

тугоплавких оксидов// Докл. РАН. 2001. Т. 380. № 3. С. 342—345.

34. Ault N. N. Characteristics of Refractory Oxide Coatings Produced by Flame-Spraying// J. Am. Ceram. Soc. 1957. V. 40. № 3. P. 69-74.

35. Thompson V. S., Whittemore O. J. Structural Changes on Reheating Plasma-Sprayed Alumina// Ceram. Bull. 1968. V. 47. № 7. P. 637—641.

36. Nukui A., Tagai H., Morikawa H., Iwai S.-I. Structural Conformation and Solidification of Molten Alumina // J. Am. Ceram. Soc. 1976. V. 59. № 11—12. P. 534—536.

37. Coutures J.-P., Rifflet J.-Cl., Florian P., Massiot D. Etude par analyse thermique et par RMN tres haute temperature de  $^{27}\text{Al}$  de la solidification de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en l'absence de nucleation heterogene: effets de la temperature du liquide et de la pression partielle d'oxygene// Rev. Int. Hautes Temper. Refract., Fr. 1994. V. 29. P. 123—142.

38. Ansell S., Krishnan S., Weber J. K. R., Felten J. J., Nordine P. C. Structure of Liquid Aluminum Oxide// Phys. Rev. Letters. 1997. V. 78. № 3. P. 464—466.

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2007 г.

## Absorption coefficient of molten aluminum oxide

V. K. Bityukov, V. A. Petrov

Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics, and Automation  
(Technical University), Moscow, Russia

*A review of the available experimental data and recommended analytical approximations on the spectral and temperature dependencies of the absorption coefficient of molten aluminum oxide in semitransparent wavelength range is presented. An effect of main physical and chemical processes on the absorption coefficient is considered. It is shown that total set of data can be divided into two big groups, differed greatly in the values of absorption. However, it is impossible to obtain the recommended values for each group due to a big discrepancy of data.*

УДК 669.71:519.6

## Повышение эффективности электролиза алюминия с помощью математического моделирования

А. В. Алаторцев, Р. Н. Кузьмин, Н. П. Савенкова

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

О. Г. Проворова

Красноярский государственный университет, Красноярск, Россия

*Рассмотрены возможности повышения эффективности работы алюминиевых электролизеров с помощью математического моделирования, проведенного на основе многомерных уравнений Навье—Стокса и системы уравнений Максвелла с учетом индуцированных токов. Представлены расчеты динамики поверхности раздела между металлом и электролитом для различных геометрий электролизера, проведенные с помощью вычислительного комплекса, реализующего предложенную математическую модель.*

В настоящее время развиты две технологии производства первичного алюминия в электролизерах: с предварительно обожженными анодами и с самообжигающимися анодами. Наиболее распространенными в мире являются электролизеры с обожженными анодами (70 % добываемого алюминия). Технология электролиза с обожженными анодами подразумевает периодическую замену анодов, в процессе чего могут происходить нежелательные возмущения среды, приводящие к сни-

жению эффективности производства вплоть до остановки электролизера.

В работе предлагается дальнейшее развитие динамической модели МГД-процессов в алюминиевом электролизере [1], позволяющее моделировать процесс замены анодов. Проводится исследование устойчивости работы электролизера при различных схемах замены анодов, их числе в электролизере и форме электролизера.

Для численного эксперимента выбрана упрощенная модель алюминиевого электролизера с обожженными анодами, которая по форме представляет собой прямоугольный бак. Вертикальный ток течет от угольных анодных блоков, частично погруженных в электролит, через слой этого электролита, где в результате электролиза выделяется алюминий, и слой жидкого алюминия до угольного катода. Слои электролита и металла не перемешиваются. Вдоль бортов электролизера находится застывший слой электролита — настыль, которая служит защитой от коррозии внутренней поверхности ванны электролитом (рис. 1).

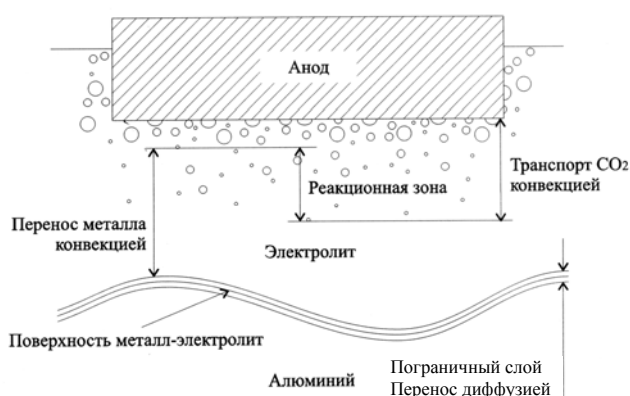


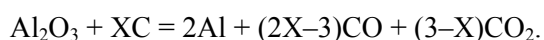
Рис. 1. Рабочая зона межполюсного зазора электролизера

Алюминий добывается путем электролиза криолитоглиноземного расплава в электролизной ванне [2, 3]. Основными компонентами криолитоглиноземного расплава являются глинозем  $Al_2O_3$ , криолит  $Na_3AlF_6$  и фтористый алюминий  $AlF_3$ . В промышленном электролите всегда присутствует фтористый кальций —  $CaF_2$ , который снижает температуру плавления и, соответственно, потери алюминия.

Электролит в расплавленном состоянии диссоциирует на ионы. Положительно заряженные ионы (катионы) разряжаются на катоде, отрицательные ионы (анионы) — на угольном аноде.

Основной процесс на катоде — восстановление трехвалентного алюминия  $Al + 3e = Al$ , на угольном аноде происходит разряд кислородосодержащих ионов с образованием окислов углерода  $CO$  и  $CO_2$ .

Суммарная реакция, происходящая в электролизере, может быть представлена в виде уравнения



Следовательно, в процессе электролиза в основном расходуются глинозем и углерод (в смеси пека и кокса), а также электроэнергия на разложение глинозема и поддержание рабочей температуры, дополнительно расходуются фтористые соли.

Процесс электролиза непрерывный, поэтому в электролит периодически загружают глинозем (а в самообжигающийся анод — анодную массу). Для поддержания уровня и состава электролита загружают свежий и вторичный криолит, оборотный электролит, фтористый алюминий и кальцинированную соду.

Основным показателем работы электролизера является выход по току, т. е. отношение количества практически полученного алюминия к количеству, которое должно выделиться на катоде согласно закону Фарадея

$$\eta = \frac{P(t)}{It \cdot 0,335} \cdot 100 \%$$

В процессе производства алюминия возникают нежелательные явления (циркуляция металла, волнообразование на поверхности металла, перекос анода и др.), что ведет к негативным последствиям: размыву настылей, разрушению подовых и анодных блоков, прорыву металла, перемешиванию алюминия с электролитом и пр. В результате нарушается технологический режим, снижается выход по току и уменьшается срок службы электролизеров. Важно знать, как изменения конструкции и технологических параметров отражаются на процессах, происходящих в электролизере.

Считается, что первопричина снижения выхода по току — окисление растворенного алюминия анодным газом ( $CO_2$ ). Основная реакция, вызывающая потери металла,



Алюминий попадает в рабочую зону вследствие либо растворения, либо диспергирования.

Для уменьшения энергетических потерь нужно слой электролита по возможности уменьшать, но при этом на поверхности раздела металл—электролит могут возникнуть колебания. При некоторых условиях наблюдается рост амплитуд этих волн, который называется неустойчивостью или магнитогидродинамической (МГД) нестабильностью. Даже простое незатухающее колебание поверхности раздела должно быть устранено, так как при нем возрастает массоперенос растворенного алюминия от катода в межполюсное пространство, где он снова окисляется. МГД-нестабильность является основным препятствием увеличения выхода по току.

При замене выгоревших анодов, которые выводят по 1—2 шт. по мере их выгорания, происходит перераспределение токов (суммарная величина которых примерно равна 260 кА) по анодам, что влечет за собой изменение распределения токов в металле и электролите, а значит, ведет к изменению величины электромагнитной силы, дейст-

вующей в этих средах. Это в свою очередь вызывает изменение распределения скоростей в электролите и металле, образование вихрей в средах, что вызывает возмущение границы раздела сред металла и электролита. Часто при этом возникает МГД-нестабильность, зазор между анодом и жидким металлом становится меньше допустимого,  $\approx 3$  см (значение минимально допустимого межполюсного расстояния (МПР) для каждой электролизной ванны индивидуально).

Известно, что плотность чистого алюминия зависит от температуры следующим образом:

$$T = 18 \text{ }^\circ\text{C}: \rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ г/см}^3;$$

$T = 658 \text{ }^\circ\text{C}: \rho_{\text{Al}} = 2,382 \text{ г/см}^3$  (температура плавления алюминия);

$$T > 658 \text{ }^\circ\text{C}: \rho_{\text{Al}} = 2,382 - 0,000273(t - 658) \text{ г/см}^3;$$

$$T = 950 \text{ }^\circ\text{C}: \rho_{\text{Al}} = 2,302 \text{ г/см}^3;$$

а плотность криолита:

$$T = 18 \text{ }^\circ\text{C}: \rho_{\text{Na}_3\text{AlF}_6} = 2,948 \text{ г/см}^3;$$

$T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}: \rho_{\text{Na}_3\text{AlF}_6} = 2,08 \text{ г/см}^3$  (температура плавления криолита);

$$T > 1000 \text{ }^\circ\text{C}: \rho_{\text{Na}_3\text{AlF}_6} = 2,08 - 0,00088(t - 100) \text{ г/см}^3.$$

Таким образом, с ростом температуры плотность алюминия падает меньше, чем плотность криолита, в итоге уже при  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  плотность алюминия больше плотности криолита на 10 %. Поэтому выделяющийся в результате электролиза алюминий осаждается на подине ванны под электролитом.

Если температура меньше  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ , то электролит может кристаллизоваться, и плотность алюминия станет меньше плотности криолита. Тогда металл всплывет на поверхность. Чем выше электропроводность электролита, тем меньше падение напряжения при прохождении через него тока, т. е. затраты электроэнергии будут меньше. Максимальная электропроводность электролита равна  $4,46 \text{ мо/см}$  при температуре  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если в электролит добавить фтористый натрий и фтористый алюминий, то его проводимость будет почти в 2 раза меньше ( $2,67 \text{ мо/см}$ ), т. е. затраты энергии возрастут. Однако повышение температуры на каждые  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  понижает выход по току на 3—4 %. При температуре  $940 \text{ }^\circ\text{C}$  выход по току составляет 95 %, при температуре  $980 \text{ }^\circ\text{C}$  — 74 %. Поэтому надо поддерживать температуру в пределах  $940$ — $970 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Важным параметром, влияющим на эффективность работы электролизера, является МПР — расстояние между подошвой анодов и поверхностью металла. Чем больше МПР, тем больше выход по току. Если МПР больше 6 см, то выход по току растет незначительно; если МПР меньше 3 см, то выход по току резко снижается, так как алюминий попадает в реакционную зону, где про-

исходит его обратное окисление. Поэтому для большинства ванн оптимальное МПР 4—6 см.

Одна из основных задач текущей технологии — создание условий в межполюсном пространстве, при которых уменьшается поток растворенного и диспергированного алюминия с поверхности катода и снижается вероятность его вторичного окисления, а также создание условий, при которых уменьшается вероятность зажатия ванны (когда МПР становится меньше допустимого).

Таким образом, при электролизе криолитоглиноземных расплавов на выход по току влияют: температура электролита, межполюсное расстояние, плотность тока, состав электролита и, конечно, качество обслуживания ванны.

Поскольку физические эксперименты по оптимизации работы электролизера трудоемки, а замеры полей при температуре, близкой к  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , на практике дают погрешность порядка 15 %, возрастает роль численного эксперимента на основе математического моделирования.

Для описания динамических процессов в алюминиевом электролизере авторами ранее была предложена математическая модель [1], построенная на основе классической системы уравнений магнитной гидродинамики в переменных Эйлера [4].

В настоящей работе предлагается дальнейшее развитие модели [1]. Степень адекватности модели повышается за счет добавления уравнений для перерасчета плотностей тока в обеих средах на основе токов, подведенных к анодам и катоду, следуя методике [5]. При этом в системе уравнений для жидкого металла для перерасчета плотности тока ставится задача Неймана для уравнения Пуассона

$$\Delta\varphi_1 = \frac{j_{z1}^{out} - \frac{\sigma_1}{h_1}\varphi_1}{\sigma_1 h_1};$$

$$\left. \frac{\partial\varphi_1}{\partial\vec{n}} \right|_{\Gamma} = 0, \quad \varphi_1(x_0, y_0) = \varphi_0;$$

$$\vec{j}_1 = -\sigma_1 \nabla\varphi_1.$$

В системе уравнений для среды электролита также ставится задача Неймана для уравнения Пуассона

$$\Delta\varphi_2 = \frac{j_{z2} - j_{mk}}{\sigma_2 h_2};$$

$$\left. \frac{\partial\varphi_2}{\partial\vec{n}} \right|_{\Gamma} = 0, \quad \varphi_2(x_0, y_0) = \varphi_0;$$

$$\vec{j}_2 = -\sigma_2 \nabla\varphi_2,$$

где  $h_1, h_2$  — высота слоев жидкого металла и электролита, соответственно;

- $\sigma_1, \sigma_2$  — электрическая проводимость жидкого металла и электролита, соответственно;
- $\varphi_1, \varphi_2$  — электрический потенциал в средних слоях жидкого металла и электролита, соответственно;
- $j_1, j_2$  — плотность электрического тока в средних слоях жидкого металла и электролита, соответственно;
- $j_{z1}^{out}$  —  $z$ -компонента плотности электрического тока, выходящего из слоя металла;
- $j_{z2}$  —  $z$ -компонента плотности электрического тока в электролите;
- $j_{mk}$  —  $z$ -компонента плотности тока на границе металл—дно электролизера.

В математическую модель внесено уравнение для продольных колебаний поверхности жидкого металла, обусловленных образованием механической волны на границе раздела сред металл—электролит

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) + \beta \left( \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial x} \right);$$

$$\left. \frac{\partial h_1}{\partial t} \right|_{\Gamma} = 0,$$

где  $u_1, v_2$  —  $x$ - и  $y$ -компоненты вектора скорости в среднем слое металла;

$\alpha, \beta \in (0,1)$  — заданные коэффициенты, отвечающие характерным горизонтальным размерам алюминиевого электролизера вдоль координат  $x$  и  $y$ , соответственно.

В модели сделаны следующие допущения и предположения:

- температура сред постоянна;
- плотность сред постоянна;
- ток в электролите вертикальный;
- ток в аноде вертикальный и равномерно распределен в объеме каждого анода;
- потенциал металла равен нулю относительно других слоев;
- процессы в электролизере протекают медленно по вертикальной координате по сравнению с горизонтальными направлениями.

На основе последнего предположения, а также учитывая, что вертикальные линейные размеры электролизной ванны на порядок меньше горизонтальных (расстояние от верхней границы электролита до дна ванны порядка 40 см, в то время как длина ванны около 9 м), проведено интегрирование системы по вертикальной координате, в результате которого произведен переход к значениям основных физических величин в средних слоях

жидкого металла и электролита, однако сохранена информация о распределении высоты слоев обеих этих сред.

Предложенная система описывает физические процессы: адвекции и диффузии, трения жидких слоев между собой и на внешних границах, электромагнитной индукции, возмущения сред электромагнитными силами. Система дает динамику основных характерных полей: скоростей, давления, напряженности магнитного поля и плотностей возмущающих электромагнитных сил в средних слоях обеих сред, при этом взаимодействие между средами происходит за счет трения слоев на границе раздела. Входными данными служат гидродинамические и магнитные параметры обеих сред, величины токов, подаваемых на каждый из 22 анодов, начальное распределение скоростей и поверхности раздела, а также конфигурация расположения анодов, их форма и форма настывли. Варьируя этими входными параметрами с учетом математического эксперимента, можно судить о работе электролизера по результатам расчетов.

Система численно решается с помощью разделения на этапы по физическим процессам. При этом на одних этапах используются разностные схемы, а на других — аналитически полученное точное решение, записанное в разностном виде. Общая схема расчета представлена на рис. 2.

На рис. 3, *а, б* представлены графики максимальной высоты металла в зависимости от времени при расчетах без учета уравнения для продольных колебаний поверхности и с его учетом.

Данное уравнение оказывает существенное влияние на моделирование процесса колебания поверхности раздела жидкий металл—электролит, с его включением система более адекватно описывает процессы в электролизере.

На рис. 4, *а, б* представлены графики динамики поверхности раздела при извлечении двух разных пар анодов. Расположение извлеченных анодов показано на графиках напряженности магнитного поля.

Данные работы [1] и использование результатов настоящего исследования позволяют сделать некоторые общие выводы, которые показывают возможность математического моделирования процесса электролиза в различных условиях. Математическая модель позволяет численно исследовать различные режимы работы ванн, следить за динамикой процессов в ванне при возникновении неполадок в ее работе и предвидеть некоторые из них.

Неполадки в работе ванн — это такие расстройства процесса электролиза, которые приводят к снижению выхода по току и качества получаемого алюминия, к перерасходу электроэнергии и сырья, а также к более серьезным последствиям — аварийному состоянию ванн, требующему выключения отдельных ванн и даже целой их группы.

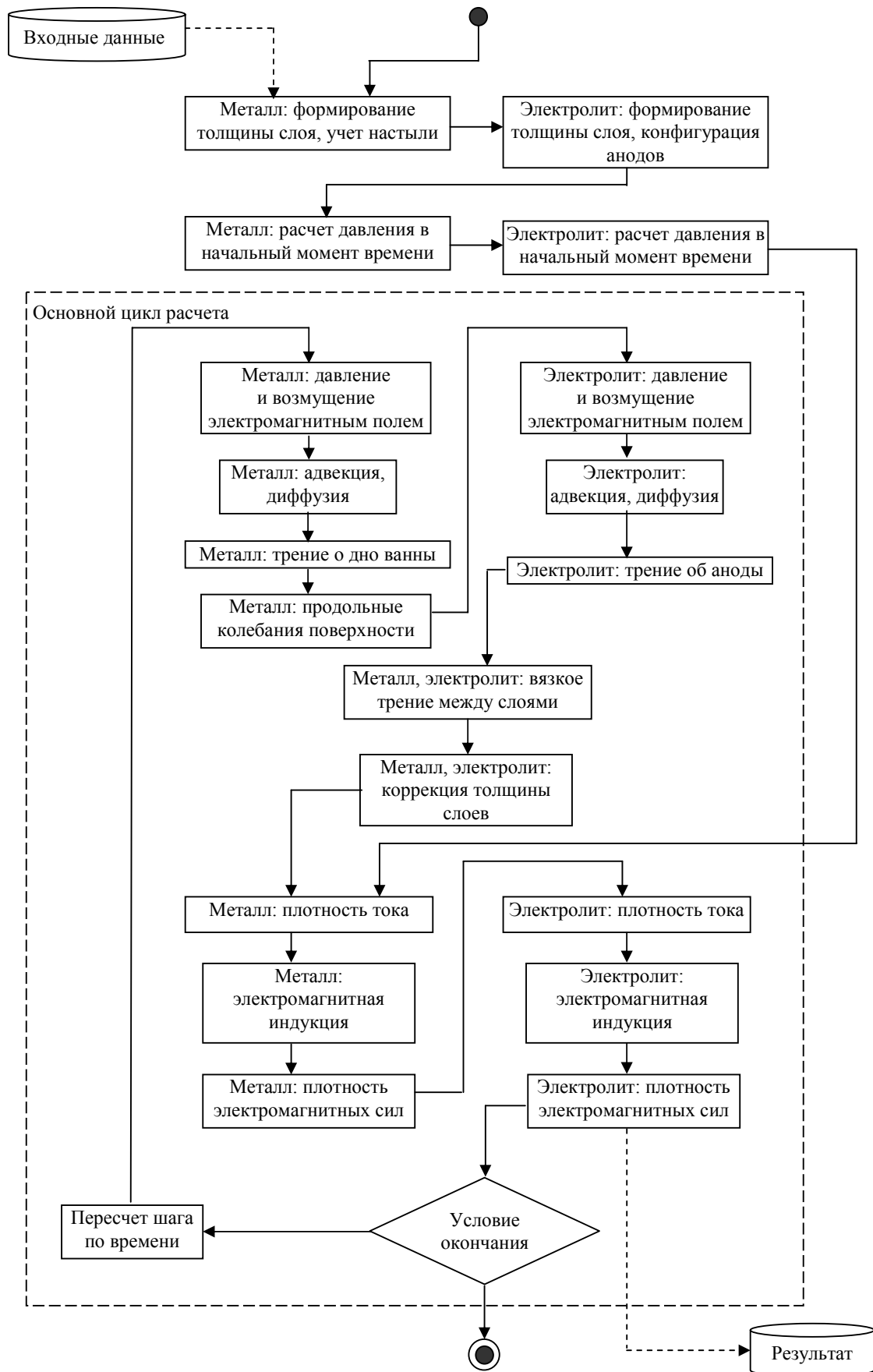


Рис. 2. Схема расчета системы

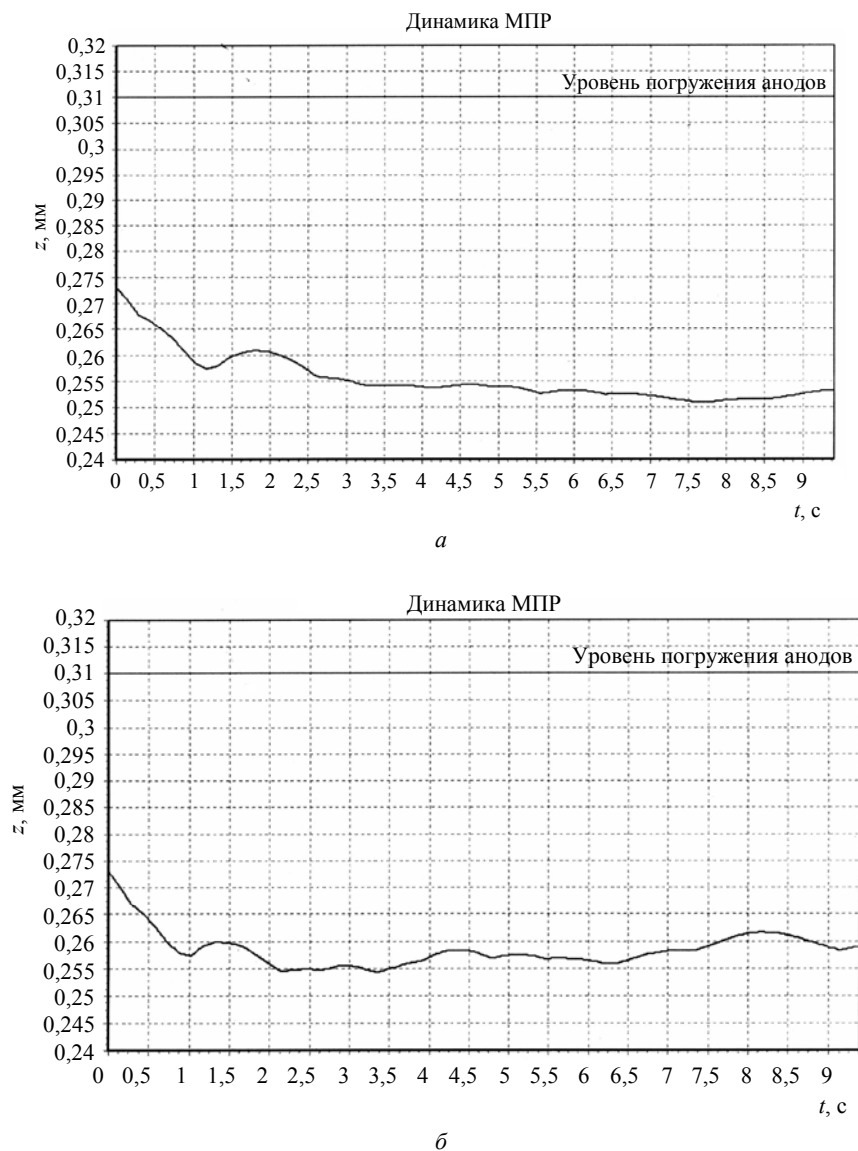


Рис. 3. Динамика МПР:

а — без учета продольных колебаний поверхности; б — с учетом продольных колебаний поверхности

К основным неполадкам в работе ванн могут быть отнесены следующие:

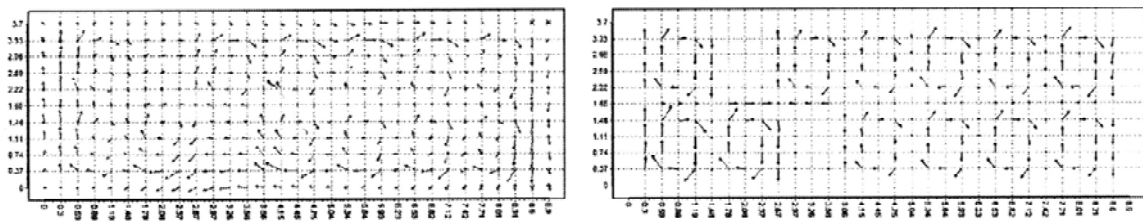
- холодный ход ванны;
- выпадение глинозема на подину ванны;
- затяжной, "негаснущий" анодный эффект;
- горячий ход ванны.

*Холодный ход ванны* наблюдается, если она получает недостаточное количество тепла вследствие пониженной силы тока серии, малого МПР, а также большого количества металла в ванне. Предложенная модель позволяет моделировать изменение тока серии путем варьирования токов, входящих в каждый анод. Малое МПР и большое количество металла в ванне моделируются путем равномерного уменьшения толщины электролита  $h_2$  по всей площади электролизера и увеличения высоты металла  $h_1$ , соответственно.

*Выпадение глинозема на подину ванны*, или "отравление ванны глиноземом", может происхо-

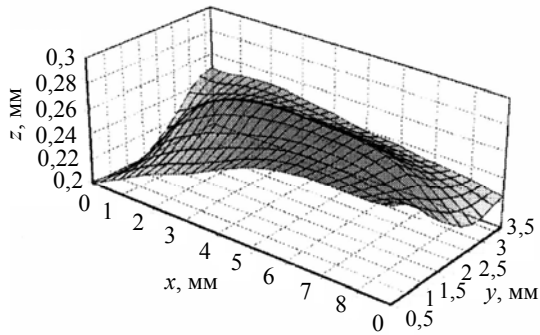
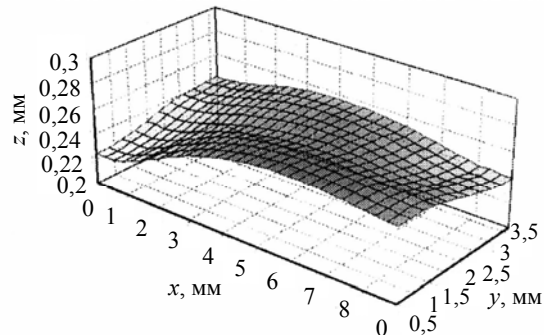
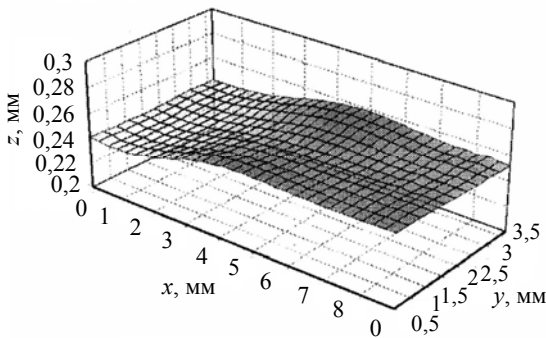
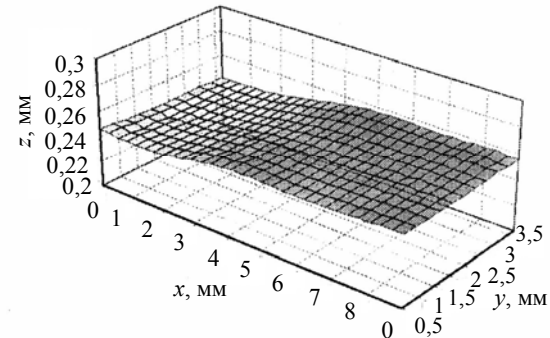
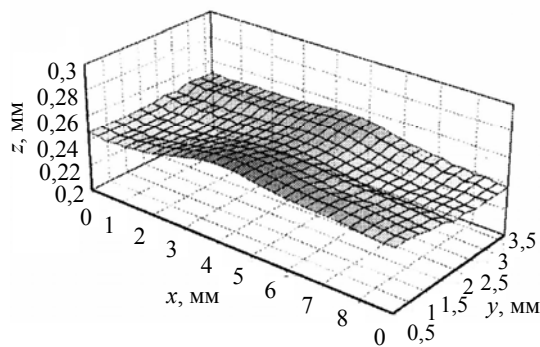
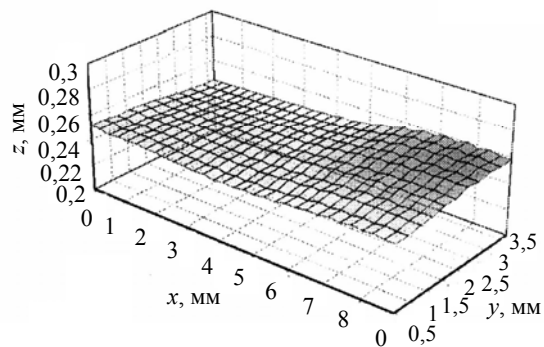
дить, если в ванну загружено глинозема больше того количества, которое может раствориться в электролите. Это может происходить также при холодном ходе ванны.

*Анодный эффект* возникает при снижении концентрации глинозема в электролите до 1—2 %, поэтому его гасят внесением глинозема в ванну. Главный признак анодного эффекта — резкое, почти мгновенное повышение напряжения в ванне. Основной причиной анодного эффекта является ухудшение смачиваемости поверхности анода электролитом из-за увеличения поверхностного натяжения на границе раздела электролит—анод. Поэтому на поверхности анода появляется сплошная прослойка из пузырьков газа — продукта электролиза. Растет сопротивление на границе электролит—анод, что влечет за собой потери тока и резкое повышение напряжения.



Напряженность в металле

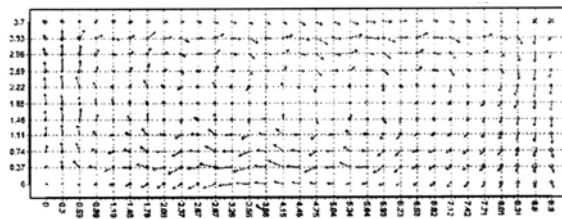
Напряженность в электролите

 $t = 0 \text{ с, МПР} = 0,036 \text{ м}$  $t = 2 \text{ с, МПР} = 0,045 \text{ м}$  $t = 4 \text{ с, МПР} = 0,051 \text{ м}$  $t = 6 \text{ с, МПР} = 0,052 \text{ м}$  $t = 8 \text{ с, МПР} = 0,045 \text{ м}$  $t = 10 \text{ с, МПР} = 0,0499 \text{ м}$ 

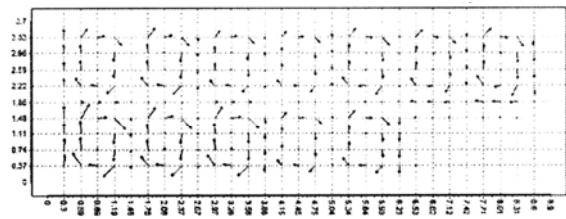
a

Рис. 4. Расчет при извлечении:

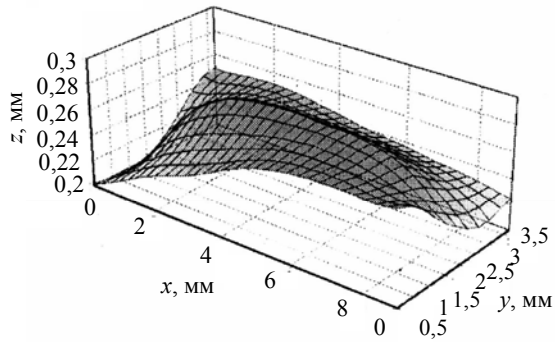
a — двух анодов;



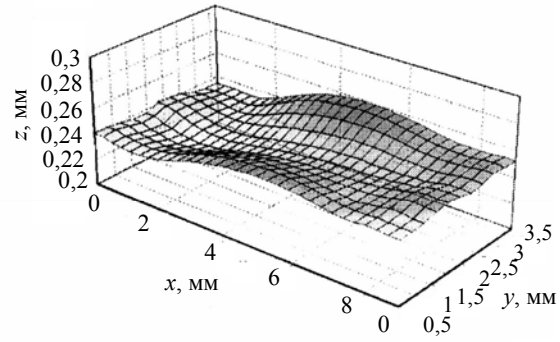
Напряженность в металле



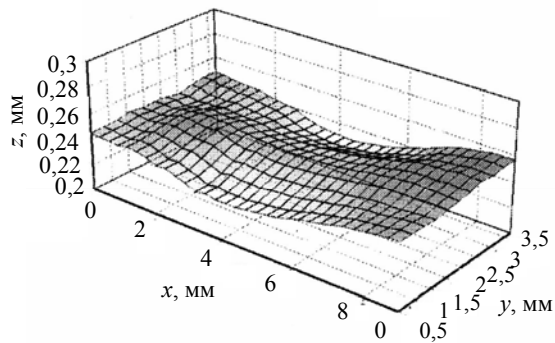
Напряженность в электролите



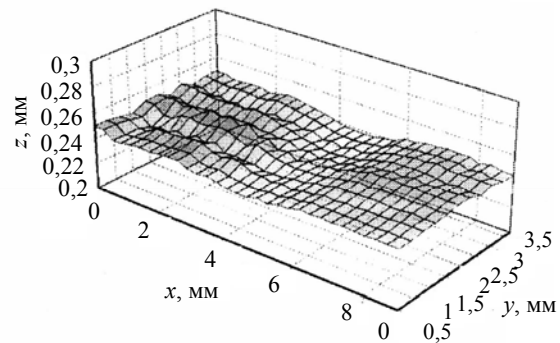
$t = 0$  с, МПП = 0,036 м



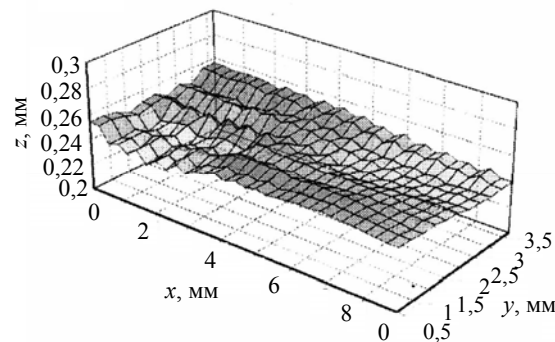
$t = 2$  с, МПП = 0,051 м



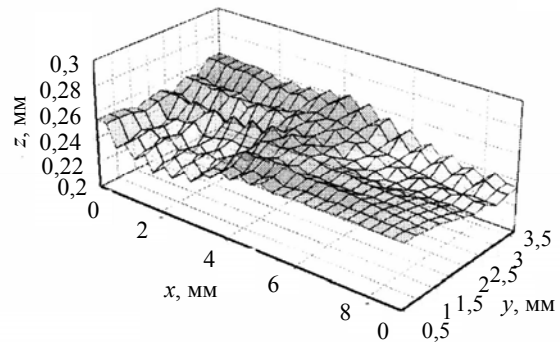
$t = 4$  с, МПП = 0,053 м



$t = 6$  с, МПП = 0,055 м



$t = 8$  с, МПП = 0,045 м



$t = 10$  с, МПП = 0,029 м

б

Рис. 4. Окончание.  
б — двух крайних анодов

Для каждой ванны существует критическая плотность тока: чем она выше, тем реже возникает анодный эффект. Величина критической плотности тока зависит главным образом от состава электролита и температуры. Затяжной анодный эффект характеризуется тем, что он длится несколько часов, и его не удастся ликвидировать обычным приемом — загрузкой в электролит очередной порции глинозема. Если затяжной анодный эффект не прекратить, то неизбежен прорыв электролита и металла и даже полный выход ванны из строя. Предложенная модель не позволяет предсказать возникновение затяжного анодного эффекта, однако дает возможность моделировать поведение сред при его возникновении за счет резкого уменьшения электрической проводимости электролита  $\sigma_2$  и последующего резкого роста напряженности электрического поля  $E_2$ .

*Горячий ход ванны* характеризуется высокой температурой электролита, что создает условия для усиленного окисления растворенного алюминия, что в свою очередь вызывает повышение температуры и ведет к понижению выхода по току. Его причинами могут быть:

- чрезмерно малое МПР (избыточное тепло выделяется в рабочей зоне при обратном окислении алюминия);
- сильно возросшее напряжение из-за увеличения МПР;
- недостаточное количество алюминия в ванне;
- анодный эффект;
- перегрев электролита на каком-то участке (местный перегрев) при неравномерном распределении тока. Главная причина – сильный перепад поверхности раздела металл–электролит. При этом плотность тока растет и электролит перегревается, происходят усиленное окисление алюминия и повышение температуры ванны.

Предложенная модель позволяет моделировать возникновение причин горячего хода ванны: МПР и количество алюминия в ванне задаются через высоту слоев электролита —  $h_2$  и жидкого металла —  $h_1$ , неравномерное распределение поверхности раздела также задается через форму поверхности металла, при этом на отдельных участках растет и плотность тока.

Сильный перепад МПР возникает, когда:

- нарушена параллельность между нижней поверхностью анодов и дном ванны из-за перекоса анодов после выливки алюминия и перетяжки рамы анодов;
- анод неравномерно расходится из-за неоднородности материала, из которого он состоит, и в нижней его части образуется конус, который может так вырасти, что начнет касаться алюминия;

- анод замыкается с алюминием через обломившийся кусок анода или кусок подового блока, который не вынули из ванны;

- анод касается настыли.

Предложенная система позволяет моделировать различные формы анодов за счет изменения толщины слоя электролита  $h_2$  под конкретными анодами и функцию помехи  $\psi_0$  в правой части уравнения движения для электролита [1].

Для ликвидации горячего хода ванны устраняют возможную причину нарушения режима электролиза:

- если горячий ход произошел из-за роста тока, то его снижают до нормального. Это можно осуществить и на предложенной модели, для чего достаточно уменьшить токи, входящие в каждый анод;

- если увеличено напряжение из-за большого МПР, то аноды опускают. В численном эксперименте уровень погружения анодов задается высотой слоя электролита  $h_2$ ;

корректируют состав электролита;

- если причиной горячего хода являются местные перегревы, то в первую очередь устраняют их. Характерными внешними признаками ванны с местными перегревами являются: колебание напряжения; неравномерное бурление электролита вокруг анода; перегрев электролита там, где нет бурления, и большой накал анода на этом участке; образование на этом аноде "шейки". Математическая модель позволяет отслеживать поведение электролита вблизи этих участков, исследуя динамику распределения скоростей в среднем слое электролита на участке;

- если причиной является перекося анода, то его устраняют, регулируя подвески анода. Перекося анода можно задать через функцию помехи  $\psi_0$  в правой части уравнения движения для электролита.

Таким образом, предложенная модель позволяет проводить математический эксперимент по наблюдению работы ванны в случае возникновения большинства неполадок. При варьировании различных параметров, таких как последовательность замены анодов, форма и расположение анодов, конфигурация настыли, величины подводимых токов, возможно достижение повышения выхода по току и устранения неполадок в работе ванны, что имеет практическое значение в отношении рекомендаций по оптимизации технологического процесса электролиза алюминия и в целом повышения эффективности производства.

#### Л и т е р а т у р а

1. Алаторцев А. В., Кузьмин Р. Н., Савенкова Н. П., Пророва О. Г. Динамическая модель магнитно-гидродинами-

ческих процессов в алюминиевом электролизере// Прикладная физика. 2004. № 5. С. 33—42.

2. Сушков А. И., Троицкий И. А. Металлургия алюминия. — М.: Металлургия, 1965.

3. Федотьев Н. П., Алабышев А. Ф. и др.// Прикладная электрохимия. — М.: Госхимиздат, 1962. С. 275—330.

4. Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные методы решения задач газовой динамики. — М.: Наука, 1992.

5. Быков В. И., Злобин В. С., Тимофеев В. Н., Багаев Б. М., Пингин В. В., Проворова О. Г., Архипов В. Г., Альчиков В. В., Добровец Б. С., Овчаренко В. Е., Садовский В. М. Математическое моделирование физических полей в алюминиевых электролизерах. — Красноярск, 2002. С. 75—98.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2006 г.

## Increase of aluminum electrolysis efficiency by means of mathematical modeling

A. V. Alatortsev, R. N. Kuzmin, N. P. Savenkova  
Moscow State University, Moscow, Russia

O. G. Provorova  
Krasnoyarsk State University, Krasnoyarsk, Russia

*Authors consider some opportunities to increase aluminum electrolysis cells work efficiency with the help of mathematical modeling. The model bases on multidimensional Navier-Stokes equations and Maxwell's system taking into account induced currents. Authors have created the application suite that implements offered mathematical model. As computational results, the dynamics of liquid metal-electrolyte interface for various cell geometries are introduced.*

УДК 532.64:532.612

## Критический анализ опытов по измерению углов смачивания и сил поверхностного натяжения

С. И. Иголкин  
Балтийский государственный технический университет,  
Санкт-Петербург, Россия

*Выполнен обзор некоторых классических монографий и первоисточников по проблемам поверхностного натяжения и смачивания поверхностей. Установлены противоречия традиционных подходов и обоснована необходимость корректировки сложившейся системы описания пограничных эффектов. Экспериментально уточнены силовые характеристики статического взаимодействия жидкости и твердого тела. Предложены альтернативная трактовка явления разрыва жидкой среды, а также методы обработки результатов, исключающие необходимость введения поправок при эталонных измерениях.*

### Углы смачивания и поверхностные явления на границах сред

Для описания явлений в области контакта тел и на свободных поверхностях более века назад были выработаны термины и методы, позволившие с удовлетворительной точностью решать многие практические задачи [1, 2]. Однако при более тщательном рассмотрении этих явлений обнаруживается, что в сложившуюся систему представлений об их физической модели были заложены довольно грубые допущения. Для инженерных расчетов

на современном уровне оказываются необходимыми устранение погрешностей и уточнение схемы описания поверхностных эффектов.

Классическая теория явлений на границе жидкости и твердого тела базируется на двух основополагающих константах, которыми являются коэффициент поверхностного натяжения (КПН) жидкости и угол смачивания жидкостью твердого тела  $\Theta$ . Они тесно связаны между собой и с условиями на общей границе с окружающей газовой средой. В частности, капиллярные эффекты отражают не только силу поверхностного натяжения