготовок и т. д. внесли ученые Сибирского федерального университета [1].

В предлагаемом проекте задача получения ультрадисперсных структур алюминиевых заготовок из специальных сплавов решается посредством электромагнитных технологий [2] и устройств [3]. Успехи в этом направлении связаны с установлением зависимостей особых свойств материалов от способов их изготовления и обработки. В последние годы развиваются технологии, в основе которых лежат процессы самоорганизации диссипативных структур. Такие технологии называют экстремальными, поскольку в них внешние силы или потоки энергии превышают пороговые значения, что позволяет малыми затратами достигать больших результатов.

Для труднодеформируемых алюминиевых сплавов для получения уникальных физико-механических свойств круглого литого прутка диаметром 5–15 мм будет использована технологическая схема с электромагнитным кристаллизатором. Электромагнитный кристаллизатор – индуктор обеспечивает удержание расплава в заданных границах, способствует прямой подаче воды в область кристаллизации, что в разы интенсифицирует тепло-массообменные процессы при кристаллизации слитка. Это обеспечивает ударную кристаллизацию, что предопределяет интенсивный рост кристаллов и ультрадисперсную структуру получаемых образцов.

### **Проволока для космоса – продукт глубокой переработки алюминия**

В ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», создана лабораторная установка для получения алюминиевого прутка и проволоки в электромагнитном кристаллизаторе (рис. 1).

Из мерных алюминиевых заготовок  $\varnothing 7,0-8,0$  мм, полученных на лабораторной установке из сплава 01417 на текущий момент изготовлено 2,0 кг алюминиевой проволоки  $\varnothing 0,120$  мм (рис. 2). Физико-механические свойства мерных заготовок позволили получить опытные образцы проволоки диаметром до 0,10 мм и повысить выпуск годного до 80%. По некоторой информации, проволока уже использовалась при строительстве самолета-амфибии БЕ-200. Цена такого провода в тысячу раз превышает цену первичного алюминия.

Проведен металлографический и химический анализы прутковой заготовки, полученной методом литья в электромагнитный кристаллизатор. Проведено сравнение полученных характеристик с лучшими зарубежными и российскими аналогами [4]. Сравнительные характеристики приведены в таблице 1.

Испытания нашей продукции производилось на испытательной машине «Schenk-100» во Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. Сравнения показывают, что имея почти в два раза большую электропроводность по сравнению с французскими проводами и аналогичном уровне



Рис. 1. Лабораторная установка для получения алюминиевого прутка и проволоки в электромагнитном кристаллизаторе



Рис. 2. Изготовленная алюминиевая проволока

Таблица 1

**Сравнение с аналогами**

Марка сплава	Производитель	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Удельное электрическое сопротивление Ом · мм <sup>2</sup> /м
АМГ 1	Filatex (Франция)	165	8	0,0570
01417	ВИЛС (Россия)	160	8	0,03220
01417	НПЦ МГД	202,63–211,68	8,80–11,54	0,03220

электропроводности с проводами ВИЛС наш провод имеет более чем на 30% лучшие прочностные характеристики и, что собственно и обеспечивает уникальность продукции, высокую пластичность при высокой электропроводности. Предлагаемая технология получения алюминиевого прутка и провода позволяет исключить энерго- и трудоемкий процесс прессования, а следовательно снизить потребление электроэнергии и затраты на сложное дополнительное оборудование.

**Инжиниринговая деятельность фирмы.  
Стратегия развития научных исследований**

Компания ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» была создана в ноябре 1990 г. при Красноярском политехническом институте (будущий Сибирский федеральный университет) с целью проведения исследований, разработки, проектирования и организации производства электротехнологического оборудования металлургического назначения.

Сегодня наш профиль – осуществление инжиниринговой деятельности по разработке и доведению до внедрения различного электротехнологического оборудования не только для алюминиевых и металлургических заводов, но и машиностроительных предприятий, включая авиакосмические. Свою научно-производственную деятельность мы начали с создания магнитогидродинамических перемешивателей и оснастили ими действующие стационарные миксеры. В последние десять лет мы разработали и ввели в эксплуатацию ряд поворотных миксеров на Братском, Саяногорском, Новокузнецком, Красноярском, Иркутском и Надвоицком алюминиевых заводах. Эти миксеры также были оснащены электромагнитными МГД-перемешивателями, разработанными в ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики». В 2004 г. подписан лицензионный договор с английской компанией Mechatherm о совместной поставке литейно-плавильного оборудования на заводы России, в рамках которого сегодня, будучи

стратегическим партнером ОК РУСАЛ поставляем миксеры на вновь строящиеся Богучанский и Тайшетский алюминиевые заводы. Всего мы поставили отечественным металлургам свыше сорока комплектов МГД-перемешивателей. Мощности всего этого оборудования позволяют ежегодно выпускать порядка двух миллионов тонн алюминиевых сплавов с высокой добавленной стоимостью.

Из тридцати пяти сотрудников в ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» один – доктор наук (это директор предприятия Тимофеев Виктор Николаевич, академик Российской академии электротехнических наук, профессор, директор предприятия, заведующий кафедрой «Электротехнология и электротехника» Сибирского федерального университета), пятнадцать человек имеют кандидатскую степень. Все диссертации реальные, связанные с разработкой, производством и вводом в эксплуатацию наукоемкого электротехнического оборудования для цветной металлургии и машиностроения. Планируется к защите еще две докторские диссертации и несколько кандидатских. Конечно, количество остепененных не единственный показатель, нужно, чтобы продукция была новая, современная, как сейчас принято говорить – инновационная. Кроме того, с нами сотрудничают преподаватели и аспиранты кафедры «Электротехнология и электротехника» Сибирского федерального университета, а если заказ большой, штат автоматически расширяется: в СФУ очень легко подобрать квалифицированных работников.

Мы постоянно ведем научные исследования – у нас много разработок, которые могут быть интересны металлургическим и другим промышленным предприятиям: оборудование для регулирования скорости подачи расплава алюминия из стационарных миксеров, МГД-перемешиватели жидкой сердцевины в слитках, технология литья в электромагнитные кристаллизаторы, технология получения сплавов с особыми свойствами, в которых воздействие электромагнитного и температурного полей будут синхронизированы с эффектом самоорганизации и побуждать к переходу системы к скачкообразному переходу из одного устойчивого состояния в другое с выделением колоссальной энергии. Есть много других проектов разной степени реализации. – Установлены экспериментальные МГД-перемешиватели в лотках на КрАЗе. Разработанные в нашей фирме МГД перемешиватели для миксеров и печей по лицензионному соглашению с английской фирмой Altek Europe под брендом Siber Force (рис. 3) успешно реализуются в странах дальнего зарубежья на заводах компаний Alcoa, Alcan, Novellis, Hydro Aluminum, Hylamin. Радиационные трубчатые электронагреватели (рис. 4) для миксеров и печей (рис. 5), установок дегазации и фильтрации (рис. 6) также успешно конкурируют с зарубежными аналогами, поставляются на заводы ОК РУСАЛ и по результатам выигранного тендера планируется их поставка для Казахстанского электролизного завода. Раньше подобное оборудование закупалось только за границей (радиационные нагреватели, к примеру, в Швеции), а сегодня мы не только завоевали российский рынок, но и вышли со своей продукцией за границу. Недавно производители алюминия из Индии и Исландии проявили интерес к нашим электронагревателям, сейчас мы над этим активно работаем, используя опыт сотрудничества с зарубежными партнерами. Нам удалось наладить изготовление и проектирование импортозамещающего оборудования – и, как правило, эти разработки не уступают западным образцам по энергоэффективности и энергоэкономичности.

НПЦ Магнитной гидродинамики поставляет перемешиватели в ЮАР, Норвегию, Италию, США. В России мы оснастили ими большинство литейных производств ОК РУСАЛ, поставили первый поворотный электрический миксер на Братский алюминиевый завод, а затем поставили четыре поворотных миксера с МГД-перемешивателями на Новокузнецкий алюминиевый завод. Еще шесть миксеров поставили на Хакасский алюминиевый завод, четыре миксера емкостью 60 тонн на Иркутский, и самые крупные в России миксеры (рис. 7) емкостью 100 тонн – на Красноярский алюминиевый завод.

В Красноярске у нас запросили совершенно новое оборудование для нагрева анодов перед их заливкой чугуном и специалисты НПЦ Магнитной гидродинамики сегодня готовы выполнить этот проект. При этом мы разрабатываем и поставляем оборудование не только для крупных заводов – особое внимание уделяем небольшим предприятиям, где есть маленькие печки, а также рынку вторичного алюминия. Для них изготавливаем подобное оборудование для тех же целей, но по габаритам гораздо меньшее, чем для больших производств.



Рис. 3. МГД перемешиватель «Siber Force»



Рис. 4. Радиационные трубчатые электронагреватели



Рис. 5. Миксеры сопротивления

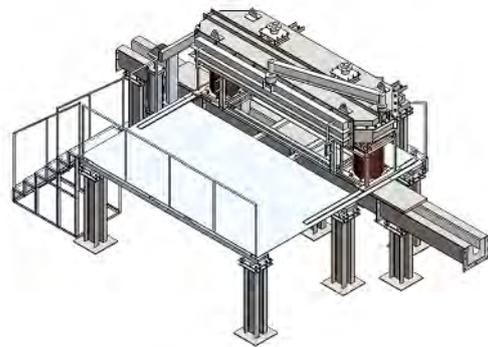


Рис. 6. Установка дегазации и фильтрации



Рис. 7. Миксер емкостью 100 тонн, Красноярский алюминиевый завод

На текущий момент уже производится алюминиевая проволока малого диаметра, но пока в очень ограниченном количестве. Благодаря активному сотрудничеству с заводами, конструкторскими бюро, учеными и специалистами в т.ч. и зарубежными, краевыми властями, которые активно помогают продвигать инновационные решения, мы надеемся постепенно довести эту технологию до промышленных масштабов – может быть, даже в Сколково. В перспективе, планируется выпускать до десятков тонн такой проволоки в год.

Наряду с этим мы изучаем такое природное явление, как самоорганизация структур в гидродинамике и ищем ему практическое применение – например, для выравнивания химического состава и температуры расплава в ваннах миксеров, в жидкой сердцевине кристаллизующегося слитка. Очень интересно понять и использовать как природа малыми затратами достигает больших результатов. За этим будущее энергоэффективной и энегосберегающей экономики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сидельников С. Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография [Текст]/С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Н. Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.
2. Патент РФ № 2395364. В22D11/01. Способ непрерывного литья цилиндрических слитков/В. Н. Тимофеев, М. В. Первухин, Р. М. Хритсинич, Н. В. Сергеев, С. А. Бояков//Опубл. В БИ № 21 от 27.07.10 г.
3. Патент РФ № 86511. В22D11/04. Устройство для непрерывного литья слитков в электромагнитном поле/В. Н. Тимофеев, М. В. Первухин, Р. М. Хритсинич, Н. В. Сергеев, С. А. Бояков//Опубл. В БИ № 25 от 10.09.09 г.
4. Матвеев Ю., Гаврилова В., Баранов В. Легкие проводниковые материалы для авиапроводов//Кабели и провода. 2006. № 5 (300). С. 22–23.

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОДУКЦИИ

*Е. Н. Панов<sup>1</sup>, С. В. Кутузов<sup>2</sup>, А. Я. Карвацкий<sup>1</sup>, И. Л. Шилович<sup>1</sup>, Г. Н. Васильченко<sup>1</sup>,  
Т. Б. Шилович<sup>1</sup>, С. В. Лелека<sup>1</sup>, С. В. Даниленко<sup>1</sup>, И. В. Пулинец<sup>1</sup>, Т. В. Чирка<sup>1</sup>, Т. В. Лазарев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

<sup>2</sup>ОАО«Укрграфит», Украина

### **Введение**

По принятой в литературных источниках классификации [1,2] электроды всех видов подразделяются на четыре типа: угольные, коксовые, графитовые и графитированные. Многостадийная технологическая цепочка производства первых трех типов заканчивается обжигом в обжиговых печах туннельного или многокамерного типа (печах Ридгаммера), а при получении четвертого типа электродов обязательным звеном является передел графитирования, который происходит в высокотемпературных печах Ачесона или Кастнера. Кроме этого, для термической обработки наполнителя электродных изделий применяются специальные прокалочные печи: вращающиеся барабанные, ретортные, электрокальцинаторы и т. д.

В целом технологический процесс (ТП) производства электродов характеризуется чрезвычайной трудоемкостью и энергоемкостью. Так, например, удельные расходы энергии (УРЭ) при обжиге прессованных заготовок составляют порядка 3,9–4,5 ГДж/т, а при графитировании обожженных заготовок – 4500–6500 кВт·ч/т [1,2]. Поэтому из сказанного следует, что вопрос энергосбережения при производстве электродов является чрезвычайно актуальным.

### **Направления разработок технических решений по энергосбережению в электродной промышленности**

Работы, связанные со снижением энергопотребления при производстве электродной продукции, могут быть сформулированы следующим образом:

- совершенствование действующего оборудования путем разработки рациональных регламентов его эксплуатации;
- применение более совершенного в технологическом отношении печного оборудования (частичный переход от вращающихся печей открытого типа на электрокальцинаторы на переделе прокалки наполнителя, переход на печи прямого нагрева на переделе графитирования обожженных заготовок);
- модернизация действующего оборудования и подбор рационального материального и гранулометрического состава теплоизоляционных и пересыпочных шихтовых материалов с целью снижения выхода бракованных изделий и уменьшения УРЭ;
- уменьшение количества стадий ТП и т. д.;

Примером уменьшения количества стадий ТП при производстве графитовых электродов может служить отказ от промежуточной операции производства нуделя в качестве сырья для наполнителя. Новый и более эффективный ТП может быть построен на применении шахтной электропечи с организацией непрерывного процесса графитирования наполнителя – нефтяного кокса. Привлекательность этого подхода обеспечивается уменьшением УРЭ и количества стадий ТП с 8-и (при использовании нуделя) до 4-х. Расчетные оценки показывают, что снижение УРЭ может составлять более чем 1500 кВт·ч/т по сравнению с существующей технологией.

Перечисленные выше направления технических решений требуют как предварительного исследования энергетического состояния производственных агрегатов, так и проверки энергетической эффективности принятых технических решений на численных моделях теплового состояния технологического оборудования.

Методика исследований физических полей в высокотемпературном оборудовании электродного производства основывается на комплексном теоретико-экспериментальном методе, который зарекомендовал себя как высокоэффективный метод при разработке научно обоснованных технических решений в процессе усовершенствования и проектирования энергоресурсосберегающего и экологически безопасного промышленного оборудования [3–6]. При этом основное внимание уделяется численному моделированию физических полей с использованием сложных математических моделей. При этом экспериментальные исследования на действующем промышленном оборудовании и в лабораторных условиях в основном применяется для верификации разработанных численных моделей, задания корректных граничных условий, определения феноменологических коэффициентов (физических свойств материалов) и проверки закономерностей, установленных с помощью численных экспериментов.

Данные промышленных натурных экспериментов также имеют большое самостоятельное значение, которое может выражаться в определении уровня температур на различных стадиях ТП, характеристик внешнего теплообмена, тепловых потерь, составлении энергетических балансов, определении резервов для снижения УРЭ и т. д. Лабораторные экспериментальные исследования проводятся на специализированных установках по определению физических свойств теплоизоляционной шихты [7, 8], температурных интервалов фаз максимального газовыделения прессованных заготовок [9] и т. д.

### Математические модели физических полей в печном оборудовании электродных заводов

Математические модели для описания физических полей в высокотемпературном оборудовании электродного производства могут быть теплоэлектрическими, механическими, газогидродинамическими с учетом сложного теплообмена [3–8].

Достаточно показательной в плане сложности применяемых математических моделей является математическая модель физических процессов проходящих в электрокальцинаторе (рис. 1), основанная на связанной системе дифференциальных уравнений Эйлера [10–14] и теплоэлектрического состояния [4, 6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \rho_i \mathbf{V}_i) = 0, i = \overline{1, 2}; \\ \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i \mathbf{V}_i)}{\partial \tau} + (\varepsilon_i \rho_i \mathbf{V}_i \cdot \nabla) \mathbf{V}_i = -\varepsilon_i \rho_i \nabla p + \beta(\mathbf{V}_i - \mathbf{V}) - \\ - \rho_i [\nabla p_i - G(\varepsilon_1) \nabla \varepsilon_1] + \varepsilon_i \rho_i \mathbf{g}, i, j = \overline{1, 2}; \\ \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i h_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \rho_i h_i \mathbf{V}_i) = -p \left\{ \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \mathbf{V}_i) \right\} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \lambda_{ef, i} \nabla T_i) + \\ + \alpha_{v, ef} (T_i - T_j) + \frac{\delta_i}{\gamma(p_i, T_i)} |\nabla u_i|^2 + q_{v, chem}, i, j = \overline{1, 2}; \\ \frac{\partial H}{\partial \tau} = \nabla \cdot [\lambda_i(T) \nabla T] + \frac{1}{\gamma_i(T)} |\nabla u|^2, i = \overline{3, M}; \\ \nabla \cdot \left[ \frac{1}{\gamma_i(p, T)} \nabla u \right] = 0, i = \overline{1, M}, \end{array} \right.$$

где индексы  $i = \overline{1, 2}$  – относятся к двухфазной среде, т.е. индекс 1 или  $g$  означает газовую фазу, а индекс 2 или  $s$  – сыпучий прокаливаемый материал; индексы  $i = \overline{3, M}$  – относятся к твердым элементам конструкции печи;  $M$  – количество элементов печи, включая двухфазную среду;  $\varepsilon_i, i = \overline{1, 2}$  – объемная доля  $i$ -й фазы  $\left( \sum_{i=0}^2 \varepsilon_i = 1 \right)$ ;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $\mathbf{V}_i, i = \overline{1, 2}$  – вектор скорости газовой и сыпучей фаз, соответственно, м/с;  $p$  – давление, Па;  $\beta_{ij} = -\beta_{ji}, i, j = 1, 2$  – объемный коэффициент передачи момента между газом и твердыми частицами сыпучего слоя и наоборот,

причем  $\beta_{ii} = 0, \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ;  $G(\varepsilon)$  – коэффициент взаимодействия частица-частица [10, 12], Па;

$h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT$  – массовая энтальпия в двухфазной среде, Дж/кг;  $c_p$  – массовая изобарная

теплоемкость, Дж/(кг·К);  $T_{ref}$  – температура отсчета, К;  $p_s$  – давление в сыпучей фазе, Па;  $\lambda_g = f_g(T_g, \varepsilon_g)$ ,  $\lambda_s = f_s(T_s, p_s, \varepsilon_g)$  – эффективная теплопроводность газовой и твердой фаз с учетом радиационного теплообмена, соответственно, Вт/(м·К);  $\alpha_{v,ef}$  – объемный межфазный коэффициент теплопередачи [9], Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $q_{v,chem}$  – объемная теплота

от химических реакций, Вт/м<sup>3</sup>;  $\sigma_i = \begin{cases} 0; i=1; \\ 1; i=2; \end{cases}$   $H = \int_0^T c_p(T) \rho(T) dT$  – объемная энтальпия

в твердых элементах конструкции печи, Дж/м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  $u$  – электрический потенциал, В.

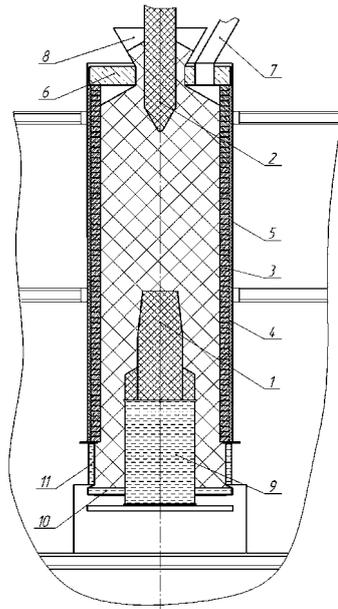


Рис. 1. Схема шахтной электропечи для прокаливания антрацита:  
1, 2 – нижний и верхний электроды;  
3 – огнеупорная футеровка;  
4 – теплоизоляция;  
5 – стальная обечайка;  
6 – бетонная плита;  
7 – газоход;  
8 – питатель;  
9 – водоохлаждаемый пьедестал нижнего электрода;  
10 – разгрузочный стол;  
11 – обечайка с водяным охлаждением

Начальные условия:

$$\begin{cases} T(X) = T_0; \\ u(X) = 0; \\ \mathbf{V}_i(X) = 0, i = \overline{1, 2}; \\ p = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Граничные условия:

– на торцах верхнего (3) и нижнего электродов (4)

$$j_n = \mathbf{n} \cdot (-\chi(T) \nabla u), \quad (3)$$

$$u = 0, \quad (4)$$

где  $\mathbf{n}$  – вектор внешней нормали к граничной поверхности;  $\chi(T) = [\gamma(T)]^{-1}$  – электропроводность материала (Ом·м)<sup>-1</sup>;

– на границах контакта твердых электропроводных элементов конструкции печи для уравнений энергии рассматриваются условия (5) и электропроводности – (6)

$$\begin{cases} \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \{u\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\{T\} = T^+ - T^-$ ;  $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^+ - \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^-$ ;  $\mathbf{q} = -\lambda(T) \nabla T$  – вектор плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\{u\} = u^+ - u^-$ ;  $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{j}^+ - \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{j}^-$ ;  $\mathbf{j} = -\chi(t) \nabla u$  – вектор плотности электрического тока, А/м<sup>2</sup>; для неэлектропроводных элементов система уравнений (6) не учитывается;

– на границах внутренней полости печи (контакт двухфазная среда – твердое тело)

$$\begin{cases} \mathbf{V}_g = 0; \\ \tau_t = \mathbf{n} \cdot (\mu_s \mathbf{V}_s), \end{cases} \quad (7)$$

где  $\tau_t$  – касательное напряжение, Па;  $\mu_s = \mu_{s, \text{col}} + \mu_{s, \text{kin}} + \mu_{s, \text{fr}}$  – динамическая вязкость сыпучего материала [12,14], Па·с;  $\mu_{s, \text{col}}$ ,  $\mu_{s, \text{kin}}$ ,  $\mu_{s, \text{fr}}$  – вязкость, связанная со столкновением частиц, кинетической энергией частиц и с трением между частицами, соответственно, Па·с;

– на границе контакта двухфазная среда – разгрузочный вращающийся стол учитывается ускорение Кориолиса и центробежное ускорение

$$\frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial \tau} = 2[\omega \times \mathbf{V}_i] + [\omega \times [\omega \times \mathbf{r}]], i = \overline{1,2}. \quad (8)$$

где  $\omega$  – частота вращения разгрузочного стола, рад/с;  $\mathbf{r}$  – радиус вектор, м;

– на внешних границах печи задаются условия конвективного теплообмена, описывающие воздушное и водяное охлаждение

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda(T) \nabla T) = \alpha_{\text{ef}}(T) (T - T_{\text{oc}}), \quad (9)$$

где  $\alpha_{\text{ef}}$  – эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{\text{oc}}$  – температура окружающей среды, К;

– на верхнем торце печи в месте питателя сыпучего материала рассматриваются условия (10), а в зоне отсоса газовой фазы – (11)

$$\begin{cases} T_s = T_{s, \text{in}}; \\ G_s = G_{s, \text{in}}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0; \\ p = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где  $G_{s, \text{in}}$  – расход сыпучего материала на входе в печь, кг/с;

– в нижней части печи в месте разгрузки кокса записываются условия (12), а в зоне подсоса воздуха – (13)

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla p = 0, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} T_g = T_{g, \text{in}}; \\ G_g = G_{g, \text{in}}, \end{cases} \quad (13)$$

где  $G_{g, \text{in}}$  – расход воздуха, подсасываемого в печь, кг/с;  $T_{g, \text{in}}$  – температура подсасываемого воздуха, К.

### Методики и приборное обеспечение натуральных измерений

Экспериментальные исследования по измерению температур в высокотемпературном промышленном оборудовании электродного производства основываются на комплексной многоуровневой методике [3, 4, 17]:

- до 1200 °С – 1-й уровень. Термопары хромель–алюмелевые (ХА), термопайнты и тепловизоры;
- до 1800 °С – 2-й уровень. Термопары вольфрам–ренийевые (ВР 5/20) [3];
- до 2500 °С – 3-й уровень. Оптические пирометры (рис. 2), непрямой способ измерения с помощью специального измерительного блока с термопарным зондом (рис. 3).

Для определения плотности тепловых потоков на промышленных установках в интервале температур до 350 °С применяются датчики типа ПТП-04 производства Института технической теплофизики НАН Украины. Для измерения скорости воздушных потоков и отходящих газов и их температуры применяется термоанемометр и анемометр. Для автоматизации проведения экспериментальных исследований используется автоматизированный измерительный комплекс [15].

Для определения теплопроводности и электропроводности огнеупорных и теплоизоляционных материалов в диапазоне температур до 1200 °С в НИЦ «РТ» разработана и создана установка [8], реализующая метод коаксиальных цилиндров (рис. 4). Установка является сертифицированной и позволяют в автоматическом режиме исследовать материалы с теплопроводностью 0,1–5 Вт/(м·К) и удельным электрическим сопротивлением от 20 мкОм·м до 0,001 Ом·м.

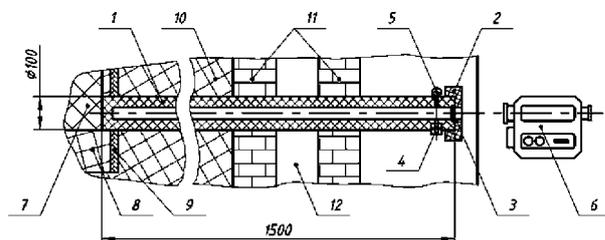


Рис. 2. Схема установки визирной трубы: 1 – визирная графитовая труба; 2 – крышка; 3 – кварцевое стекло; 4 – штуцер для подачи инертного газа; 5 – выпускной клапан; 6 – яркостный пирометр; 7 – заготовка; 8 – керновая пересыпка; 9 – деревянный щит; 10 – теплоизоляция; 11 – боковая стенка печи; 12 – воздушный канал

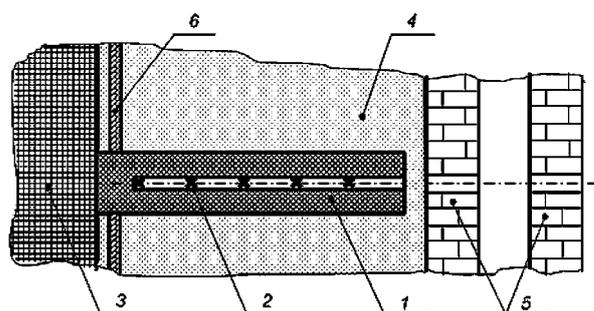
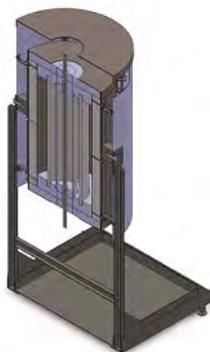


Рис. 3. Схема непрямого измерения температуры торца заготовки: 1 – графитовый цилиндр с осевым отверстием – измерительный блок; 2 – термопарный зонд; 3 – заготовка; 4 – теплоизоляция; 5 – боковая стенка печи; 6 – деревянный щит



а – высокотемпературная печь в сборе б – приборно-измерительный блок

Рис. 4. Экспериментальная установка по определению физических свойств сыпучих материалов

### Результаты исследований и разработок технических решений

#### *П-образная печь графитирования косвенного нагрева постоянным током*

В качестве примера усовершенствования процесса графитирования обожженных заготовок можно рассмотреть кампанию графитирования заготовок  $\varnothing 600$  мм с ниппельной подгрузкой, которая проводилась на П-подобной печи постоянного тока ОАО «Укрграфит» [17].

Обозначенная кампания графитирования сопровождалась натурным экспериментом (рис. 5), в котором применялись 22 термопары (10 ВР 5/20 и 14 ХА), яркостный пирометр и термопоинт. Для обработки и записи экспериментальных данных использовался измерительный комплекс [15]. Частота автоматизированных измерений составляла 5 мин, а в ручном режиме (пирометр и термопоинт) – 3 ч.

Целями эксперимента было получение данных по температурам в печи во время кампании графитирования, а также определение погрешности измерения температуры, вызванной визирной трубой и графитовым блоком для не прямых измерений.

Для минимизации влияния графитового блока и визирной трубы на показания термомпар применялась схема установки датчиков, показанная на рис. 5б.

В процессе кампании графитирования проводился контроль температур в следующих зонах печи:

- в заготовках на глубине 700 мм: по оси – для заготовки верхнего ряда (№ 6); по оси и на периферии – для заготовки нижнего ряда (№ 2, 3, 4) (рис 5 в);
- в заготовках верхнего и нижнего рядов по оси на глубине 50 мм (№ 5, 1);
- в торцах заготовок нижнего ряда ХА термомпары (№ 17), яркостный пирометр через визирную трубу и графитовый блок, в котором установлены термомпары (№ 7–10);
- на полу печи на расстоянии 1650 мм от боковой стенки (№ 15);
- на внутренней поверхности боковой стенки печи (№ 16);
- в теплоизоляции сверху керна на глубине 100 мм от поверхности (№ 11–14);
- отходящих газов (№ 18);
- на внешней поверхности газосборного зонта термопоинтом.

Измерения температуры торца заготовки с помощью яркостного пирометра начинались после достижения 1000 °С.

Результаты температурных измерений представлены на рис. 6,7. На этих рисунках также показаны графики электрической мощности в цепи питания печи: высокая сторона – Р<sub>1</sub> и низкая сторона – Р<sub>2</sub>.

Анализ полученных экспериментальных данных показал следующее:

- температура торца заготовки на 62 ч превышает 2600 °С, что вполне достаточно для полного графитирования всего массива заготовок (см. рис. 7 б);
- повышение скорости увеличения температуры заготовок совпадает с началом интенсивного подвода электрической мощности в печь. Наиболее явно это выражено для заготовок нижнего ряда. Скорость увеличения температуры в диапазоне 1600–1800 °С составляет: 150–180 К/ч для оси и периферии заготовки нижнего ряда; 120–160 К/ч для оси заготовки верхнего ряда;
- максимальный градиент температуры составляет: 570 К/м по оси заготовки верхнего ряда; 715 К/м по оси и периферии заготовки нижнего ряда; 760 К/м по радиусу заготовки;
- максимальный перепад температуры между заготовками верхнего и нижнего рядов составляет 420 °С.

Результаты численных экспериментов по определению теплоэлектрического и механического состояний и результирующего теоретического теплового баланса печи Ачесона при графитировании электродов Ø 600 мм с ниппельной загрузкой представлены на рис. 8–11.

Анализ полученных расчетных данных показывает, что:

- на конец кампании при УРЭ свыше 5500 кВт·ч/т достигается 98 % графитирование заготовок [16];
- наибольшая плотность внутренних источников теплоты отвечает максимуму напряженности электрического поля (рис. 8). При этом напряженность электрического поля имеет значительную неравномерность в объеме сыпучих материалов керна;
- в кернах печи во время кампании имеет место достаточно значительная неравномерность температурного поля (рис. 8, 10), что в основном вызвана неравномерностью напряженности электрического поля;
- на нагрев заготовок за весь период кампании расходуется лишь 27 % подведенной электрической мощности (рис. 11), что почти в 1,6 раза меньше чем на нагрев теплоизоляции 43 %;
- достижение большей равномерности температурного поля керна возможно за счет изменения его конфигурации и применения теплоизоляционных материалов с меньшей теплопроводностью;
- повышение доли теплоты, идущей на нагрев заготовок, возможно за счет уменьшения теплопотерь в окружающую среду (например, путем теплоизоляции газосборного зонта [17]) и интенсификации подвода мощности [4];
- наиболее действенным способом уменьшения УРЭ является использование более интенсивного режима подвода электрической мощности. При этом

за счет нестационарности процесса уменьшается доля электрической мощности, затрачиваемая на нагрев теплоизоляции, что соответственно увеличивает КПД печи;

- для определения возможности использования более интенсивного режима ввода электрической мощности в печь необходимо иметь данные по НДС заготовок (рис. 10) [18] в интервале температур 1000–2000 °С, когда в заготовках наиболее интенсивно протекают процессы расширения, перестройка кристаллической решетки и уплотнение структуры материала и др.

Проведенные расчеты показали, что, несмотря на значительную неравномерность температурного поля заготовок (рис. 10 а), условия критерия прочности Мора для хрупкого материала заготовок выполняются –  $\sigma_{\text{ekv M}} = 1$ , что существенно меньше допустимого значения 10 МПа (рис. 10 б). Учитывая полученные значения критерия Мора, а также то, что с ростом температуры прочность графитовых изделий возрастает, очевидно, что для исследованной конфигурации ядра печи существует запас прочности для более интенсивного нагрева заготовок.

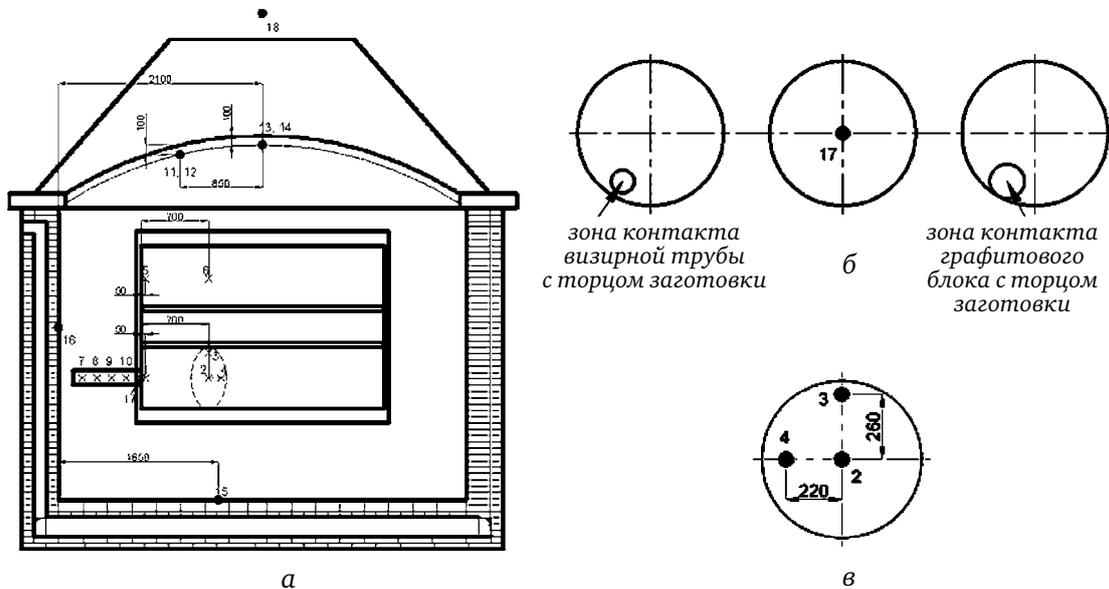


Рис. 5. Схема установки термопар: а – общая схема; б – схема установки визирной трубы и графитового блока; в – схема установки термопар в заготовках нижнего ряда

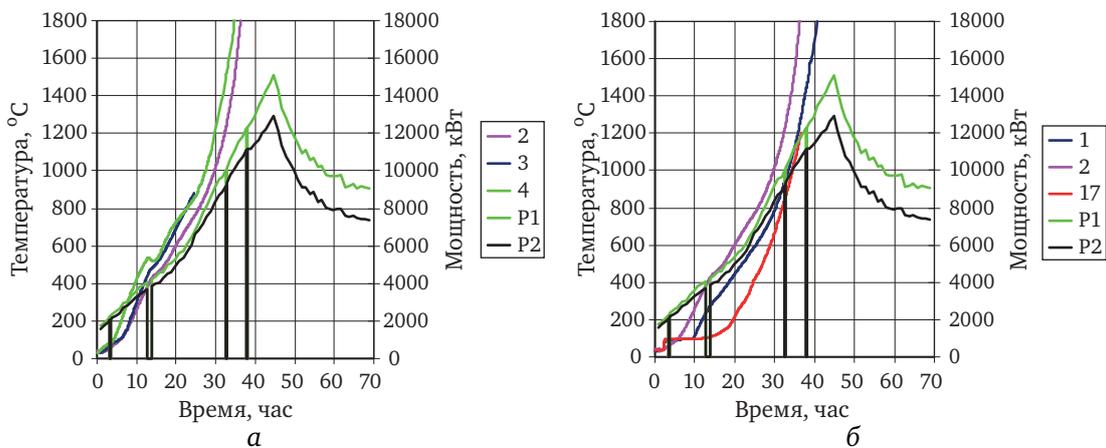


Рис. 6. Температуры в заготовках:

- а – по сечению заготовки нижнего ряда на глубине 700 мм (2 – по оси заготовки, 3 – сверху на расстоянии 260 мм от центра, 4 – сбоку на расстоянии 220 мм от центра);
- б – по оси заготовки нижнего ряда (1 – на расстоянии 50 мм от торца заготовки, 2 – на расстоянии 700 мм от торца заготовки, 17 – торец заготовки)

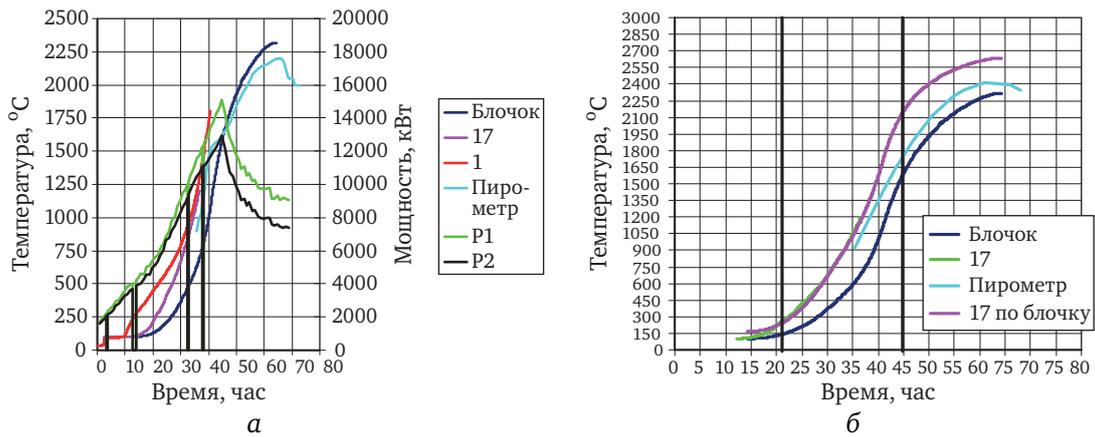


Рис. 7. Температура торца заготовки нижнего ряда, определенная различными способами (а) и с учетом погрешности графитового блока (б)

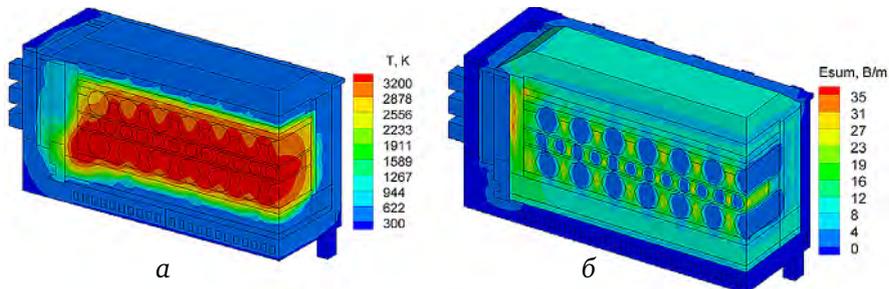


Рис. 8. Теплоэлектрическое состояние кампании печи Ачесона постоянного тока при графитировании заготовок Ø 600 мм на конец ввода электрической мощности  $\tau = 68$  ч: а – температурное поле; б – напряженность электрического поля

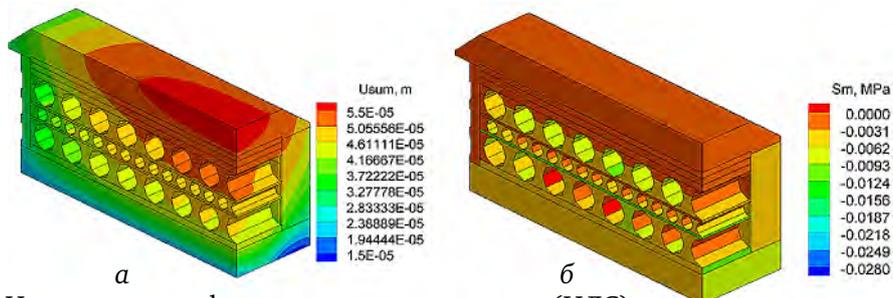


Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние (НДС) сыпучих материалов керна печи Ачесона перед началом кампании графитирования (модель Дракера-Прагера для учета зависимости удельного электрического сопротивления присыпочных материалов от давления): а – суммарные перемещения; б – гидростатическое напряжение

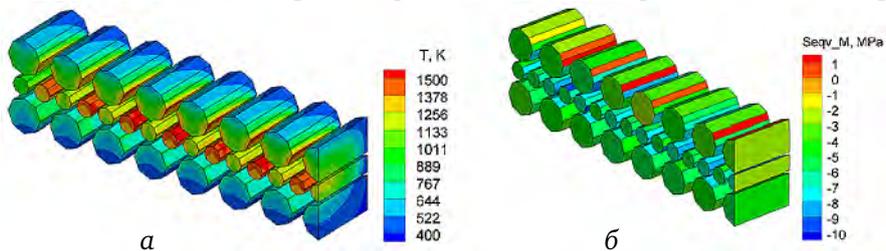


Рис. 10. Температурное поле и НДС заготовок Ø 600 мм на 35 ч графитирования: а – поле температур; б – поле эквивалентных напряжений по Мору

$$\sigma_{\text{ekv M}} = \sigma_1 - \frac{[\sigma_+]}{[\sigma_-]} \sigma_3 \text{ при } [\sigma_-] = 45 \text{ МПа и } [\sigma_+] = 10 \text{ МПа}$$

(для обожженных заготовок по данным сертификата ОАО «Укрграфит»)

Разработанный интенсивный режим ввода мощности внедрен на ОАО «Укрграфит» на печах непрямого нагрева постоянного тока.

### Печь графитирования косвенного нагрева переменным током

При использовании разработанных методик и численных моделей с помощью численного моделирования обоснован сокращенный регламент кампании графитирования при более интенсивном подводе электрической мощности в начале процесса (рис. 12) [3]. Показано, что при графитировании заготовок  $\varnothing 400$  мм обеспечивается 98% графитизация при сокращении продолжительности кампании на 7 ч и уменьшении УРЭ на  $\sim 8$ –11%. Сокращение продолжительности кампании на отдельной печи позволяет провести еще одну дополнительную кампанию в течение года. Разработанный интенсивный режим ввода мощности внедрен на переделе графитации ОАО «Укрграфит».

### Печь графитирования прямого нагрева

Результаты численных экспериментов по определению теплоэлектрического и механического состояний печи прямочного нагрева (Кастнера) при графитировании электродных изделий детально исследовались в [6].



Рис. 11. Расходные статьи теоретического результирующего теплового баланса печи Ачесона

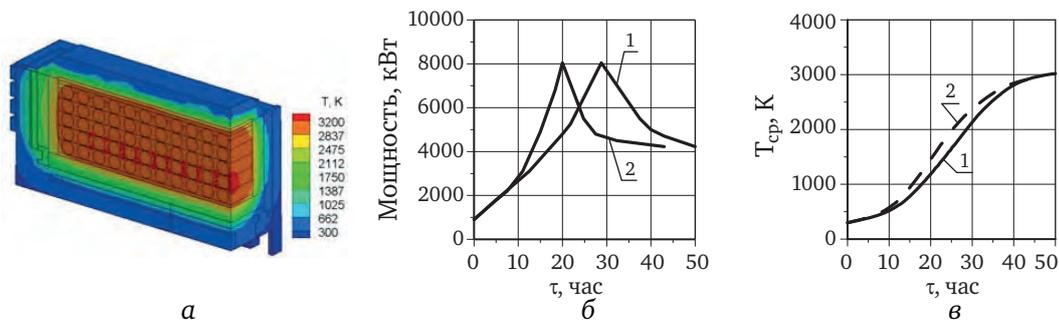


Рис. 12. Температурное поле на конец кампании графитирования заготовок  $\varnothing 400$  мм в печи Ачесона постоянного тока и параметры регламентов подвода мощности в печь: а – температурное поле на конец кампании графитирования ( $\tau = 50$  ч) при интенсивном регламенте подвода мощности (температура заготовок  $T_{min} = 2438$  К,  $T_{max} = 3214$  К); б – регламент подвода электрической мощности в печь (1 – действующий, 2 – с более интенсивным подводом мощности (сокращенный)); в – изменение во времени среднеобъемной температуры заготовок (1 – при действующем регламенте, 2 – при сокращенном регламенте)

### Многокамерная печь обжига зеленых заготовок

Задачами исследований термического режима обжига «зеленых» заготовок в многокамерных печах являлись:

- определение уровня температур в заготовках и газовых каналах;
- оценка скоростей роста температур в заготовках;
- определение перепада температур в заготовках и по камере в целом;
- сопоставление уровней температур под сводом с достигаемыми температурами в камере;
- анализ теплового состояния процесса обжига в целом.

С помощью разработанной численной модели газодинамики и теплового состояния многокамерной печи проведен численный анализ состояния действующей конструкции камеры обжиговой печи (рис. 13). Результаты сопоставления численного эксперимента по среднему уровню температур в заготовках с данными натурального эксперимента представлены на рис. 14.

Результаты расчетов полей температур в заготовках (рис. 14) согласуются с экспериментальными данными, что обосновывает применение разработанной численной модели теплообмена и газодинамики камеры обжиговой печи, для проверки разработанных технических решений включая регламенты ведения процесса обжига.

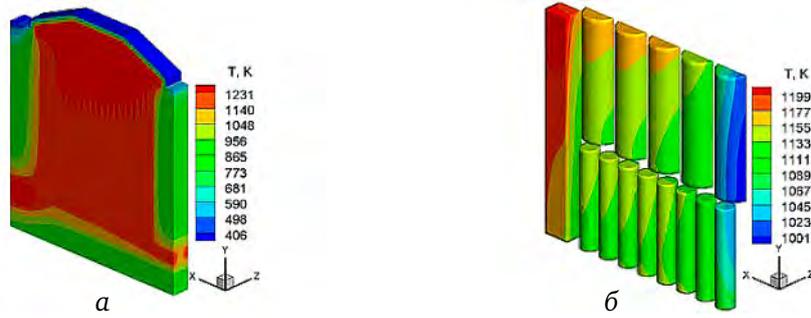


Рис. 13. Температурные поля в кассете многокамерной печи на конец обжига зеленых заготовок: а – по сечению кассеты; б – в заготовках

На основании проведенного анализа экспериментальных данных и результатов численного моделирования теплового состояния действующей конструкции обжиговой печи разработаны комплексные технические решения по ее модернизации, включающие в себя измененную схему загрузки заготовок, геометрию свода и муфельных каналов.

Сопоставление данных численного анализа теплового состояния действующей и модернизированной конструкций печи приведены на рис. 15.

Анализ полученных данных показывает, что предложенная комплексная модернизация позволяет существенно уменьшить неравномерность температурного поля по заготовкам и, следовательно, положительно повлиять на качество конечного продукта.

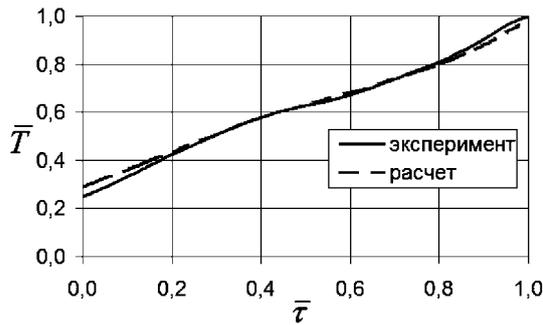


Рис. 14. Сопоставление результатов расчета с данными эксперимента:  
 $\bar{\tau} = \tau/\tau_{\max}$  – безразмерное время;  
 $\bar{T} = T/T_{\max}$  – безразмерная температура;  
 $\tau, T$  – текущее время (с) и температура (К);  $\tau_{\max}, T_{\max}$  – продолжительность обжига и максимальная средняя температура заготовок

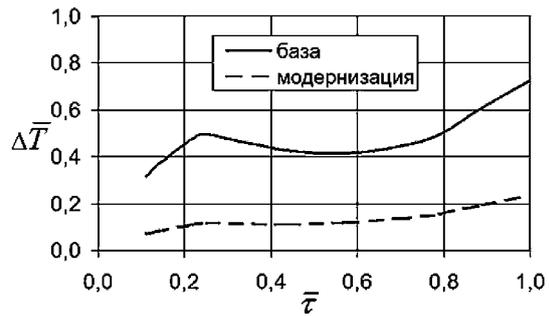


Рис. 15. Сравнение результатов расчетов действующей и модернизированной конструкций печи:  $\Delta \bar{T} = \Delta T/\Delta T_{\max}$  – температурный перепад в заготовках;  $\Delta T$  – текущий перепад температур в заготовках, К;  $\Delta T_{\max}$  – максимальный температурный перепад по заготовкам, К

Разработанная численная модель также позволила определить функциональные зависимости необходимые для создания методики оперативного расчета среднеобъемной температуры обжигаемых заготовок и интенсивности газовыделения в зависимости от температуры под сводом камеры. Созданная методика построена на уравнениях результирующего теплового баланса между теплотой греющих дымовых газов и теплотой аккумулированной пересыпкой и заготовками для одной камеры многокамерной печи:

$$\begin{cases} \sum_{k=2}^M \alpha_{\text{эф.газ-загр}} \left( \bar{T}_{\text{газ-свод}} - \frac{\bar{m}_{\text{пер}} \bar{T}_{\text{пер}} + \bar{m}_{\text{зар}} \bar{T}_{\text{зар}}}{\bar{m}_{\text{пер}} + \bar{m}_{\text{зар}}} \right) S_{\text{газ-свод}} (\tau_k - \tau_{k-1}) = \\ \quad = \sum_{k=2}^M \left[ \bar{m}_{\text{пер}} \bar{c}_{\text{пер}} (T_{\text{пер}}^k - T_{\text{пер}}^{k-1}) + \bar{m}_{\text{зар}} \bar{c}_{\text{зар}} (T_{\text{зар}}^k - T_{\text{зар}}^{k-1}) \right]; \\ \sum_{k=2}^M \frac{(\bar{T}_{\text{пер}} + \bar{T}_{\text{зар}})}{\bar{\tau}_{\text{пер-зар}}} S_{\text{зар}} (\tau_k - \tau_{k-1}) = \sum_{k=2}^M \bar{m}_{\text{зар}} \bar{c}_{\text{зар}} (T_{\text{зар}}^k - T_{\text{зар}}^{k-1}), \end{cases} \quad (14)$$

где  $k$  – номер шага интегрирования по времени;  $M$  – число шагов интегрирования, на которое разбивается весь период обжига;  $\bar{\alpha}_{\text{эф.газ-загр}} = K \frac{\alpha_{\text{эф.газ-загр}}^k + \alpha_{\text{эф.газ-загр}}^{k-1}}{2}$  – средний на временном интервале  $(\tau_k - \tau_{k-1})$  коэффициент теплоотдачи между газом и загрузкой печи (пересыпка + заготовки), Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $K$  – коэффициент формы камеры;  $\bar{T} = \frac{T^k + T^{k-1}}{2}$  – средняя на интервале  $(\tau_k - \tau_{k-1})$  температура дымовых газов, пересыпки и заготовок, К;  $S_{\text{газ-загр}}$  – площадь теплообмена между дымовыми газами и загрузкой печи, м<sup>2</sup>;  $\bar{m} = \frac{m(\tau^k) + m(\tau^{k-1})}{2}$  – средняя на интервале  $(\tau_k - \tau_{k-1})$  масса пересыпки и заготовок, кг;  $\bar{c} = \frac{c(T^k) + c(T^{k-1})}{2}$  – средняя на интервале  $(\tau_k - \tau_{k-1})$  массовая теплоемкость пересыпки и заготовок, Дж/(кг·К);  $r_{\text{пер-загр}} = \frac{r_{\text{пер-загр}}^k - r_{\text{пер-загр}}^{k-1}}{2}$  – контактное термическое сопротивление пересыпка – заготовки, (К·м<sup>2</sup>)/Вт;  $S$  – поверхность заготовок, м<sup>2</sup>.

Из решения системы уравнений (14) размерностью  $2 \times (M - 1)^2$  определяются температуры заготовок и пересыпки на текущий момент времени обжига. Значения величин  $\bar{\alpha}_{\text{эф.газ-загр}}$  и  $\bar{r}_{\text{пер-загр}}$  определяются по данным натурного и численного экспериментов. Причем  $\bar{\alpha}_{\text{эф.газ-загр}}$  является характеристикой конструктивных особенностей камеры печи, а  $\bar{r}_{\text{пер-загр}}$  – загрузки камеры печи.

Предложенная методика, реализованная в соответствующем программном обеспечении, позволяет определять (прогнозировать) следующие технологические параметры камеры многокамерной печи:

- режим обжига по заданной функциональной зависимости температуры дымовых газов под сводом  $\bar{T}_{\text{газ-свод}} = f_T(\tau)$ ;
- рациональную загрузку камеры по заданным массе пересыпки и заготовок, поверхности контакта между пересыпкой и заготовками;
- угар заготовок и пересыпки по заданным функциональным зависимостям потери их массы  $\Delta m = f_m(\tau)$ .

Пример прогноза технологических параметров передела обжига зеленых заготовок с использованием разработанной методики показан на рис. 16.

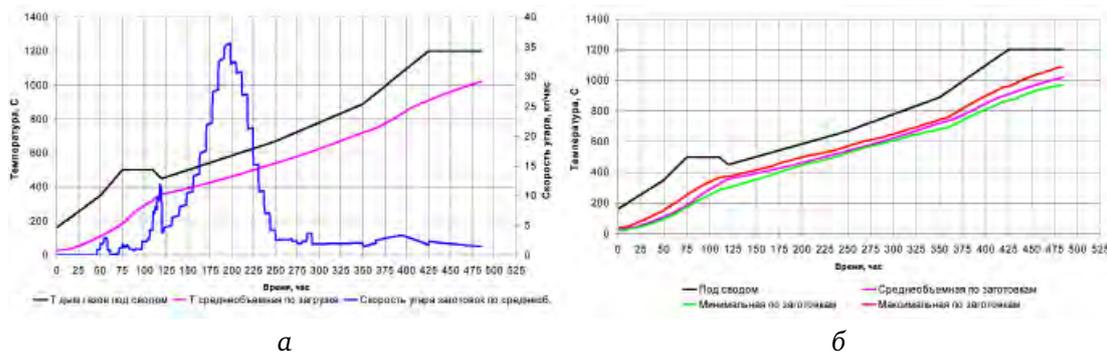


Рис. 16. Результаты прогноза режимных параметров обжига заготовок в многокамерной печи: а – по общей загрузке; б – по заготовкам

## Выводы

Разработана и внедрена в производство комплексная расчетно-экспериментальная методика, использующаяся для оценки эффективности технических решений по энергосбережению в электродном производстве. Промышленная реализация предложенных разработок позволила получить снижение удельного расхода энергии, повышение качества конечного продукта и уменьшение техногенного влияния на окружающую среду.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий/Е.Ф. Чалых. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
2. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов: учеб. пособие [для вузов]/Е.Ф. Чалых. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
3. Physical processes modern investigation methods in power-intensive industrial equipments/E.N. Panov, A. Ya. Karvatsky, I.L. Shilovich [et al.]//Aluminium of Siberia – 2008: XIV Intern. conf. exhib., (Krasnoyarsk, Sept. 10–12, 2008): proceedings of the conference. – Krasnoyarsk: «Verso», 2008. – P. 124–132.
4. Карвацкий А.Я. Теплоэлектричний та механічний стан високотемпературних енергоємних промислових агрегатів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.05.13 «Машини та апарати хімічних виробництв»/А.Я. Карвацкий. – К., 2010. – 40 с.
5. Численное моделирование трехмерных нестационарных температурных полей в печах графитации и алюминиевых электролизерах/А.Я. Карвацкий, С.В. Лелека, С.В. Кутузов [и др.]//Вісник НТУУ «КПІ». Хім. інж., екологія та ресурсозбереження: зб. наук. пр. – 2008. – № 1 (1). – С. 46–51.
6. Расчетное обоснование внедрения технологического процесса прямоочной графитации на ОАО «Укрграфит»/А.Я. Карвацкий, И.Л. Шилович, С.В. Кутузов [и др.]//Вісник НТУУ «КПІ». Хім. інж., екологія та ресурсозбереження: зб. наук. пр. – 2008. – № 1 (1). – С. 42–46.
7. Расчетная оценка применения обратных коэффициентных задач для определения теплофизических свойств теплоизоляционной шихты в интервале температур до 1600 °С/Панов Е.Н., Уразлина О.Ю., Карвацкий А.Я. [и др.]//Алюминий Сибири – 2007: Сб. докладов XIII Междунар. конф. Красноярск, Россия, 11–13 сент. 2007 г. – Красноярск, 2007. – С. 133–141.
8. Первоочередные научно-технические проблемы при повышении энергетической эффективности алюминиевых электролизеров/Панов Е.Н., Карвацкий А.Я., Шилович И.Л. [и др.]//Цветные металлы Сибири – 2009: Сб. докладов первого Междунар. конгресса. Красноярск, Россия, 8–10 сент. 2009 г. – Красноярск, 2009. – С. 204–213.
9. Шилович Т.Б. Експериментальне дослідження впливу температури на процеси коксування набивної маси при обпаленні алюмінієвого електролизера/Т.Б. Шилович//Наукові вісті НУТУ «КПІ». – 2000. – № 6 (14). – С. 41–46.
10. Kuipers J. A. M. Numerical Calculation of Wall-to-Bed Heat-Transfer Coefficients in Gas-Fluidized Beds/J. A. M. Kuipers, W. Prins, W. P. M/van Swaaij//AIChE Journal. – 1992. – Vol. 38, No. 7. – P. 1079–1091.
11. Wen C.-Y. Mechanics of Fluidization/C.-Y. Wen, Y. H. Yu//Chem. Eng. Prog. Symp. Series. – 1966. – Vol. 62. – P. 100–111.
12. Syamlal M. Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed/M. Syamlal, T. J. O'Brien//AIChE Symp. Series. – 1989. – Vol. 85. – P. 22–31.
13. Ogawa S. On the Equation of Fully Fluidized Granular Materials/S. Ogawa, A. Umemura, N. Oshima//J. Appl. Math. Phys. – 1980. – Vol. 31. – P. 483–493.
14. Schaeffer D. G. Instability in the Evolution Equations Describing Incompressible Granular Flow/D. G. Schaeffer//J. Differential Equations. – 1987. – Vol. 66, No 1. – P. 19–50.
15. Панов Е.Н. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов/Е.Н. Панов, С.В. Лелека, М.В. Коржик//ПиКАД. – 2005. – № 2. – С. 28–30.
16. Коржик М.В. Метод оцінювання ступеня графітації/М.В. Коржик, А.І. Жученко//Автоматизація виробничих процесів. – 2004. – № 1. – С. 52–54.
17. Кутузов С.В. Підвищення ефективності роботи печей графітації електродних виробів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.13 «Машини та апарати хімічних виробництв»/С.В. Кутузов. – К., 2007. – 22 с.
18. Интенсификация процесса графитации электродных изделий в печах Ачесона постоянного тока/Е.Н. Панов, М.В. Коржик, А.Я. Карвацкий//Алюминий Сибири – 2007: XIII Междунар. конф., (Красноярск, 11–13 сент. 2007 г.): сб. докл. – Красноярск: «Вона Company», 2007. – С. 331–337.

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Е.А. Головенко<sup>1</sup>, В.А. Горемыкин<sup>2</sup>, И.С. Гудков<sup>2</sup>, Е.С. Кинев<sup>1</sup>, К.А. Михайлов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> ООО «Резонанс», г. Красноярск, Россия

## **Аннотация**

Потребление энергоресурсов во всем мире стремительно растет. На фоне этого энергосбережение и энергетическая эффективность требуют все большего внимания со стороны производителей. Особую актуальность этот вопрос имеет в сфере металлургического производства, которое обычно является крайне энергозатратным. Такой процесс как индукционный нагрев металлов является ярким примером, так как доля стоимости энергоресурсов в себестоимости продукции при таком способе обработки может достигать 50%. Повышение тарифов на электроэнергию требует незамедлительного повышения энергоэффективности нагрева цветных металлов, при игнорировании этого факта конкурентоспособность продукции может остаться под большим вопросом. В работе предлагается новый способ нагрева цветных металлов в качестве альтернативного существующему, который дает эффективность нагрева цветных металлов не более 50%.

**Ключевые слова:** *индукционный нагрев, энергетическая эффективность, нагрев цветных металлов.*

Важнейшей проблемой при индукционном нагреве цветных металлов считается его низкая энергетическая эффективность, в силу наличия у них относительно высокой удельной электропроводности. Коэффициент полезного действия при нагреве меди или алюминия зачастую не превышает 40% при установленной мощности установок достигающей десятков и сотен мегаватт. Проблема считается особенно актуальной в силу непрерывного роста стоимости электрической энергии. Так, например, в РФ стоимость одного кВт/час для промышленных предприятий составляет в среднем 3,0 рубля, то в США – 2, а в Евросоюзе около 5 рублей. Анализ себестоимости готовой продукции показывает, что доля амортизации на тонну готового продукта из цветных металлов значительно ниже доли цены электроэнергии, потраченной на нагрев сырья перед деформацией. Это значит, что при выборе установки индукционного нагрева заказчик в первую очередь должен ориентироваться на его энергетическую эффективность, а уж потом на стоимость технологического оборудования.

В качестве конкурирующих технологий можно назвать:

1. Пламенный нагрев с использованием горелок (нагрев газом или нефтью);
2. Традиционный нагрев в продольном магнитном поле с использованием катушек индуктивности, охватывающих нагреваемый металл (электрический нагрев);
3. Технология нагрева вращением нагреваемого металла в поперечном магнитном поле электромагнита со сверхпроводящей обмоткой (проект ALUHEAT Европейского союза реализован с 2005 по 2008 годы с бюджетом более 2,0 млн. евро).

Наиболее распространенный сегодня за рубежом газовый нагрев имеет эффективность нагрева до 15% и допускает 2% угара нагреваемого металла. При росте цен на электрическую энергию, углеводородное топливо дорожает значительно быстрее. С 1990 по 2005 год стоимость минерального топлива выросла на 70%, а электроэнергия на 25%. Неудивительно, что индукционный нагрев с каждым годом все уверенней вытесняет пламенный (нефтью или газом).

В традиционной технологии индукционного нагрева металлов основные потери электрической энергии происходят в индуктирующем проводе многовиткового соленоидального индуктора, которые выделяются в виде джоулева тепла и отводятся от индуктора охлаждающей его водой [1].

Традиционный нагрев в продольном магнитном поле позволяет добиться эффективности нагрева цветных металлов до 40% и допускает до 0,5% угара нагреваемого металла. Индукционный нагрев предполагает использование переменного напряжения обычно повышенной частоты и основаны на использовании закона электромагнитной индукции. На катушки индуктивности подается перемеренное напряжение, в них возникает электрический ток, который приводит к возникновению продольного (по отношению к оси цилиндрической загрузки) магнитного поля и электродвижущая сила, вызванная изменением магнитного потока во времени согласно закону электромагнитной индукции. Индуцированные в результате непосредственно в загрузке токи вызывают выделение джоулева тепла и как следствие нагрев металла. Но при нагреве цветных металлов основная энергия выделяется в индукторе, а не в нагреваемом металле, что и определяет низкую энергетическую эффективность нагрева. Основными игроком рынка традиционного индукционного оборудования является Inductotherm Group, состоящий из 40 компаний, стратегически расположенных по всему миру. Помимо того, что Inductotherm Group обладает передовыми технологиями индукционного нагрева и значительным влиянием на рынке, в группе имеется компания Vanyard, специализирующаяся на технологии индукционного нагрева цветных металлов, предоставляя решения по нагреву алюминия, меди, латуни и редких сплавов.

Если КПД индукционного нагрева магнитных материалов с относительно низкой удельной электропроводностью может достигать 90%, то для нагрева цветных металлов не достигает 50%. Поэтому для нагрева цветных металлов много научными центрами мира ведутся разработки альтернативных способов индукционного нагрева цветных металлов.

Например, консорциум научных центров и промышленных предприятий из Германии, Италии, Финляндии, Польши, Чехии, Норвегии во главе с Институтом электротермических процессов (ETP) Южносаксонского университета имени Лейбница в Ганновере и координатором SINTEF Energy Research (Норвегия) с 2005 по 2008 год безуспешно разрабатывали технологию индукционного нагрева алюминия в поле постоянного электромагнита со сверхпроводящей обмоткой (проект ALUHEAT, <http://www.sintef.no/>). В консорциум помимо ETP и SINTEF входили Fraunhofer Gesellschaft (Германия), Технологический университет Тампере (Финляндия), Институт Цветных металлов (Польша), Columbus Superconductors (Италия), GK Kety (Польша), SMS Elotherm (Германия), Skoda Vyzkum (Чешская республика). Помимо софинансирования промышленных компаний и университетов 1,8 млн. евро было выделено Европейским союзом на финансирование данного проекта. В результате реализации проекта ALUHEAT при нагреве в поперечном магнитном поле электромагнита со сверхпроводящей обмоткой удалось добиться эффективности нагрева свыше 90% при отсутствии угара, но проект незавершен из-за существенных технологических трудностей. Технология предполагает вращение заготовки в зазоре электромагнита, но при нагреве заготовки до температур близких к температуре пластической деформации невозможно удержать заготовку от деформации в магните из-за действия на нее электромагнитного тормозного момента. Кроме того, в системе имеется сильное тепловое короткое замыкание через механические захваты, вращающие нагреваемую заготовку в поперечном магнитном поле. Еще одним недостатком устройства является достаточно низкая скорость нагрева и сложность промышленного использования электромагнита со сверхпроводящей обмоткой.

Таким образом, при достаточно интенсивном развитии отрасли индукционного нагрева на фоне удорожания углеводородного топлива на сегодняшний день в мире не существует энергоэффективной технологии электрического нагрева цветных металлов перед пластической деформацией.

ООО «Резонанс» совместно с ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» ведут разработку новой технологией индукционного нагрева цветных металлов во вращающемся поле постоянных магнитов, которая позволяет добиться энергетической эффективности нагрева более 90% при установленной мощности индукционного нагрева свыше 100 кВт, что существенно выше, чем при использовании традиционной технологии нагрева в продольном магнитном поле. Кроме того, предлагаемая технология значительно превосходит имеющиеся на рынке аналоги по простоте и экс-

плуатационной надежности. Себестоимость предлагаемого продукта существенно ниже (почти на порядок) относительно продуктов на базе традиционной технологии, потому что не требует сложных полупроводниковых источников питания и многовитковых медных соленоидальных индукторов с системой водяного охлаждения.

При создании переменного магнитного поля с помощью электропривода с использованием магнитного поля движущихся постоянных магнитов, потери будут наблюдаться исключительно в электроприводе и механической передаче передающей мощность вала системе вращения постоянных магнитов. Учитывая уровень развития систем электропривода и механических передач можно добиться коэффициента полезного действия свыше 90%.

Несмотря на то, что идея нагрева магнитами не нова и в этой области наблюдалась значительная патентная деятельность, начиная с середины пятидесятых годов прошлого века, проблема до сих пор не решена. В качестве отличительных признаков, позволяющих добиться нового технического результата можно отметить специальную систему вращения магнитов относительно нагреваемого металла и способ расположения магнитов относительно нагреваемого металла, а так же решения, позволяющие существенно снизить необходимую скорость вращения магнитов вокруг нагреваемого металла и повысить качество нагрева, то есть равномерность теплового поля в загрузке. Кроме того, значительного прогресса в последние десятилетия достигло развитие постоянных магнитов и по коэрцитивной силе и по точке Кюри.

На сегодняшний день разработаны математические модели, ориентированные на параметрическую оптимизацию индукционной системы, разработаны и испытаны лабораторные образцы установки и приняты технические решения по созданию опытно-промышленного образца и разработана техническая документация на опытно-промышленный образец. В качестве объекта модернизации принят индукционный нагреватель ОКБ 894 А для наложения кабельной обечайки на кабель. В результате модернизации установленная мощность индуктора снижается с 300 кВт до 110 кВт и новая техническая система не требует водяного охлаждения. Разработано технико-экономическое обоснование, по которому модернизация индукционного нагревателя окупается в течение 15 месяцев, а в первый год возврат на вложенные инвестиции составляет 86%. При реализации прогнозов роста тарифов на электроэнергию данный показатель должен превысить 100% уже в ближайший год.

В текущих планах у разработчиков новой технологии осуществить опытно-промышленные испытания, разработать серию индукционных нагревателей на основе новой технологии и осуществить продвижения продукта, как на рынке России, так и за рубежом. Для реализации проекта проводится поиск венчурных инвестиций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Слухоцкий А. Е. Установки индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунер. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
2. Сайт: <http://www.sintef-group.com/upload/31907/runde.pdf>.

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРОПЕЧЬ-МИКСЕР С ПРЯМЫМ НАГРЕВОМ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА

Р.М. Христинич, Е.В. Христинич, А.Р. Христинич

ООО НПО «Металлургэнергпром», г. Красноярск, Россия

## 1. Особенности миксера при нагреве расплава со стороны подины

В основу новой конструкции электрического миксера принят фактор повышения тепловой эффективности нагрева металла в миксере за счет использования прямой теплопередачи между нагревателями, огнеупорным слоем футеровки подины ванны миксера (печи) и расплавом, а также путем увеличения конвективной теплопередачи в самом металле, находящемся в ванне миксера [1].

Поставленная задача решается тем, что в электрическом миксере, содержащем металлический каркас, футерованную ванну, рабочее окно с дверью, термоэлектрический термометр для измерения температуры металла, летку, заливной – переливной карман с крышкой, нагреватели установлены в огнеупорном слое футеровки подины ванны миксера и защищены расплавостойким высокотеплопроводным кожухом.

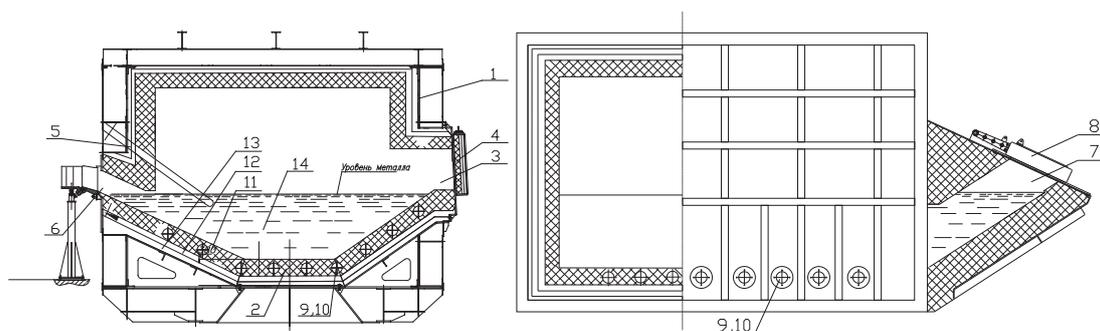


Рис. 1. Электрическая печь-миксер с нагревателями в футеровке подины

На рисунке 1 изображена электрическая печь-миксер с возможностью установки магнитогидродинамического перемешивателя под подиной и с нагревателями, установленными в футеровке подины и расположенными перпендикулярно фронтальной стороне.

Электрическая печь-миксер, представленная на рисунке 1 состоит из металлического каркаса 1, футерованной ванны 2, рабочего окна 3 с дверью 4, термоэлектрического термометра 5 для измерения температуры металла, летки 6, заливного – переливного кармана 7 с крышкой 8, нагревателей 9, защищенных расплавостойкими кожухами 10, огнеупорного слоя 11, промежуточного слоя 12, теплозащитного слоя 13 футеровки ванны 2, расплава 14.

При подаче напряжения на нагревательные элементы нагревателей 9 происходит их разогрев и разогрев расплавостойких кожухов 10 нагревателей 9 до требуемой температуры, например, 800 °С. Нагреватели установлены в огнеупорном слое 11 футеровки ванны 2, которая за счет прямой теплопередачи от расплавостойкого высокотеплопроводного кожуха 10 нагревателя 9 также разогревается и на границе «футеровка–расплав» достигает требуемой величины.

При температуре воздушной среды в рабочем пространстве электропечи – миксера 745 °С, температуре жидкой шихты 750 °С и температуре нагревателей 800 °С, температурный перепад в огнеупорном слое 11 футеровки при расстоянии до 100 миллиметров от разогретого нагревателя 9 до границы «футеровка–расплав», составляет в установившемся режиме не более 50 °С.

За счет высокой теплопроводности расплава металла, например жидкого алюминия, температура на поверхности зеркала металла при высоте столба металла

1100 миллиметров составит около  $742^{\circ}\text{C}$  (без учета конвективного теплообмена). При учете конвективного теплообмена между разогретым нижним слоем расплава металла и менее разогретым верхним слоем металлического расплава, перепад температур по высоте столба металла будет составлять несколько градусов.

Температура в рабочем пространстве разработанной электропечи-миксера, не заполненной жидким металлом, также будет интенсивно выравниваться за счет прямой теплопередачи от футеровки подины ванны к футеровке стен, а также за счет конвективного теплообмена слоев нагретого воздуха у подины ванны и менее нагретого воздуха в верхних слоях подсводового пространства. При этом температура будет более равномерно распределяться в рабочем пространстве [2].

Расположение нагревателей со стороны подины ванны с металлом позволяет значительно снизить тепловые потери печи-миксера. На рисунке 2 представлены зависимости изменения температуры по высоте рабочего пространства при расположении нагревателей под сводом (ниспадающая слева направо в основной части кривая) и при размещении нагревателей в футеровке подины ванны миксера (поднимающаяся слева направо в основной части кривая). Анализируя кривые (рис. 2) видно, что при расположении нагревателей под сводом наблюдается перегрев в верхней части миксера на  $200^{\circ}\text{C}$ , что предопределяет значительные тепловые потери. Кроме того, при нагреве расплава путем теплопередачи излучением, в правой части рисунка 3 (ниспадающая кривая) фиксируется значительный перепад температур по высоте столба расплава, который достигает до  $60^{\circ}\text{C}$ .

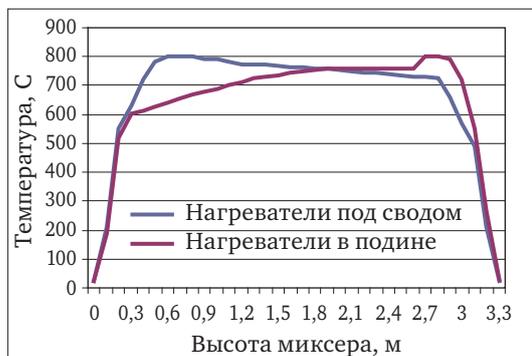


Рис. 2. Распределение температуры по высоте электропечи-миксера



Рис. 3. Экспериментальная установка

## 2. Исследование эффективности электрического миксера сопротивления в переходных режимах на физической модели

Разработанная физическая модель позволяет исследовать эффективность системы нагрева электропроводного расплава при расположении нагревателей как со стороны свода, так и со стороны подины ванны миксера. Важными аспектами проведения исследований являются: определение времени нагрева установленного объема моделирующего металла при применении традиционной схемы расположения нагревателей под сводом и предложенной – со стороны подины; оценка влияния конвективных потоков движения расплава при нагреве металла со стороны подины на эффективность работы миксера и экономию энергоресурсов.

На рисунке 3 представлена экспериментальная установка. Она включает: физическую модель электрического миксера в масштабе 1:15; систему измерения электрических параметров; систему учета потребленной электроэнергии; систему записи и обработки информации.

Исследования эффективности нагрева расплава при расположении нагревателей под сводом или под ванной печи-миксера проводились с использованием нагревателей с параметрами, представленными в таблице 1. Параметры потребления электроэнергии с комбинированных приборов учета электроэнергии и мощности типа СЭБ-2 АК снимались в режиме реального времени. Измерения температуры проводились в придонной области ванны модели и в верхней части модели ниже уровня зеркала моделирующего металла.

Таблица 1

**Параметры нагревателей физической модели**

Параметр/ Тип нагревателя	Сопротивление, Ом	Напряжение, В	Ток, А	Мощность, Вт
Под сводом	95,6	220,0	2,3	507,0
Под подом	96,5	220,0	2,28	501,6

Использование нагревателей с идентичными параметрами позволяет поставить эксперимент качественно и определить эффективность работы каждой из используемых систем нагрева.

Проверка эффективности системы нагрева с расположением нагревателей под сводом или под подиной миксера – модели выполнялась для следующих технологических режимов работы [3]:

- режим нагрева пространства миксера при отсутствии расплава в миксере, например режим сушки футеровки;
- режим нагрева жидкой шихты с целью определения эффективности выравнивания температуры по объему расплава.

*Экспериментальные исследования режимов нагрева пространства миксера- модели при отсутствии и наличии расплава* выполнялись согласно следующему регламенту:

1. Модель закрыта крышкой – сводом с теплоизоляцией.
2. Термопреобразователь 1 установлен через технологическое окно на расстоянии 3 миллиметра от подины модели.
3. Термопреобразователь 2 установлен на расстоянии 53 миллиметра от подины модели (на уровне зеркала расплава модели).
4. Температура на термопреобразователях 1 и 2 фиксируется при помощи приборов (в начальный момент она одинаковая для обеих точек расположения термопреобразователей).
5. Нагреватели подключаются к источнику питания и на них измеряется величина напряжения на нагревателях, ток, активная мощность и потребленная энергия.
6. Изменение температуры в исследуемых точках фиксируется через равные промежутки в режиме реального времени.

Измерения распределения температуры в пространстве печи-миксера – модели на расстоянии 3 и 53 мм от подины ванны выявили, что перепад температуры в незаполненной металлом ванне модели, при нагреве со стороны подины, не превышает 2–3 °С. При нагреве со стороны свода перепад температуры в контрольных точках составил 6–7 °С.

Исследования изменения градиента температуры в процессе нагрева моделирующего металла в миксере – модели показали, что при нагреве со стороны ванны перепад температур по высоте столба металла 50 мм не превышает 4–5 °С (рисунок 4: кривая 3 – низ расплава, кривая 4 – верх расплава). При нагреве расплава со стороны свода миксера – модели перепад температур составил 10–12 °С по высоте расплава (рисунок 4: кривая 1 – верх расплава, кривая 2 – низ расплава).

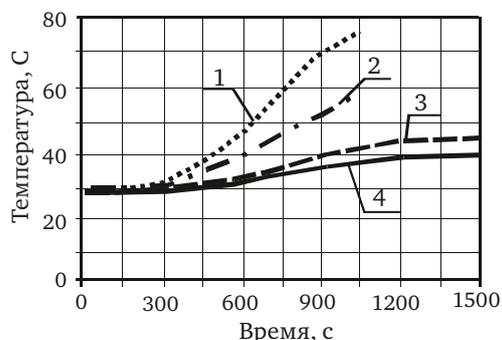


Рис. 4. Изменение температуры расплава при нагреве со стороны свода и подины

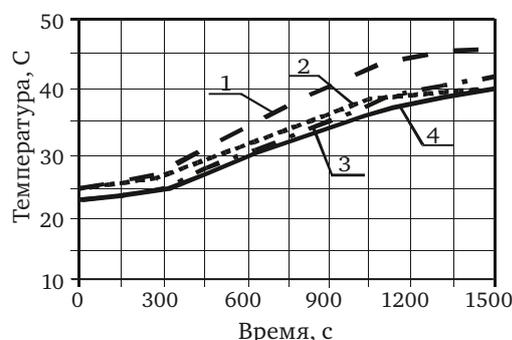


Рис. 5. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных

Исследования на модели показали, что затраты энергии на нагрев одинакового объема расплава при расположении нагревателей со стороны подины в 2,0–2,5 раза меньше, чем при расположении нагревателей под сводом модели.

В работе проведен сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов, выполненных в программно-вычислительном комплексе ANSYS – процесс нагрева воздушной среды (рисунок 5: кривая 3 – температура внизу, 4 – температура сверху) и расплава в миксере – модели (рисунок 5: кривая 1 – температура внизу; кривая 2 – температура сверху) при нагреве снизу. Сравнивая соответствующие кривые рисунков 4 и 5 видно, что величина погрешности не превышает 8–10%, что подтверждает хорошую настройку расчетной модели.

В результате проведения исследований экспериментально доказано и подтверждено расчетами, что расположение нагревателей со стороны подины ванны электрического миксера повышает эффективность нагрева жидкой (твердой) шихты, приводит к выравниванию температуры по высоте и объему расплава, интенсифицирует теплообмен между слоями расплава и уменьшает необходимость использования перемешивателей расплава в миксере, а также повышает надежность нагревателей за счет прямой теплопередачи между нагревателями, футеровкой и расплавом.

### **Выводы**

Предлагаемая конструкция электрической печи-миксера имеет ряд преимуществ перед известными:

- обеспечивается прямой контакт между нагревателями, футеровкой подины ванны и нижними слоями расплава, что повышает нагрев расплава и активизирует конвективный теплообмен в нем;

- выравнивается температура по объему расплава в электропечи – миксере и поддерживается в технологическом диапазоне, например 745–750 °С для алюминия, что снижает адгезию газов, окисление металлического расплава, образование шлаков;

- снижаются тепловые потери электропечи-миксера за счет уменьшения высоты рабочего пространства и снижения температуры под сводом до 750 °С при исключении нагревателей из подсводового пространства;

- снижается рабочая температура нагревателей от 950–1000 °С при их расположении под сводом до 800–850 °С при расположении их в подине, что значительно увеличивает их срок службы;

- электропечь-миксер может применяться для расплавления твердой шихты и приготовления сплавов при температурах до 1000–1100 °С без перегрева нагревателей и нарушения целостности конструкции электропечи-миксера;

- металлизация огнеупорного слоя футеровки при расположении нагревателей в подине приводит к интенсификации теплоотдачи от них;

- расположение нагревателей в огнеупорном слое футеровки подины ванны электропечи – миксера защищает нагреватели от интенсивного зашлаковывания и обеспечивает им стабильный температурный режим при эксплуатации, что увеличивает срок службы нагревателей.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Патент РФ на полезную модель № 95664. Электропечь – миксер. МКИ F27B3/10. Р. М. Христинич, А. Р. Христинич. Заявка № 2008122142/22 от 02.06.2008 г. Опубл. в Бюл. № 19 от 10.07. 2010 г.

2. Христинич, Р. М. Прогнозирование надежности электрического плавильно-литейного агрегата/Р. М. Христинич, Е. В. Христинич, А. Р. Христинич//Электротехника, 2009.-№ 7.- С. 47–52.

3. Альтгаузен, А. П. Электротермическое оборудование: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп./Под общей редакцией А. П. Альтгаузена//М.: Энергия, 1980. -416 с.

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКСЕРОВ И ВНЕПЕЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*А.А. Темеров, В.Н. Тимофеев, Д.А. Михайлов*

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

В последнее время основными потребителями электротермического оборудования предъявляются все более высокие требования к энергетической эффективности и эксплуатационной надежности электрических миксеров и внепечного оборудования, предназначенного для повышения качества алюминиевого литья. Одним из узлов конструкции, который напрямую влияет на надежность и энергетическую эффективность таких устройств является система электронагрева. Основными задачами разработки систем электронагрева новых конструкций являются повышение надежности и энергетической эффективности электронагревателей сопротивления.

### **Особенности эксплуатации систем электронагрева**

На большинстве отечественных предприятий электронагреватели электрических миксеров представлены подвесными ленточными или подвесными стержневыми нагревательными элементами, которые размещаются в защитных трубах или располагаются над расплавом открыто. В нагревательных элементах такой конструкции в качестве токопроводящего элемента используется ленточный провод из высокоомных сплавов, таких как нихром (Х20 Н80-Н, ХН70 Ю и др.) [1]. В процессе эксплуатации подвесные ленточные нагревательные элементы подвергаются воздействию агрессивной рабочей среды (брызги и всплески расплава) на стадии рафинирования, в результате чего на их поверхности образуется слой отложений. В ходе эксплуатации тепловое сопротивление между поверхностью расплава и нагревательными элементами возрастает, что ведет к увеличению скорости окисления нагревательных элементов, росту температуры и значительному снижению эксплуатационного срока.

В электрических миксерах сопротивления большой емкости сегодня применяются электронагреватели, которые включают в себя подвесные стержневые нагревательные элементы и защитные трубы. Наиболее распространенными являются трубчатые электронагреватели фирмы Kanthal, состоящие из защитных труб Kanthal APM (Fe – 22 %, Al – 6 %) и нагревательных элементов Kanthal Tubothal (рис. 1, а). Основным недостатком таких электронагревателей являются низкая механическая прочность и склонность к насыщению элементами N, K, Na, Cl, F, Cu, Ni, Mn и Mg материала трубы (рис. 1, б). Анализ причин выхода из строя данных электронагревателей показал, что защитные трубы наиболее склонны к газовой коррозии при поддержании рабочей температуры в диапазоне (850–900) °С, а к механической деформации – в момент перехода материала через границу хладотвердости (850–870) °С [2, 3]. Проведенный анализ условий эксплуатации электронагревателей на ООО «РУСАЛ – Красноярск» и ООО «РУСАЛ – Саяногорск» с 2008 по 2010 гг. показал, что применяемые для защиты нагревательных элементов металлические трубы в наибольшей мере склонны к деформации и зарастанию при приготовлении алюминиевых сплавов с использованием флюсов. Очевидно, что применение дорогостоящих нагревательных элементов не является гарантией существенного увеличения срока эксплуатации электронагревателей.

Одним из наиболее перспективных путей повышение надежности электронагревателя является выполнение проводников нагревательных элементов из многокомпонентных сплавов, которые должны содержать в своем составе элементы Y, La, Ce, Zr, Ti, Si (GS23–5 и др.) [4, 5]. В отличие от нихрома, такие сплавы обладают повышенной химической стойкостью, которая обусловлена образованием пленки оксида алюминия  $Al_2O_3$  на поверхности проводника при температуре более 780 °С. Данное свойство и относительно низкая себестоимость многокомпонентных сплавов предопределили базовую концепцию конструкции нагревательных элементов повышенной надежности для электрических миксеров и внепечного оборудования.



Рис. 1. Эксплуатационные дефекты электронагревателя после 6 месяцев эксплуатации: *а* – нагревательного элемента Kanthal Tubothal; *б* – защитной трубы Kanthal APM



Рис. 2. Трубчатые нагревательные элементы конструкции ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» для внепечных установок: *а* – PDBF; *б* – SNIF



Рис. 3. Трубчатые нагревательные элементы конструкции ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» для миксеров САМП-100: *а* – общий вид; *б* – в ходе эксплуатации

### Разработка систем электронагрева новых конструкций

Сотрудниками ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» был разработан ряд конструкций электронагревателей с повышенной степенью эксплуатационной надежности для установок фильтрации PDBF и установок рафинирования SNIF, а также для электрических стационарных и поворотных миксеров САМ-90 («Казахстанский электролизный завод»), САМП-100 (ОАО «РУСАЛ-Красноярск»), САМП-38 (ОАО «РУСАЛ-Новокузнецк»), САМП-60 и САМ-80 (ОАО «РУСАЛ-Саяногорск») (рисунки 2 и 3). Высокая эксплуатационная надежность электронагревателей таких конструкций была подтверждена в ходе их успешной эксплуатации (более 100 шт.) в 2008–2010 годах.

### **Повышение надежности систем электронагрева**

Другим перспективным направлением деятельности предприятия является повышение эксплуатационной надежности и модернизация электротехнологического оборудования, в частности систем электронагрева методом сопротивления. В 2011 году, для обеспечения значительного повышения надежности электротехнического оборудования, между предприятиями ОАО «РУСАЛ-Красноярск» и ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» было принято соглашение о взаимосотрудничестве между предприятиями. В соответствии с этим соглашением на складе поставщика создается нормативный запас электронагревателей. Для реализации данной договоренности была создана совместная рабочая группа перед, которой были поставлены следующие задачи:

1. Повышение надежности работы миксеров и внепечных устройств за счет плановой поставки и обеспечения нормативного запаса электронагревателей для установок фильтрации, рафинирования и миксеров.
2. Повышение точности измерения температуры в рабочем пространстве миксеров (размещения около каждого электронагревателя отдельной термодопы);
3. Разработка электрической схемы соединения электронагревателей, которая позволит производить контроль величин питающего тока каждого электронагревателя.
4. Монтаж сервисного модуля хранения и обработки информации о тепловом состоянии миксера.
5. Установка тепловых экранов на форкамеры миксеров.
6. Разработка технологических, эксплуатационных и ремонтных инструкций с учетом требований по увеличению сроков службы и эффективности использования электронагревателей сопротивления.
7. Обучение обслуживающего персонала навыкам эффективной эксплуатации систем электронагрева.

Наработанный опыт по повышению надежности систем электронагрева при выполнении поставленных задач планируется использовать также и на других предприятиях РУСАЛа.

### **Пути повышения эксплуатационной надежности и энергетической эффективности систем электронагрева**

Накопленный опыт создания и эксплуатации миксеров позволил сотрудникам ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» определить и сформулировать требования, которые предъявляются к конструкциям систем электронагрева. С целью повышения газовой и коррозионной стойкости, а также для решения задачи повышения энергетической эффективности системы электронагрева необходимо:

- 1) снизить температуру на нагревательных элементах;
- 2) повысить долю мощности, излучаемой на зеркало расплава.

В наибольшей степени данные требования удовлетворяет электронагреватель замурованного типа, нагревательные элементы которого отделены от внутривспечного пространства защитными экранами или же располагаются в огнеупорном электроизоляционном блоке. Преимуществом такой конструкции (в сравнении с электронагревателем, который оснащен открытыми нагревательными элементами) является увеличение площади активно излучающей поверхности на 30–40 %. Вместе с этим, применение неметаллических материалов в качестве огнеупорного электроизоляционного блока позволяет снизить интенсивность зашлаковывания излучающей поверхности. Результатом этого является снижение теплового сопротивления между зеркалом расплава и нагревательными элементами.

С учетом данных факторов были разработаны и исследованы две конструкции опытно – промышленных образцов электронагревателей с повышенной степенью надежности и энергетической эффективности. Представленный на рисунке 4 замурованный стержневой электронагреватель [6, 7] содержит стержни, которые соединены последовательно и расположены в каналах дистанцирующего устройства, выполненного из корундовой керамики ( $\lambda_k = (2 \div 5)$  Вт/м $\cdot$ °С,  $\rho = (3700 \div 3900)$  кг/м $^3$ ). Электронагреватель второго типа (рис. 5) получил условное название «светящийся» свод. Основными

узлами такого электронагревателя являются: теплопроводный слой 1, обращенный к обрабатываемому расплаву излучающей поверхностью 2, каркас 3 и нагревательные элементы (на рисунке не показаны). Основой конструкции такого электронагревателя являются монолитные блоки, которые выполнены из высокотеплопроводного неэлектропроводного материала ККБ-70 ( $\lambda_k = (4 \div 7)$  Вт/м·°С,  $\rho = (1800 \div 1900)$  кг/м<sup>3</sup>). Такие конструктивные решения позволяют значительно снизить температурный перепад между нагревательными элементами и поверхностью расплава и, соответственно, повысить тепловую эффективность за счет увеличения доли теплового потока, направляемого на расплав от нагревательных элементов. Расположение нагревательных элементов в огнеупорном слое позволяет защитить их от воздействия газовой среды и всплесков расплава [8]. Проведенные испытания в 2005 г. (ОАО «РУСАЛ-Красноярск») и в 2007 г. (ООО ЗМИ «Сиблента», г. Красноярск) подтвердили повышенную энергетическую эффективность электронагревателей такой конструкции.

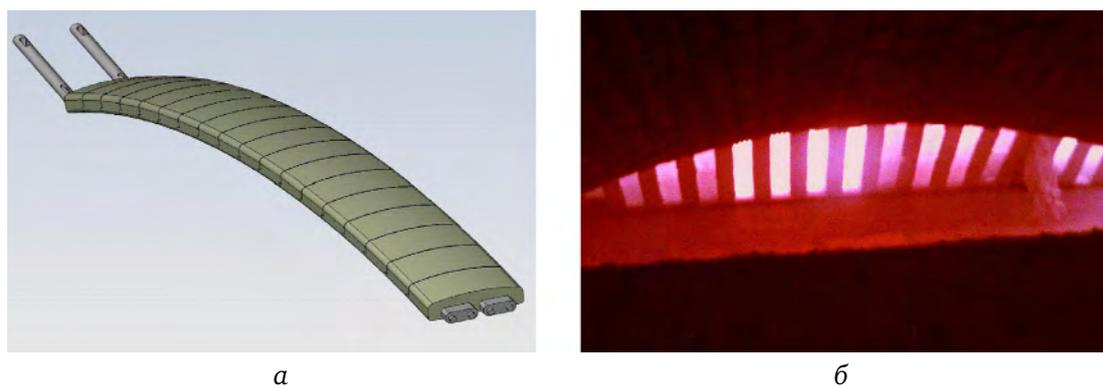


Рис. 4. Замурованный стержневой электронагреватель:  
а – общий вид; б – вид на электронагреватели в ходе испытаний на миксере САМ-35 (ОАО «РУСАЛ-Красноярск»)

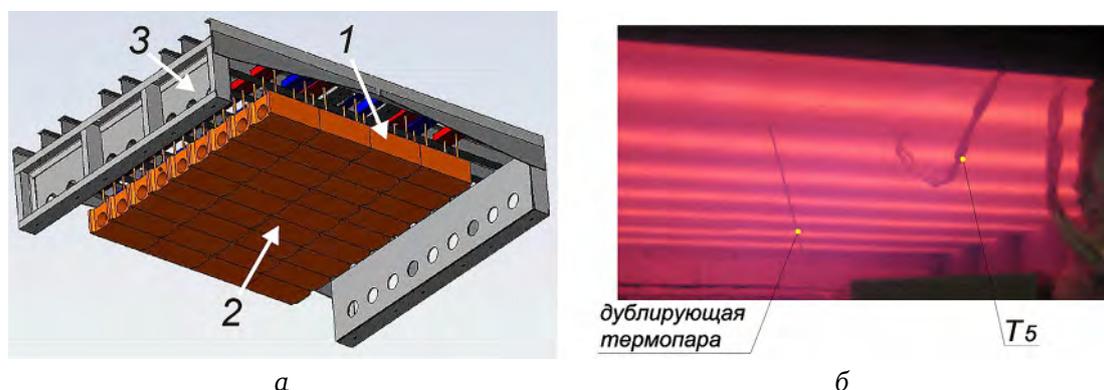


Рис. 5. Электронагреватель конструкции «светящийся» свод:  
а – общий вид; б – вид на отражающую поверхность в ходе испытаний на миксере САМ-5 (ООО «ЗМИ Сиблента»)

### Численная модель электронагревателя «светящийся» свод

Для нахождения оптимальных соотношений характерных параметров электронагревателя конструкции «светящийся» свод была разработана численная модель с привлечением САД- и САЕ программ (Solid Works, Ansys Multiphysics, Ansys CFX). Данная математическая модель позволяет анализировать нестационарное тепловое поле электронагревателя с изменением параметров, основными из которых являются:  $l_{нэ}$  – длина радиационного нагревательного элемента;  $d_n$  – диаметр радиационного нагревательного элемента;  $S_n$  – расстояние между пазами под нагревательные элементы в теплопроводных блоках сводового электронагревателя;  $S_{сб}$  – толщина теплопроводных блоков сводового электронагревателя;  $S_{мс}$  – толщина теплопроводного слоя сводового электронагревателя.

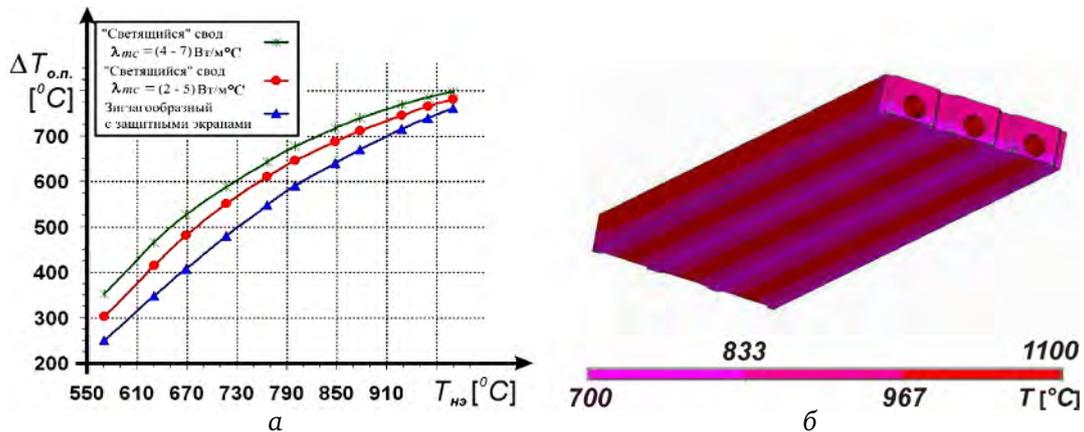


Рис. 6. Результаты математического моделирования: а – зависимость  $\Delta T_{нагр}$  от  $T_{н.э}$ ; б – распределение температуры в огнеупорном слое электронагревателя

В ходе проведения исследований с помощью математической модели были получены зависимости температурного перепада  $\Delta T_{нагр}$  и температуры излучающей поверхности  $T_{и.п}$  от температуры нагревательных элементов  $T_{н.э}$ . Анализ данных зависимостей позволил установить, что при выполнении теплопроводного слоя из материала на основе корундокарбидокремниевого бетона ККБ-70 с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{тс} = (4 \div 7) \text{ Вт/м}^{\circ}C$  [9], в сочетании увеличением эффективной площади излучающей поверхности, позволяет повысить среднеинтегральную температуру излучающей поверхности (рис. 5, а) и снизить температурный перепад между поверхностью расплава и излучающей поверхностью свода  $\Delta T_{пов-распл}$  на  $80^{\circ}C$  (рис. 6, а), в результате чего тепловая мощность, излучаемая на зеркало металла, в зависимости от температурного перепада между излучающей поверхностью и расплавом, возрастает в среднем 1,5–2 раза.

Достоверность разработанной математической модели была оценена в ходе сравнительного анализа экспериментального и расчетного распределений температуры в теплопроводном слое, полученных на опытно-промышленном образце и математической модели, выявил их высокую степень совпадения. Относительная погрешность измерений  $\varepsilon_{рм}$  не превышала 6,12 % при доверительной вероятности  $P = 95\%$  (рис. 6, б).

### Заключение

1. Применение электронагревателей конструкции ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» дает возможность значительно повысить как срок эксплуатации, так и энергетическую эффективность систем электронагрева электрических миксеров и внепечных установок;

2. Доказано, что внедрение предложенных конструкций электронагревателей с расположением нагревательных элементов в огнеупорном слое свода позволит увеличить эффективную излучаемую мощность на поверхность расплава не менее чем в 1,5–2 раза;

3. Разработанная численная модель электронагревателей конструкции «светящийся» свод позволяет производить оптимизационный поиск при изменении ряда характерных параметров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белавин Ю. А. Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением / Ю. А. Белавин, М. А. Евстигнеев, А. Н. Чернявский. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
2. Resistance Heating Alloys and System for Industrial Furnaces. Каталог 1-A-5 B. KANTHAL. Hallstahammar, Sweden, 2001. – 38 p.
3. Investigation of KANTHAL Tubothermal: Investigation report/«Kanthal AB». Reg. no. E07032. – Hallstahammar, Sweden, February 28, 2007. – 9 p.

4. Гутман М. Б. Срок службы нагревательных элементов из железо-хромалюминиевых сплавов сопротивления в воздушной атмосфере. М. Б. Гутман, А. Б. Плоткин, Ю. В. Шумков//Труды ВНИИ ЭТО: сб. науч. тр. – М.: Энергоиздат, 1981. – № 11. – С. 3–14.

5. Пелевин А. Г. Новая конструкция нагревателя защищенного типа/А. Г. Пелевин, В. Ф. Фролов, Л. П. Трифоненков//Алюминий Сибири 2008: сб. научн. статей. – Красноярск: ООО «Версо», 2008. – С. 281–283.

6. Пат. 38915 РФ, МПК<sup>7</sup> F 27 D 1/02. Электрический миксер для приготовления алюминия и его сплавов/А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, П. А. Хоменков, А. В. Богданчиков. – № 2004106958/20; Заявлено 09.03.2004; Опубл. 10.07.2004, Бюл. № 19.

7. Темеров А. А. Электронагреватель нового типа для миксера сопротивления /А. А. Темеров, Д. А. Михайлов, В. В. Гаврилов, //Молодежь и наука – третье тысячелетие: Сборник материалов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: КГТУ, 2005. – С. 424–427.

8. Темеров А. А. Повышение надежности и энергетической эффективности систем нагрева электрических миксеров для приготовления алюминиевых сплавов/А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, Д. А. Михайлов//Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2010. – № 6 (32). – С. 150–154.

9. Тимофеев В. Н. Сотрудничество НПЦ «Магнитной гидродинамики» с российскими и зарубежными партнерами по созданию плавления – литейных технологий для цветных металлов/В. Н. Тимофеев, Р. М. Христинич, С. А. Бояков и др.//Цветные металлы – 2010: сб. докладов второго межд. конгресса – Красноярск: ООО «Версо», 2010. – С. 695–696.

## ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМАХ ОАО «КРАЗ»

Г. Е. Селютин, А. В. Турушев

Учреждение Российской академии наук Институт химии и химической технологии  
Сибирского отделения РАН, г. Красноярск, Россия

Компания РУСАЛ занимает третье место в мире по производству алюминия. Несмотря на динамику рынка, РУСАЛ продолжает наращивать объемы производства за счет реализации проектов по модернизации существующих предприятий и строительству новых заводов, отвечающих самым высоким международным стандартам в области экологии, охраны труда и промышленной безопасности. Одним из подразделений компании РУСАЛ является Дирекция по ремонту технологического оборудования филиала ООО «РУС-Инжиниринг» в г. Красноярске.

Любая внеплановая остановка производства алюминия может спровоцировать череду негативных последствий, что отрицательно сказывается на качестве и объемах производимого алюминия. Одной из важных проблем является повышение надежности кранов-манипуляторов «НКМ» и «SUB», непосредственно участвующих в технологическом процессе. Слабым местом кранов «НКМ» являются направляющие штанги. Для кранов «SUB» отказы обусловлены, главным образом, выходом из строя изоляционных втулок желоба подсыпки анодной массы. Условия работы: постоянное истирание, ударные нагрузки в диапазоне температур от минус 25 до плюс 60 °С в агрессивной среде электролизного производства.

Для изготовления направляющих штанги кранов и изоляционных втулок использовали стеклотекстолит, капролактан, фторопласт. В мае 2010 г. после консультаций со специалистами ИХХТ СО РАН было принято решение об использовании композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). СВМПЭ обладает уникальным комплексом физико-механических свойств, востребован в разнообразных областях применения, благодаря высокой износостойкости, устойчивости в агрессивных средах, низкому коэффициенту трения, высокой ударной вязкости, рекордно низкой температурой хрупкости (до –200 °С). Кроме того, СВМПЭ относится к наиболее доступным и дешевым полимерным материалам.

### СВОЙСТВА СВМПЭ

Плотность, г\см <sup>3</sup>	0,92–0,98
Прочность при разрыве (не менее) МПа	40
Модуль упругости при растяжении (не менее) ГПа при 23 °С	0,69
Коэффициент трения по стали: при сухом трении 0,07–0,2 в водной среде	0,03–0,1
в среде масел	0,01–0,08
Температура перехода в пластическое состояние, °С	138–142
Твердость по Шор А	62–78
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>-4</sup> /К –200 до –100 °С	0,5
20–100 °С	2
Предельная рабочая температура	100 °С

Свойства композиционных материалов (КМ) на основе СВМПЭ по ряду характеристик могут отличаться на несколько порядков. КМ на основе СВМПЭ могут быть получены введением частиц различных материалов, а также изменением надмолекулярного устройства СВМПЭ.

Из композитных материалов на основе СВМПЭ по технологии ИХХТ СО РАН было изготовлено 4 комплекта направляющих штанги кранов «НКМ» и 2 комплекта втулок желоба подсыпки анодной массы на кранах «SUB». Опытные образцы были установлены на оборудовании в августе 2010 г. и находятся в эксплуатации по настоящее время.

Эксплуатация изделий проводилась в диапазоне температур от –40 до +50 °С в условиях агрессивной среды, направляющие штанги и втулки желоба подсыпки анодной массы подверглись значительным динамическим и ударным нагрузкам, под воздействием которых изделия из других материалов разрушались и теряли изоляционные свойства.

В процессе эксплуатации было выявлено, что изделия из КМ на основе СВМПЭ обладают:

- Повышенной жесткостью и исключительно высокой ударной прочностью
- Возможностью эксплуатации при низких температурах (высокой морозостойкостью)
- Низким коэффициентом трения
- Повышенным сопротивлением к абразивному воздействию (высокой износостойкостью)
- Высокой стойкостью в агрессивных средах (коррозионной стойкостью)

Перечисленные свойства КМ на основе СВМПЭ, выявленные в условиях реальной эксплуатации, дают высокие комплексные преимущества перед другими материалами (текстолит, стеклотекстолит, капролактан, фторопласт) и позволяют использовать его в качестве направляющих главного подъема на штыревых кранах, в качестве изоляционного материала, а также в других узлах и механизмах, что открывает широкие перспективы по производству и использованию изделий из КМ на основе СВМПЭ. Экономический эффект будет определен после окончания полного цикла испытаний. Но уже сейчас с уверенностью можно заявить, что ресурс работы изделий возрос не менее чем в 10 раз и экономический эффект будет значительным.

## СЕРИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН ДЛЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПЛАВЫ МЕТАЛЛОВ

В. Н. Тимофеев<sup>1</sup>, Е. А. Головенко<sup>1</sup>, В. А. Горемыкин<sup>1</sup>, И. С. Гудков<sup>2</sup>, А. С. Хроник<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> ООО «Резонанс», г. Красноярск, Россия

### Аннотация

Линейные индукционные машины (ЛИМ) нашли широкое применение в различных областях металлургии, таких как перемешивание расплавов, транспортировка, управление скоростью литья, рафинирование и т. д. В процессе проектирования ЛИМ для определенной установки проектировщики сталкиваются с проблемой выбора критериев оптимальности, которые представляют собой совокупность ограничений по массогабаритным, стоимостным и энергетическим параметрам. Определение оптимальных из них требует проведение дополнительных НИР и ОКР для доработки конструкции и получения дополнительной информации для проектирования. В результате это приводит к существенному увеличению себестоимости ЛИМ, а значит и конечной цены для потребителя, кроме того, подобные разработки являются уникальными и имеют ограниченное применение. Решение задачи удешевления процесса проектирования, снижения себестоимости конечного продукта, повышения энергетических и массогабаритных показателей может быть достигнуто за счет создания ряда универсальных ЛИМ, отвечающих критериям оптимальности для предъявляемых условий применения. Для разработки такой серии машин используется алгоритм параметрической оптимизации, в основе которого заложены принципы эволюционного программирования и численного моделирования электромагнитных процессов.

**Ключевые слова:** серия ЛИМ, критерии оптимальности, параметрическая оптимизация, численное моделирование, параметрическая модель

### Введение

В российской металлургической отрасли сегодня наметился рост темпов модернизации производственных мощностей, что влечет за собой внедрение новых перспективных технологий позволяющих повышать производительность печей, миксеров и литейного оборудования, а также проводить полную автоматизацию процесса приготовления сплавов [1]. Одним из направлений модернизации является внедрение бесконтактных устройств воздействия на жидкие металлы, которые воплощены в разные конфигурации и типы МГД машин, наибольшее распространение из которых получили линейные индукционные машины. В технологической цепочке ЛИМ в большей части используются в качестве МГД перемешивателей для гомогенизации и интенсификации процессов растворения легирующих добавок в расплаве, МГД лотков и МГД желобов для выкачивания жидкого металла в литейную машину, установок МГД рафинирования для приготовления сплавов в транспортном ковше и т. д. [3, 4]. Но при установке ЛИМ на действующие агрегаты возникает проблема учета целого ряда требований и ограничений по габаритным показателям, массе, производительности и энергетической эффективности. Соблюдение этих требований может привести к сильной модификации конструкции машины. Поэтому зачастую возникают ситуации, что использование классических конструкций ЛИМ невозможно и поэтому появляется необходимость проведения дополнительных НИОКР по разработке новой конструкции с приемлемыми показателями. Как правило, эти работы влекут за собой дополнительный расход временных и денежных ресурсов для производителей, что, в конечном счете, отражается на себестоимости конечной продукции. Для снижения издержек на проектирование и изготовление ЛИМ необходимо создать унифицированную серию машин согласно некоторому критерию оптимальности, который удовлетворял бы большинству предъявляемых требований.

### Серийный выпуск ЛИМ в мире

На сегодня в мире работают всего около 10 малых и больших фирм, которые производят ЛИМ для нужд металлургии. География этих фирм широка, в России, например монополистом в области перемешивателей металла является фирма ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск), в Европе – Германско-Швейцарский Концерн АBB (Германия), на Востоке – Sinfonia Technology Co., Ltd (Япония) и Hunan Kemeida Electric Co., Ltd (Китай) и т.д. Большинство компании имеют многолетнюю историю поставок ЛИМ на своей территории и за ее пределами. Линейки машин предлагаемые компаниями в большинстве своем схожи по назначению, но имеют некоторые различия по сути составления серии. Так, например, у АBB и Sinfonia Technology Co., Ltd имеются схожие серии ЛИМ для перемешивания металла (таб. 1 – линейка Sinfonia Technology Co., Ltd), в основу которых заложена идея роста массы и габаритов ЛИМ в зависимости от емкости печи. При этом печи большой емкости, как правило, принадлежат большим металлургическим корпорациям, которые могут себе позволить приобретение этого дорогостоящего оборудования (цена от 0,4 до 1,0 млн. \$), тем более что период окупаемости инвестиций находится в пределах 2~3 лет. Для большинства малых компаний соответственно, такое оборудование не по карману (период окупаемости больше 5 лет).

Таблица 1

#### Перемешиватели металла Sinfonia Technology Co., Ltd

Тип	EMSA-M2	EMSA-M1	EMSA-ML	EMSA-L1	EMSA-LL
Емкость печи, т	10~20	10~30	20~40	30~60	40~80
Футеровка, мм	400	500	550	650	700
Мощность, кВт	30	40	60	80	115
Частота, Гц	1,5	1,0	1,0	0,8	0,8
Ток, А	250	260	280	400	420
Габариты, м	1,220W ×2,430L ×440H	1,270W ×2,870L ×440H	1,440W ×3,220L ×470H	1,717W ×3,720L ×550H	1,840W ×4,180L ×550L
Масса, т	4,200	5,500	7,500	12,000	15,000

Совсем другая концепция построения серии ЛИМ у российского производителя перемешивателей металла ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», линейка которых построена на основе привязки роста габаритов и массы в зависимости от толщины футеровки при постоянной мощности. Такие ЛИМ являются более доступными для широкого круга потребителей за счет простоты, надежности и большей ценовой доступности, чем описанные выше. Хотя эта линейка и выглядит более универсальной относительно представленной выше, но она имеет резервы для дальнейшей оптимизации конструкции ЛИМ с целью снижения габаритов, массы и расхода электроэнергии.

Таблица 2

#### Перемешиватели металла ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»

Тип	TYPE 400	TYPE 500	TYPE 700
Футеровка, мм	300~450	450~650	700~800
Мощность, кВт	49	50	52
Частота, Гц	0,5	0,5	0,5
Ток, А	330	500	700
Габариты, м	1,200W ×2,185L ×800H	1,300W ×2,690L ×640H	1,900W ×3,320L ×800H
Масса, т	6,500	9,200	13,700

### Постановка задачи разработки новой серии ЛИМ

Как было показано выше, существующие серии ЛИМ обладают целым рядом недостатков, исключение которых является приоритетной задачей при проектировании новых серий машин. За основу создания серии машин в данной работе принята концепция ранжирования ряда ЛИМ в зависимости от немагнитного зазора (толщи-

ны футеровки). При этом должны быть выбраны наиболее эффективные конструкции машин с минимальными размерами, массой, потерями энергии и повышенной эффективностью. При проектировании такой линейки машин необходим выбор размеров магнитопровода, обмоток, тока, частоты, материалов, конструктивных узлов и т. д. [4]. Учет всех этих параметров и нахождение их оптимальных значений представляет трудную научно-техническую задачу. Ее решение может быть найдено с помощью современных средств численного моделирования и методов глобальной оптимизации. Вследствие чего в работе решение строится в 2 этапа: разработка численной модели и стыковка с алгоритмом оптимизации.

### Численное моделирование ЛИМ

ЛИМ является электрической машиной, в которой основным показателем эффективности работы является интегральное усилие, развиваемое в металле единицу мощности. На эту величину при работе влияет целый ряд параметров, каких как ток, частота, немагнитный зазор, пазовое рассеивание и т. д. Для учета этих влияний и получения соответствующих зависимостей создана параметрическая модель в программном комплексе ANSYS [2]. Модель позволяет производить учет геометрических параметров ЛИМ, параметров питания, трудоемкость изготовления, а также учет себестоимости индуктора. В результате расчетов получали интегральные (рис. 2) и дифференциальные зависимости (рис. 1) величин, на основе которых производится анализ и синтез технических решений. Численное моделирование позволило выявить лучшие конструкции машин и определить пределы варьирования входных параметров.

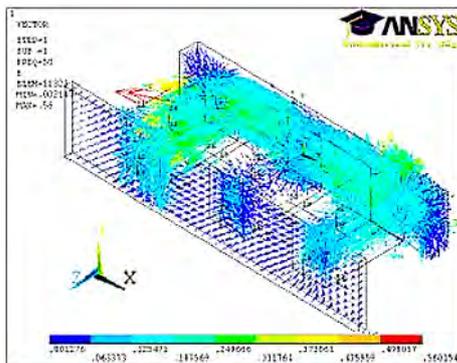


Рис. 1. Магнитная индукция в магнитопроводе

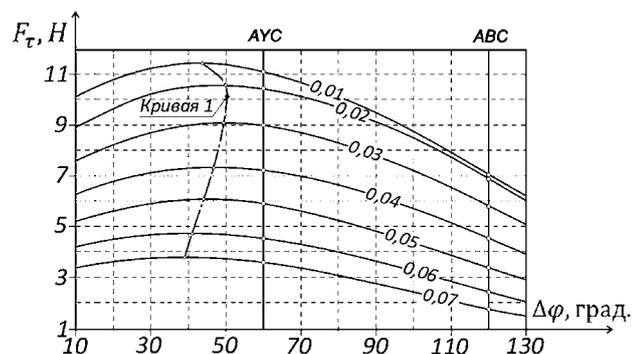


Рис. 2. Интегральные характеристики ЛИМ

### Оптимизация серии ЛИМ

Для решения задачи нахождения оптимальных параметров серии ЛИМ с помощью метода полного перебора понадобилось бы несколько лет упорной работы. Поэтому было решено интегрировать в численную модель алгоритм параметрической оптимизации для сокращения временных затрат на вычисления. В качестве алгоритма оптимизации был выбран генетический алгоритм (ГА), который уже давно зарекомендовал себя в технических системах, как надежное и удобное средство для нахождения глобальных оптимумов. Но ГА – это эвристический алгоритм, а значит для поиска глобального оптимума ему нужны существенные ресурсы, поэтому была проведена гибридизация с помощью алгоритма покоординатного спуска. В результате была получена эффективная и надежная связка для оптимального проектирования серии ЛИМ. Следующим шагом стала постановка задачи оптимизации и выбор целевой функции (ЦФ). Так как при применении ЛИМ возникает широкий спектр ограничений была предпринята попытка итерационно выбрать более эффективную зависимость для ЦФ. На первом шаге ЦФ выбрана таким образом, чтобы минимизировать мощность и массу, при максимизации усилия:

$$F_t(x) = k_1 \frac{1}{F_t} + k_2 \left\{ \frac{|P_{\min} - P|}{P_{\min}} \right\} + k_3 \left\{ \frac{|m_{\min} - m|}{m} \right\} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – весовые коэффициенты;  $F_t$  – тангенциальное усилие, Н;  $P_{\min}, P$  – минимальная и текущая мощности ЛИМ, Вт;  $m_{\min}, m$  – минимальная и текущая массы ЛИМ, кг.

Работа алгоритма по ЦФ (1) позволяет максимизировать усилие, но при этом мощность и масса оказываются завышенными. На втором шаге были учтены недостатки и добавлены дополнительно условия по согласованию напряжения и тока ЛИМ со стандартным трехфазным источником:

$$F_u(x) = k_1 \left\{ \frac{|F_{Hr} - F_r|}{F_{Hr}} \right\} + k_2 \left\{ \frac{|P_{\min} - P|}{P_{\min}} \right\} + k_3 \left\{ \frac{|m_{\min} - m|}{m} \right\} + \dots \quad (2)$$

$$\dots + k_4 \left\{ \frac{|U_H - U|}{U_H} \right\} + k_5 \left\{ \frac{|I_H - I|}{I_H} \right\} \rightarrow \min$$

ЦФ (2) является наиболее приемлемой с точки зрения качества решений и быстроты работы, что в большей степени важно для проектирования серий машин с улучшенными технико-экономическими показателями. Кроме того, в модели производился учет раскроя листов железа, стоимости резки, оптимальное сечение шины и т. д. В результате это позволило получить серию ЛИМ с повышенной энергоэффективностью и малыми массогабаритными показателями (таблица 3). Кроме немагнитного зазора в таблице приводится ранжирование соответствующих параметров для вида использования ЛИМ. Преимущества полученной серии ЛИМ перед описанными выше очевидны. Для производителей такие машины по затратам на изготовление будут обходиться значительно дешевле. В результате стоимость продукции для потребителей также снизится (по расчетам до 2 раз).

Появление более дешевой продукции на рынке будет стимулировать спрос со стороны малых компаний. Это связано тем, что срок окупаемости такого оборудования будет снижен почти в 2 раза, а эффективность технологического процесса при этом не пострадает.

Таблица 3

Серия ЛИМ с улучшенными показателями

Тип	ЛИМ 150	ЛИМ 250	ЛИМ 450	ЛИМ 550	ЛИМ 750
	рафинирование	дозирование	приготовление сплавов		
Футеровка, мм	100~150	200~250	400~450	500~550	700~750
Мощность, кВт	22	23	25	25	30
Частота, Гц	10	12	1,5	1,5	0,8
Ток, А	100	100	120	120	150
Напряжение, В	380	380	380	380	380
Габариты, м	1,200W ×1,5L ×400H	300W ×940L ×320H	1,140W ×1,850L ×850H	1,400W ×2,200L ×910H	1,450W ×2,600L ×950H
Масса, кг	1200	960	2600	3100	5200

Результаты оптимизации говорят об имеющемся резерве дальнейшей оптимизации конструкции ЛИМ при наличии достоверных научных инструментов в виде математических моделей и алгоритмов оптимизации. Кроме того, полученные результаты должны быть проверены на опытно-промышленных образцах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: «Энергия», 1970. 272 с.
2. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. М.: «Академия», 2006. 264 с.
3. Стафиевская В.В. Установки с линейными индукционными машинами для перемешивания и транспортировки жидких металлов. Дис. канд. техн. наук. Красноярск.: Библиогр., 2000. 128 с.
4. Головенко Е.А. Математическое моделирование индукционных МГД-устройств металлургического назначения методом дискретизации свойств сред. Дис. канд. техн. наук. Красноярск.: Библиогр., 2004. 188 с.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА

Д. В. Антоненков, А. Ю. Южанников

ОАО «Сибцветметниипроект», г. Красноярск, Россия

Филиал ОАО ХК «Якутуголь» Разрез «Нерюнгринский» является крупнейшим угледобывающим предприятием на Дальнем Востоке. Одним из основных направлений перспективного развития предприятия является ввод в эксплуатацию оборудования большой единичной мощности и создание мощных горнотранспортных комплексов. В 1997–1998 гг. введены в эксплуатацию 2 экскаватора 301-М емкостью ковша 40 м<sup>3</sup> и 5 буровых станков ДМ-Н для бурения скважин диаметром 311–320 мм. В 2003 году прошли испытания и введены в эксплуатацию 2 дизель-гидравлических экскаватора РС5500 фирмы «Komatsu» емкостью ковша 23 м<sup>3</sup>. В период с 2006 по 2008 года введены в работу экскаваторы фирмы «Komatsu» РС8000 (Е = 35 м<sup>3</sup>) – 3 шт. и РС-3000 (Е = 8,5 м<sup>3</sup>) – 1 шт [8].

Экскаваторы РС8000 применяются на разрезе «Нерюнгринский» для погрузки вскрышных пород в средства автомобильного транспорта. Работают в комплексе с автосамосвалами БелАЗ-75304, –75306, Haulpak 830Е грузоподъемностью от 200 т до 220 т.

Максимальная производительность экскаваторов РС8000:

– годовая – 6838 тыс. м<sup>3</sup>

– месячная – 847 тыс. м<sup>3</sup>

Технические параметры электропотребления экскаватора «Komatsu» РС8000 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические параметры

Наименование показателей	Значение
Завод-изготовитель	КМГ
Вместимость ковша, м <sup>3</sup>	36
Максимальный радиус черпания, м	17,4
Максимальная высота черпания, м	19,4
Радиус вращения кузова, м	8,7
Длина гусеничного хода, м	10,58
Ширина гусеничного хода, м	8,15
Скорость передвижения по горизонтальной поверхности, км/ч	2,2
Уклон, преодолеваемый при передвижении, градус	12
Среднее удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>	2,63
Мощность сетевого двигателя, кВт	2 × 1450
Продолжительность цикла, с	31
Масса экскаватора с противовесом, т	700

Экскаватор предназначен для работы в условиях крайнего севера до температуры не ниже –50°С. На рисунке № 1 показана фотография «Экскаватор РС8000 в забое».

Мощность потребления электропривода экскаватора зависит от ряда параметров (подготовка забоя, производительность, сопротивления породы резания, скорость резания и др.), которые зависят от режима и условий работы машины.

Сложные процессы, происходящие при резании породы, и многообразие горно-геологических условий обусловили использование для анализа работы экскаваторов энергетических характеристик, найденных опытным путем.

Однако рассматриваемые энергетические показатели установлены без связи их с производительностью, а в некоторых случаях даже без указания на частное значение производительности, при которой они были определены. Поэтому аналитических выражений для энергетических характеристик и оценки их точности не приведено.



Рис. 1. Экскаваторы PC8000 в забое

непостоянством координации подъемного напорного движения, определяющего толщину стружки, непостоянством времени цикла и частоты включения [3].

Экспериментальные исследования показали, что расход электроэнергии у экскаваторов, работающих на угольном разрезе, зависит от много факторов: типа экскаватора, объема ковша, категории пород по экскавации, длительности цикла, производительности, угла поворота, качества подготовки забоя, кусковатости горной массы и т. д. [2, 7].

Случайные факторы, действующие на рабочие органы машины, являются причиной того что, что режим работы электропривода, которыми оснащаются одноковшовые экскаваторы имеет случайный характер электропотребления [3].

На рисунке 2 представлен график потребления активной ( $W_a$ ) и реактивной ( $W_p$ ) электроэнергии экскаватора PC8000 за сутки работы.

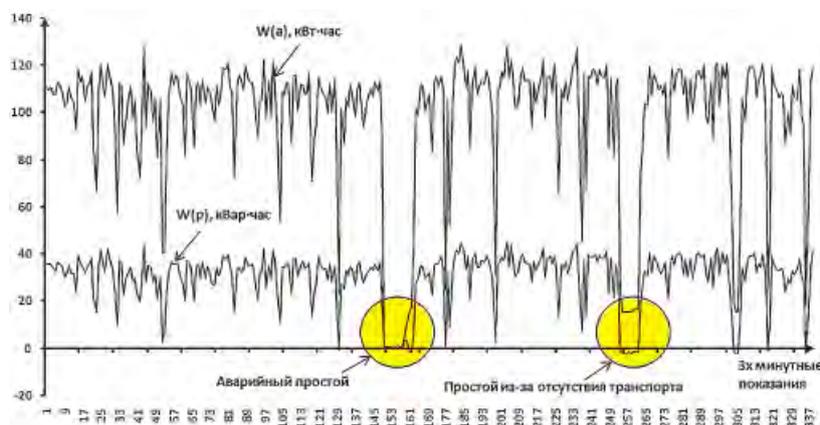


Рис. 2. Электропотребление экскаватора PC8000

Из представленного рисунка хорошо видны рабочий и холостой режимы работы экскаватора, отсутствие электропотребления связано как с аварийным отключением питающей ячейки экскаватора, так и ремонтными работами, требующими полной остановки сетевых асинхронных двигателей и насосов экскаватора.

Предварительно можно выделить три основных фактора, определяющих электропотребление экскаватора: производительность, время работы и объем вынимаемой породы [3, 6, 7].

Из трех выделенных факторов наиболее просто учитывается объем вынимаемой породы экскаватора за смену по отчетам горных участков. В статье рассматриваются данные электропотребления, производительность, время работы и объем вынимаемой породы без учета вспомогательных операций.

По экспериментальным данным были составлены корреляционные таблицы и рассчитаны параметры корреляции и уравнения зависимости общего и удельного расхода электроэнергии для самого энергоемкого электрогидравлического одноковшового экскаватора, работающего на вскрыше. Данные циклических замеров были приведены к часовому отрезку времени с коэффициентом использования механизма

во времени, равным 1. Часовую производительность для соответствующей категории грунта  $\Pi$  (тыс. м<sup>3</sup>/ч) определяли по формуле

$$\Pi = \frac{q \cdot k_u}{t_{ц}}, \quad (1)$$

где  $q$  – объем вынимаемой породы за час работы, тыс. м<sup>3</sup>;  $k_u$  – коэффициент использования ковша;  $t_{ц}$  – длительность цикла, ч.

При вычислении было принято допущение, что в течение часа экскаватор работал с углом поворота, равным углу поворота за цикл.

В таблице 2 показана теснота взаимосвязей между показателями: время работы, объем, производительность и потребление электроэнергии экскаватора PC8000.

Исследуется зависимость потребления активной  $Y_1$  (кВт·час) энергии и  $Y_2$  (кВт·час) потребление энергии, приведенное к часу от ряда факторов (переменных) экскавации, а именно:

- 1)  $x_1$  – производительность, тыс.м<sup>3</sup>/час;
- 2)  $x_2$  – время работы без дополнительных операций, мин.;
- 3)  $x_3$  – объем вынимаемой породы, тыс.м<sup>3</sup>;

Таблица 2

Матрица парных коэффициентов корреляции

	$Y_1$	$Y_2$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$Y_1$	1,00	–	–	0,99	0,96
$Y_2$	–	1,00	0,75	–	–
$x_1$	–	0,75	1,00	–	–
$x_2$	0,99	–	–	1,00	0,94
$x_3$	0,96	–	–	0,94	1,00

Анализируя матрицу парных коэффициентов, можно сделать вывод, что все факторы:  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  могут входить в модель, это связано с наиболее сильной зависимостью между этими показателями и  $Y_1$ ,  $Y_2$  (электропотребления). Как видно из таблицы 2, факторы будут входить в модель с положительным знаком, то есть, соответственно, увеличивать электропотребление экскаватора PC8000.

Представляет интерес также характер изменения некоторых полученных зависимостей. Так расход электроэнергии на экскавацию (см. рис. 3, а) с увеличением производительности стремится к постоянному значению. Такая закономерность объясняется типом привода (электрогидравлический) применяемого в экскаваторах PC8000. Факторы, влияющие на производительность, были рассмотрены в работах [6, 7].

Представляет интерес также характер изменения некоторых полученных зависимостей, на что указывает знак перед коэффициентом корреляции. Так, расход электроэнергии на экскавацию уменьшается при увеличении категории породы, т. е. при увеличении трудности экскавации. Такая закономерность просто объясняется: с увеличением трудности экскавации значительно падает производительность, а с уменьшением производительности снижается расход электроэнергии. За время работы, равное циклу, с увеличением угла поворота (при прочих неизменных условиях) несколько возрастает расход электроэнергии, что и отмечалось в работе [7]. За больший же промежуток времени (час, смена) с увеличением угла поворота увеличивается общее время длительности цикла и, следовательно, сокращается число циклов в данном отрезке времени. В результате оказывается, что уменьшение числа циклов за определенный промежуток времени сказывается на уменьшении расхода электроэнергии в несколько большей степени, чем соответствующий рост расхода при увеличении угла поворота.

По имеющимся данным строим зависимость расхода электроэнергии экскаватора PC8000 от объема вскрышных работ без учета вспомогательных операций, которые представлены на рисунке 3.

Для установления суммарной зависимости между электропотреблением на экскаваторные работы и выделенными факторами рассмотрим предварительно парные зависимости между параметрами  $W_a$  (кВт·час) энергии,  $\Pi$  (производительность тыс. м<sup>3</sup>/час),  $V$  (объем, тыс. м<sup>3</sup>) и  $t$  (время работы, мин). Результаты расчета парных зависимостей между рассматриваемыми факторами приведены в табл. 3.

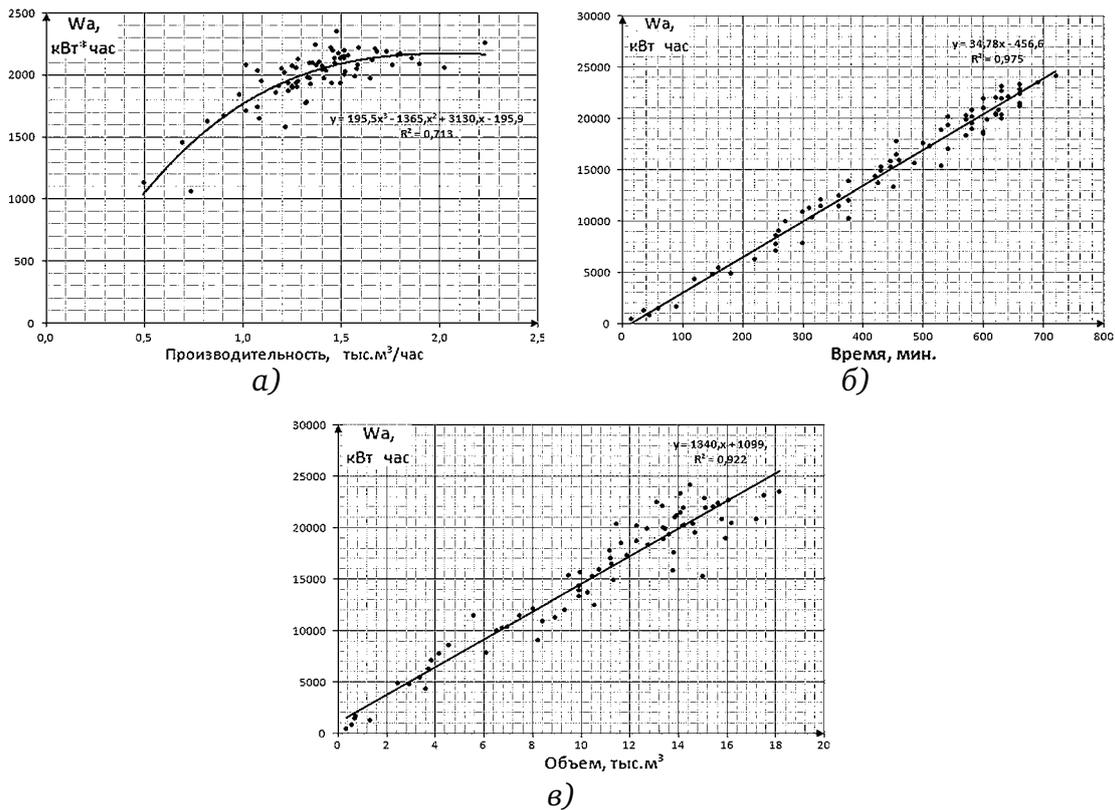


Рис. 3. Зависимости между расходом и параметрами экскавации для PC8000 без учета вспомогательных операций

Расчетами определены уравнения регрессии, по которым построены эмпирические и теоретические зависимости (рис. 3). Значения коэффициентов корреляции (табл. 2) свидетельствуют о тесной связи расхода электроэнергии с производительностью ( $R = 0,75$ ), время работы без дополнительных операций ( $R = 0,99$ ) и объем вынимаемой породы ( $R = 0,96$ ).

Начнем с построения модели

$$Y = \alpha + \beta x + \varepsilon, \quad (2)$$

где  $Y$  зависимая переменная, состоящая из двух слагаемых: 1) неслучайной составляющей  $Y_1 = \alpha + \beta x$  ( $x$  – независимая переменная,  $\alpha$  и  $\beta$  – постоянные числа – параметры уравнения); 2) случайного члена  $\varepsilon$ .

Задача регрессионного анализа состоит в получении оценок  $\alpha$ ,  $\beta$  а следовательно, и положения прямой. Для оценки параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  обычно применяют метод наименьших квадратов (МНК).

Если имеется  $n$  наблюдений, уравнение (2) можно представить в следующем виде:

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Случайное слагаемое  $\varepsilon$  можно рассматривать как последовательность  $n$  случайных величин  $\varepsilon_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Метод наименьших квадратов позволяет получить такие оценки  $a$  и  $b$  параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых сумма квадратов отклонений  $\varepsilon$  фактических значений признака  $Y_i$  от расчетных (теоретических)  $\tilde{Y}_i$  является минимальной:

$$Q(a, b) = \sum_i (Y_i - \tilde{Y}_i)^2 = \sum_i (Y_i - a - bx_i)^2 = \sum_i \tilde{\varepsilon}_i^2 - \min. \quad (3)$$

Найдем минимум функции  $Q(\alpha, \beta)$ , приравняв производные по каждой переменной  $a$ ,  $b$  к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{da} &= -2 \sum Y_i + 2na + 2b \sum x_i = 0, \\ \frac{dQ}{db} &= -2 \sum Y_i x_i + 2a \sum x_i + 2b \sum x_i^2 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

После преобразований получаем систему уравнений

$$\begin{cases} na + b \sum x_i = \sum Y_i, \\ a \sum x_i + b \sum x_i^2 = \sum Y_i x_i. \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений (5) представляет собой систему нормальных уравнений МНК. Решая систему уравнений (5), находим  $a$  и  $b$

$$\begin{cases} a = \bar{Y} + b\bar{x}, \\ b = \frac{\text{cov}(x, Y)}{\sigma_x^2}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\bar{x} = (\sum x_i)/n$ ,  $\bar{Y} = (\sum Y_i)/n$ ,  $\text{cov}(x, Y) = \bar{Yx} - \bar{Y}\bar{x}$ ;

$$\bar{Yx} = \sum Y_i x_i, \sigma_x^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2, \overline{x^2} = (\sum x_i^2)/n.$$

Коэффициент  $b$  при  $x$  называется выборочным коэффициентом регрессии. Если переменную  $x$  изменить на единицу, т. е. взять за  $x$  величину  $x+1$ , то новое значение  $Y_1(x+1)$  будет равно  $Y_1(x) + b$ . Следовательно, коэффициент регрессии показывает среднее изменение результата  $Y$  при изменении фактора  $x$  на единицу.

Таблица 3

**Результаты расчетов параметров линейной модели  
(расхода электроэнергии на экскаваторные работы)**

Зависимость	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
$Wa = f(\Pi)$	$Wa = 581\Pi + 1187$	$R^2 = 0,565$
$Wa = f(t)$	$Wa = 34,78t - 456,6$	$R^2 = 0,975$
$Wa = f(V)$	$Wa = 1340V + 1099$	$R^2 = 0,922$

Для улучшения модели рассмотрим нелинейные уравнения регрессии расхода электроэнергии на экскаваторные работы.

Таблица 4

**Результаты расчетов параметров нелинейных моделей  
(расхода электроэнергии от производительности  $Wa = f(\Pi)$ )**

Зависимость	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
$Wa = f(\Pi)$	$Wa = 1244e^{0,334\Pi}$	$R^2 = 0,542$
$Wa = f(\Pi)$	$Wa = 769,5 \ln(\Pi) + 1761$	$R^2 = 0,662$
$Wa = f(\Pi)$	$Wa = -568\Pi^2 + 2115\Pi + 200,7$	$R^2 = 0,709$
$Wa = f(\Pi)$	$Wa = -195,5\Pi^3 + 1365\Pi^2 + 3130\Pi + 195,9$	$R^2 = 0,713$
$Wa = f(\Pi)$	$Wa = -1627\Pi^{0,451}$	$R^2 = 0,662$

Таблица 5

**Результаты расчетов параметров нелинейных моделей  
(расхода электроэнергии от времени копания  $Wa = f(t)$ )**

Зависимость	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
$Wa = f(t)$	$Wa = 2159e^{0,003t}$	$R^2 = 0,808$
$Wa = f(t)$	$Wa = 8008 \ln(t) - 32376$	$R^2 = 0,805$
$Wa = f(t)$	$Wa = -0,001t^2 + 36,09t + 645,2$	$R^2 = 0,975$
$Wa = f(t)$	$Wa = -0,00002t^3 + 0,018t^2 + 30,12t + 260,6$	$R^2 = 0,975$
$Wa = f(t)$	$Wa = -19,53t^{1,087}$	$R^2 = 0,979$

Таблица 6

**Результаты расчетов параметров нелинейных моделей  
(расхода электроэнергии от объема вынимаемой породы  $W_a = f(V)$ )**

Зависимость	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
$W_a = f(V)$	$W_a = 2562 e^{0,15V}$	$R^2 = 0,768$
$W_a = f(V)$	$W_a = 6954 \ln(V) + 314,5$	$R^2 = 0,796$
$W_a = f(V)$	$W_a = -21,96 V^2 + 1736 V - 156,1$	$R^2 = 0,927$
$W_a = f(V)$	$W_a = -3,447 V^3 + 72,55 V^2 + 1030 V + 907,1$	$R^2 = 0,930$
$W_a = f(V)$	$W_a = -1656 V^{0,944}$	$R^2 = 0,967$

Для анализа общего качества оцененной парной регрессии используют коэффициент детерминации  $R^2$ , называемый также квадрат коэффициента корреляции переменных  $x$  и  $y$ .

Предположение и проверка адекватности уравнения регрессии. Метод наименьших квадратов предполагает ряд ограничений на поведение случайного слагаемого  $\varepsilon$ -условия Гаусса-Маркова:

- 1) нулевое математическое ожидание,  $M(\varepsilon_i) = 0, i = 1, 2, \dots, n$ ;
- 2) равные дисперсии ошибок для всех наблюдений,  $D(\varepsilon_i) = \sigma^2, i = 1, 2, \dots, n$ ;
- 3) ошибки модели  $\varepsilon_i$  при разных наблюдениях независимы. В частности, корреляционный момент, или ковариация, между  $\varepsilon_i$  и  $\varepsilon_j$  при  $i \neq j$  равен 0:  $\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$  для  $i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n$ ;
- 4) для всех  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  случайные ошибки  $\varepsilon_i$  распределены по нормальному закону, а  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – фиксированный вектор.

Одним из показателей качества построенного уравнения регрессии является коэффициент детерминации  $R^2$ . По определению [4]

$$R^2 = \frac{D(Y_1)}{D(Y)}, \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{D(\varepsilon)}{D(Y)}. \quad (8)$$

Значение  $R^2$  близко к единице. Это указывает на хорошее (адекватное) описание объясняемой переменной  $Y$  полученным уравнением регрессии.

На рисунке 4 показаны зависимости электропотребления активной энергии и реактивной от объемов вынимаемой породы за смену, судя по графикам зависимости  $W_a = f(V)$  и  $W_p = f(V)$  от параметров экскавации хорошо описываются степенными функциями.

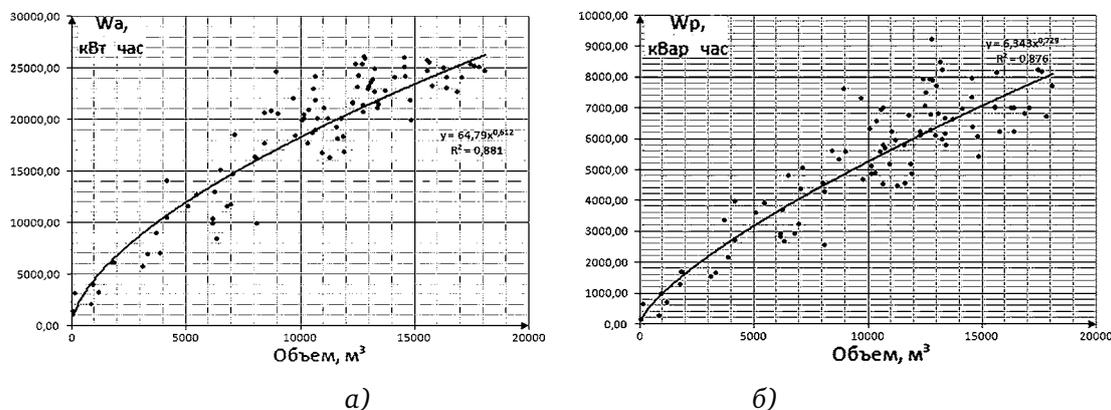


Рис. 4. Зависимости между расходом и параметрами экскавации за смену работы для РС8000 без учета вспомогательных операций

Таблица 7

## Результирующие уравнения

Зависимость	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
$W_a = f(\Pi)$	$W_a = 1727\Pi^{0,451}$	$R^2 = 0,662$
$W_a = f(V)$	$W_a = 1656V^{0,944}$	$R^2 = 0,967$
$W_a = f(t)$	$W_a = 19,53t^{1,087}$	$R^2 = 0,979$

Погрешность определения расходов электроэнергии, полученная по формуле и выраженная через величину коэффициента детерминации, представленная в таблице 7 и расходами, найденными экспериментально по уравнениям зависимости расхода от параметров объема вынимаемой породы без учета вспомогательных операций, составила не более 5–7%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калинина В. Н., Соловьев В. И. Введение в многомерный статистический анализ: Учебное пособие/ГУУ. – М., 2003. – 66 с.
2. Олейников В. К. Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях. М., Недра, 1983. 192 с.
3. Гайдукевич В. И., Титов В. С. Случайные нагрузки силовых электроприводов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с., ил.
4. Яновский Л. П. Введение в эконометрику: учебное пособие/Л. П. Яновский, А. Г. Буховец; под ред. Л. П. Яновского. – 2-е изд., доп. – М.: КНОРУС, 2007. – 256 с.
5. Валентинов В. А. Эконометрика: Учебник. – М.: Издательство торговая корпорация «Дашков и К<sup>о</sup>», 2006. – 448 с.
6. Белых Б. П., Свердель И. С., Олейников В. К. Электрические нагрузки и электропотребление на горнорудных предприятиях. М., Недра, 1971.
7. Д. В. Антоненков, А. Ю. Южанников. Анализ электропотребления электрогидравлического экскаватора//МНПК «Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2009», Т. 5. Технические науки, – Одесса. – С. 35–38.
8. Антоненков Д. В., Дедюлькин Е. Г. Особенности электроснабжения каменноугольного разреза в условиях Южно-Якутского региона//Журнал «Электрика». – 2008. – № 7 – С. 28–33.

# ПРИМЕНЕНИЕ ПЛИТ ИЗ СИЛИКАТА КАЛЬЦИЯ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ

В. Крассельт<sup>1</sup>, Г. Уайт<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Promat GmbH, г. Ратинген, Германия

<sup>2</sup>Promat International, г. Тиссельт, Бельгия

## Введение

Производство первичного алюминия производится в электролизерах (электролитических ваннах), где происходит разложение глинозема и в процессе электролиза из криолита выделяется металлический алюминий.

Для футеровки электролизеров применяются следующие материалы:

- Плиты из силиката кальция
- Вермикулитовые плиты
- Диатомитовый кирпич

Применение плит PROMASIL® на основе силиката кальция имеет целый ряд существенных преимуществ.

Фронтальная часть электролизера футеруется огнеупорными материалами с высокой теплопроводностью, такими как карбид кремния и графит. В связи с этим особое значение придается применению теплоизоляционных материалов в качестве подложки для пояса затвердевания, изготовленного с применением огнеупоров, устойчивых к износу.

Основными теплоизоляционными материалами для этой цели являются плиты из силиката кальция с низкой плотностью, вермикулитовые плиты и диатомитовый кирпич. Фирма Promat занимается производством материалов как на основе силиката кальция, так и вермикулита. По ассортименту продукции на основе силиката кальция для различных технических приложений фирма Promat занимает лидирующие позиции в мире. PROMASIL® – это фирменное название материала с низкой плотностью на основе силиката кальция.

PROMASIL® производится путем литья суспензии в плоские изложницы, процесса автоклавирования, сушки и распиловки слябов на плиты стандартных размеров. Promat это единственная компания в мире, владеющая данной технологией, в настоящее время. Стандартные размеры 500 × 1000 мм, толщина от 20 до 150 мм. Альтернативная технология фильтрпрессования позволяет производить плиты толщиной не более 100 мм.

## Материалы

Было проведено исследование свойств различных материалов для изоляции электролизеров. Изучались следующие параметры:

- Плотность
- Прочность на сжатие
- Жаропрочность под нагрузкой
- Теплопроводность
- Усадка при рабочей температуре
- Химическая стойкость к алюминию и фторидам натрия и калия

Исследование характеристик прочности на сжатие, плотности и усадки проводилось по методике EN 1094. Измерение степени усадки проводилось при 800 °С в течение 12 ч. Жаропрочность под нагрузкой проводилась по методике EN 993–8 при давлении 0,05 МПа.

Теплопроводность измерялась по методике EN 993–14 с помощью перекрестного термоэлемента. Исследование стабильности свойств при взаимодействии с алюминием и криолитом проводилось по комбинированной методике, описанной в работе [1]. Испытания в тигле смеси 55 г алюминия и 25 г соли (45 % NaCl + 45 % KCl + 10 % NaF) проводились при температуре 950 °С, 24 и 72 часа, см. рис. 3.

Результаты всех измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты измерений**

	PROMASIL®	Диатомовый кирпич	Вермикулит
Классификационная температура, °С	1000	900	1100
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	245	465	365
Усадка 800 °С 12 ч, %	0,8	0,3	- 0,2
Прочность на сжатие, Н/мм <sup>2</sup>	1,8	1,3	1,4
Жаропрочность под нагрузкой T <sub>1</sub> (°С) 0,05 Н/мм <sup>2</sup>	750	840	700
Химическая стойкость к Al + криолит	Al +++ NaCl, KCl, NaF ---	Al +++ NaCl, KCl, NaF ---	Al +++ NaCl, KCl, NaF ---
Теплопроводность, Вт/мК			
200 °С	0,07	0,12	0,14
400 °С	0,10	0,14	0,16
600 °С	0,14	0,16	0,18
800 °С	0,17	0,18	0,21

+++ Хорошая химическая стойкость.

--- Отсутствие химической стойкости.

PROMASIL® – 1000 производится двумя плотностями 245 и 285 кг/м<sup>3</sup>. Характеристики наиболее легкого материала сравнивались с вермикулитом и диатомитом. В сочетании с большими габаритами, – всё это позволит наиболее успешно производить монтаж теплоизоляции.

Для всех материалов усадка при 800 °С за 12 часов составила менее 1 % при прочности на сжатие более 1 МПа, что должно быть пределом, с учетом термической стабильности, прикладываемого веса и материалов, применяемых на производстве.

При оценке жаропрочности под нагрузкой необходимо также учесть ряд характеристик. PROMASIL® является гидратом силиката кальция, в связи с этим при температурах от 200 до 600 °С наряду с усадкой материала также происходит дегидратация. При температурах до 600 °С вермикулит имеет тенденцию растрескиваться. Диатомит – это отоженный кирпич и, в связи с этим, имеет более высокое значение T<sub>1</sub>.

Все три материала проявили химическую стойкость к алюминию. Данные материалы не обладают химической стойкостью к фторидам натрия и калия. Испытания в тигле при температуре 950 °С в течение 24 ч показаны на рисунке 1.



Рис. 1. Испытания образцов в тигле при температуре 950 °С в течение 24 ч

Смачивание алюминием не наблюдалось, но в связи с открытой пористостью имела место инфильтрация солей.

После 72 часов отжига все три образца разрушились.

Теплопроводность теплоизоляционного материала на основе силиката кальция PROMASIL® очень низка, меньше диатомитового кирпича и существенно ниже вермикулита.

Матрица PROMASIL® имеет хаотичную мелкодисперсную игольчатую структуру ксонотлита.

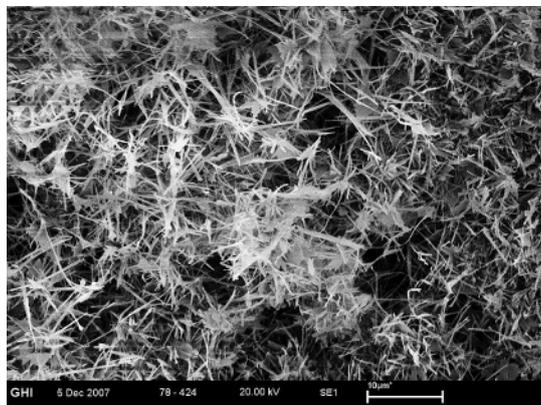


Рис. 2. Снимок PROMASIL®, сделанный на сканирующем электронном микроскопе при увеличении 5000

Конвекция не играет существенной роли в связи с малым размером пор в несколько микрон (рис. 4).

В результате исследования материалов, можно сделать вывод, что все три материала пригодны для испытаний в тигле, что и подтверждается многолетней практикой.

### Проектирование

Уникальность производственного процесса PROMASIL® предоставляет дополнительные преимущества при проектировании:

- Простота и
- эффективность планировок

На диаграмме показана концепция применения PROMASIL® для теплоизоляции электролизеров во всем мире. Легко понять, в чем заключаются преимущества применения PROMASIL® по сравнению с диатомитовым кирпичом.

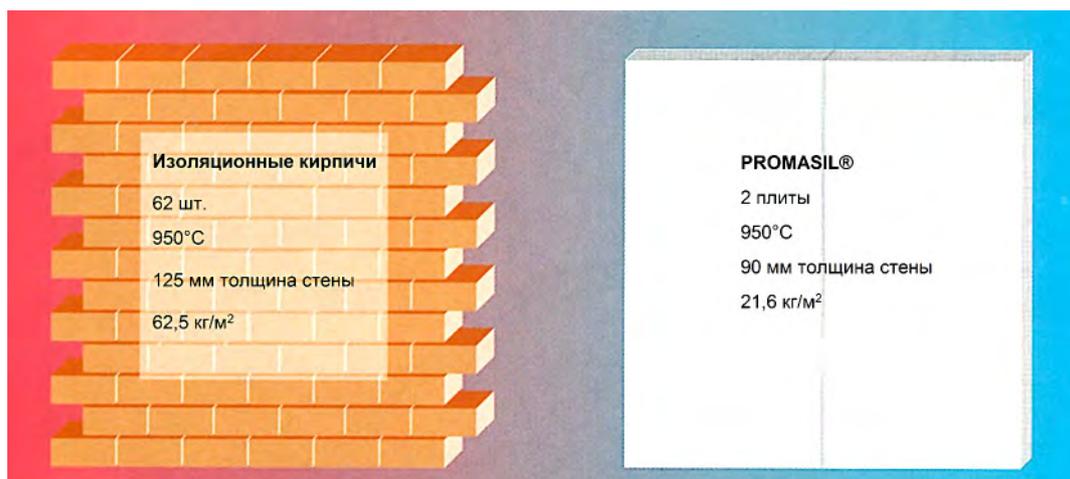


Рис. 3. Сравнение изоляционных свойств кирпичной кладки и плит PROMASIL®

Кол-во элементов участвующих в монтаже изоляции может быть значительно снижено. Нет технических ограничений на толщину изоляционного покрытия, облегчается монтаж сложных элементов конструкции. На рис. 4 проведено сравнение между традиционной изоляцией и плитами PROMASIL®.

Большое количество соединений, присутствующих в традиционной изоляции приводит к созданию тепловых мостов и сложностям при монтаже. Используя изоляционные материалы Promat, все неудобства будут исключены. Весь монтаж занял один час.

Плиты легко подгонять по форме, используя столярный инструмент. Для точного и быстрого монтажа теплоизоляции плитам можно придать заданную форму уже на фабрике (рис. 6).



Рис. 4. Сравнение между традиционной изоляцией и плитами PROMASIL®

Рис. 5. Быстрый монтаж изоляционных плит PROMASIL®



Рис. 6. Угловые и нестандартные детали изоляционных плит PROMASIL®

## Выводы

С начала XX века компания Promat уходит историческими корнями в производство теплоизоляционных материалов на основе силиката кальция. За продолжительную историю компания овладела целым рядом разнообразных технологий производства данных теплоизоляционных материалов.

Всё это позволяет гибко реагировать на интерес рынка к данной продукции. Производство первичного алюминия производится в электролизерах. Данный способ выдвигает повышенные требования к вопросам энергосбережения. Для значительного снижения тепловых потерь предлагается использовать плиты на основе силиката кальция PROMASIL®. Как было рассказано выше, применение данного теплоизоляционного материала предоставляет следующие преимущества:

- Отсутствие конструктивных ограничений.
- Мобильность поставок материала.
- Снижение стоимости теплоизоляции.
- Безопасность монтажа.

Боле того, необходимо отметить, что предлагаемые решения проверены на многолетнем опыте успешной работы. Фактически Promat является не только производителем и поставщиком материалов, Promat также обеспечивает техническую поддержку каждого заказчика для достижения наилучших показателей энергоэффективности оборудования.