



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 131 за 2016 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Калмыков А.В., [Кулешов А.А.](#),
Савенкова Н.П.

Моделирование анодного
эффекта в многоанодном
алюминиевом
электролизере

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Калмыков А.В., Кулешов А.А., Савенкова Н.П. Моделирование анодного эффекта в многоанодном алюминиевом электролизере // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 131. 22 с. doi:[10.20948/prepr-2016-131](https://doi.org/10.20948/prepr-2016-131)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-131>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

А.В.Калмыков, А.А.Кулешов, Н.П.Савенкова

**Моделирование анодного эффекта
в многоанодном алюминиевом
электролизере**

Москва — 2016

А.В.Калмыков, А.А.Кулешов, Н.П.Савенкова

Моделирование анодного эффекта в многоанодном электролизёре

В работе рассматривается трехмерная трехфазная математическая модель многоанодного алюминиевого электролизера, которая учитывает во взаимосвязи четыре основные группы процессов: гидродинамические, электромагнитные, тепловые и электрохимические. С помощью представленной математической модели проводится исследование особенностей протекания анодного эффекта в электролизере. Установлено, что в процессе анодного эффекта может развиваться МГД-нестабильность, которая приведёт к потере выхода металла.

Ключевые слова: электролиз алюминия, многофазная гидродинамика, уравнения Навье-Стокса

Andrej Aleksandrovich Kuleshov, Aleksey Vadimovich Kalmykov, Nadezhda Petrovna Savenkova

Simulation of anode effect in aluminum electrolytic cell

The paper describes three-phase three-dimensional mathematical model of aluminum electrolytic cell, which takes into account the relationship of the four main groups of processes: the hydrodynamic, electromagnetic, thermal and electrochemical. The process of anode effect in electrolytic cell was researched with presented mathematical model. It was found that anode effect in some cases leads to MHD instability, which increases loss of metal.

Key words: aluminum electrolysis, multiphase fluid dynamics, Navier-Stokes equations

Оглавление

Введение.....	3
1. Математическая модель	4
2. Вычислительный эксперимент	9
Заключение.....	21
Список литературы.....	22

Введение

Алюминиевый электролизер является сложным нелинейным объектом, который представляют собой ванну, имеющую форму сглаженного параллелепипеда (рис. 1). На развитой стадии процесса внизу ванны находится жидкий металл – алюминий, сверху находится расплавленный глинозем (криолит) со специальными добавками, который является электролитом, под анодами в электролите присутствует газ, образовавшийся в процессе реакции. Сверху в ванну на небольшую глубину погружены графитовые электроды.

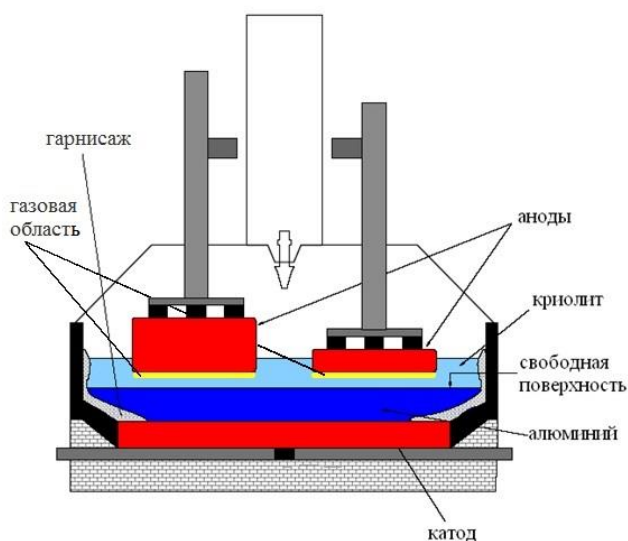
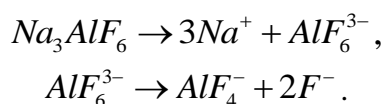


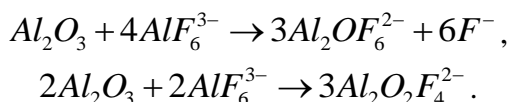
Рис. 1. Схема многоанодного электролизера в поперечном срезе

Электроды являются анодом, часть дна ванны и расплавленный алюминий – катодом, расплавленный глинозем – электролитом. На катод и анод подается разность потенциалов, в верхней среде (электролите) присутствуют носители электрического тока – положительно и отрицательно заряженные ионы. В результате реакций, протекающих в электролите, образуется первичный алюминий и газообразная среда. Основными являются реакции образования солей алюминия вблизи анода и восстановления этих солей до металла вблизи катода или границы раздела сред алюминий-электролит [1].

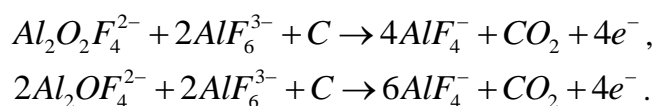
При плавлении криолит диссоциирует на компоненты:



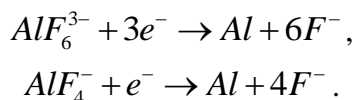
Затем диссоциирует оксид алюминия:



Реакции на аноде:



Реакции на катоде:



Таким образом, в рассматриваемом процессе имеется три основных среды: алюминий, электролит, газ. Известно, что электрохимические реакции идут вблизи электродов – анода и катода (поверхности жидкого алюминия). Поскольку верхняя поверхность электролита покрывается коркой, газ накапливается в пространстве между анодами, что в конечном итоге приводит к анодному эффекту.

Анодный эффект представляет собой явление, характерное как для многоанодных электролизеров, так и для одноанодных электролизеров Содерберга. Существенное ухудшение смачиваемости анода электролитом считается основной причиной возникновения анодного эффекта и сопровождается резким, почти мгновенным в течение 30 – 60 с, увеличением напряжения на электролизере с 4 до 40 В. В силу уменьшения концентрации глинозема поверхностное натяжение электролита увеличивается, при этом на аноде образуются более крупные пузырьки газа, размер которых в диаметре может достигать до 10 сантиметров. Плотность тока увеличивается на смачиваемой электролитом поверхности анода, что приводит к дополнительному увеличению перенапряжения [2].

Анодный эффект оказывает отрицательное влияние на процесс электролиза, которое заключается в лишнем расходе электроэнергии, во временных перегревах электролита, во время которых усиливается выделение загрязняющих веществ в атмосферу рабочей зоны корпуса электролизера и увеличиваются потери выделившегося алюминия. Кроме этого, только при анодном эффекте в процессе электролиза образуются и выделяются в атмосферу перфторуглероды, являющиеся парниковыми газами.

1. Математическая модель

В основе модели находится многожидкостной или многоскоростной подход [3]. Предполагается, что в гетерогенной смеси фаза занимает лишь часть элементарного объема, в связи с этим вводятся величины α_m , $m=1,2,3$, характеризующие объемную долю m -ой фазы в смеси, при этом выполнено соотношение

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1.$$

Здесь и далее величины с индексом $m=1$ относятся к фазе алюминия, с индексом 2 – к фазе криолита, с индексом 3 – к газовой фазе. Представленное уравнение является уравнением объемного баланса смеси.

В каждой точке объема, занятого смесью, так же вводятся макроскопические скорости компонент смеси $\mathbf{v}_m = (u_m, v_m, w_m)$, давление p , напряженность магнитного поля $\mathbf{H} = (H_x, H_y, H_z)$, сила Лоренца $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$, плотность электрического тока $\mathbf{J} = (j_x, j_y, j_z)$ и температура смеси T . Все вышеперечисленные величины являются основными неизвестными математической модели.

Изменения массы m -ой фазы описывается уравнением

$$\frac{\partial \alpha_m \rho_m}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_m \rho_m \mathbf{v}_m) = \mathbf{J}_m,$$

где ρ_m – плотность m -ой фазы, которая является постоянной, \mathbf{J}_m – источник (сток) вещества m -ой фазы за счет химических реакций. Учитывая неоднородность химических реакций в пространстве ванны справедливо следующее:

- для фазы алюминия \mathbf{J}_1 – функция, зависящая от его концентрации (см. ниже), равная нулю везде, кроме границы раздела фаз алюминий – электролит;
- для фазы газа \mathbf{J}_3 – функция, зависящая от его концентрации (см. ниже), равная нулю везде, кроме области под анодами;
- для фазы электролита $\mathbf{J}_2 = -\mathbf{J}_1$ на границе раздела фаз алюминий – электролит и $\mathbf{J}_2 = -\mathbf{J}_3$ в области под анодами;

Из закона сохранения массы при физико-химических превращениях, в любой точке пространства ванны выполняется следующее соотношение

$$\sum_{m=1,2,3} \mathbf{J}_m = 0.$$

Перенос импульса для каждой фазы описывается уравнением

$$\frac{\partial \alpha_m \rho_m \mathbf{v}_m}{\partial t} + (\mathbf{v}_m, \nabla)(\alpha_m \rho_m \mathbf{v}_m) = -\alpha_m \nabla p + \mu_m \Delta \mathbf{v}_m + \alpha_m \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{P}_m + \alpha_m \mathbf{F}_m,$$

где μ_m – динамическая вязкости среды, \mathbf{F}_m – объемная плотность силы, обусловленная электромагнитным полем (сила Лоренца)

$$\mathbf{F}_m = \mu_0 [\operatorname{rot} \mathbf{H} \times \mathbf{H}]$$

\mathbf{P}_m – объемная сила межфазного трения (Стоксовой силы) между компонентами смеси (с индексами m и n) за счет вязких сил, которая определяется из соотношений:

$$\mathbf{P}_m = \sum_{\substack{n=1,2,3 \\ n \neq m}} \alpha_m \alpha_n K_{mn} (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n), \quad K_{mn} = \alpha_m \mu_m + \alpha_n \mu_n.$$

На границе области выполняется условие прилипания

$$\mathbf{v}_m|_{\Gamma} = 0.$$

Уравнение для поиска давления получим путем сложения уравнений закона сохранения импульса для трех фаз с учетом выполнения уравнения баланса

$$\nabla \cdot \left(\sum_{m=1,2,3} \left(\frac{\alpha_m}{\rho_m} \right) \nabla p \right) = \nabla \cdot \mathbf{L},$$

с граничным условием

$$\frac{\partial p}{\partial n} = (\mathbf{L}, \mathbf{n}) / \sum_{m=1,2,3} \left(\frac{\alpha_m}{\rho_m} \right),$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{L} = \sum_{m=1,2,3} \left((\mathbf{v}_m, \nabla) (\alpha_m \mathbf{v}_m) + \frac{\alpha_m \mu_m}{\rho_m} \Delta \mathbf{v}_m + \alpha_m \mathbf{g} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\rho_m} \sum_{m \neq n} \alpha_m \alpha_n (\alpha_m \mu_m + \alpha_n \mu_n) (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n) + \frac{\alpha_m}{\rho_m} \mathbf{F}_m \right), \end{aligned}$$

\mathbf{n} – нормаль к границе области.

Уравнение для поиска потенциала электрического поля получается из уравнения для дивергенции электрического поля и его связи с потенциалом. Ионы растворенных в криолите бокситов создают области, в которых суммарный заряд смеси отличен от нуля, в частности вблизи анода и катода. Однако толщина таких областей составляет порядка 10^{-5} м, что на много порядков меньше, чем шаг расчетной сетки. В связи с этим смесь расплавов считается квазинейтральной, а уравнение для поиска потенциала принимает вид:

$$\nabla \cdot \left(\sum_{m=1,2,3} (\alpha_m \sigma_m) \nabla \varphi \right) = \nabla \cdot \left(\mu_0 [\mathbf{v}, \mathbf{H}] \sum_{m=1,2,3} (\alpha_m \sigma_m) \right),$$

где $\mathbf{v} = \sum_{m=1,2,3} \alpha_m \mathbf{v}_m$ – средняя скорость смеси, σ_m – проводимость m -ой фазы.

Потенциал на аноде задается равным 4 вольтам. В непроводящей части

границы ванны нормальная производная потенциала равна нулю. Таким образом, граничные условия имеют вид:

$$\varphi|_{\text{анод}} = 4, \quad \varphi|_{\text{катод}} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0.$$

В силу возникновения дополнительного индуцированного электрического поля, вызванного движением среды, плотность электрического тока получается из соотношения:

$$\mathbf{J} = \sum_{m=1,2,3} (\alpha_m \sigma_m) (\mu_0 [\mathbf{v}, \mathbf{H}] - \nabla \varphi).$$

Токами смещения пренебрегаем, поскольку изменение электрического потенциала в ванне со временем мало.

Магнитное поле является соленоидальным векторным полем и, следовательно, имеет векторный потенциал \mathbf{A} , для нахождения которого воспользуемся калибровкой Кулона, которая имеет вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0.$$

Исходя из оценки вязкости магнитного поля, при моделировании можно использовать квазистационарное приближение. В результате получим следующую задачу Неймана для поиска векторного потенциала:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{A} = -\mathbf{J} \\ \left. \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0. \end{cases}$$

Используя векторный потенциал, найдем само магнитное поле $\mathbf{H} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$.

Изменение температуры происходит за счет конвекции, градиента теплового потока и источника поступления джоулева тепла и описывается уравнением

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho T \mathbf{v}) = \frac{1}{\zeta} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{\sigma}{\zeta} \mathbf{J}^2,$$

с граничными условиями:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\substack{\text{гарнисаж} \\ \text{настель}}} = \frac{1}{\zeta} Q, \quad T|_{\substack{\text{верхняя} \\ \text{корка}}} = T_0,$$

где σ – средневзвешенная электропроводность, ζ – средневзвешенная теплоемкость, Q – константа теплового потока на границе электролизной ванны, T_0 – температура корки, образующейся во время электролиза.

Для описания движения ионов в электролите, которое обусловлено диффузией и разностью потенциалов, используется уравнение Нернста-Планка [4]:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = D_k \nabla \cdot \left(\nabla C_k + \frac{z_k F}{RT} C_k \nabla \varphi \right),$$

где D_k – коэффициент диффузии, z_k – заряд иона, F – постоянная Фарадея, R – универсальная газовая постоянная.

Основные молекулы и ионы, участвующие в химических реакциях представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные ионы

№	Ион	Заряд	Знак
1	Na	1	+
2	AlF ₄	3	-
3	AlF ₆	1	-
4	F	1	-
5	Al ₂ O ₂ F ₄	2	-
6	Al ₂ OF ₆	2	-

Граничные условия на поверхности анодов:

$$\left(\nabla C_2 + \frac{z_2 F}{RT} C_2 \nabla \varphi \right) \Big|_n = -\frac{j_a}{6FD_2}, \quad \left(\nabla C_3 + \frac{z_3 F}{RT} C_3 \nabla \varphi \right) \Big|_n = -\frac{j_a}{10FD_3},$$

$$\left(\nabla C_4 + \frac{z_4 F}{RT} C_4 \nabla \varphi \right) \Big|_n = 0, \quad \left(\nabla C_5 + \frac{z_5 F}{RT} C_5 \nabla \varphi \right) \Big|_n = -\frac{j_a}{4FD_5},$$

$$\left(\nabla C_6 + \frac{z_6 F}{RT} C_6 \nabla \varphi \right) \Big|_n = -\frac{j_a}{8FD_6},$$

где j_a – значение вертикальной компоненты плотности тока на аноде.

Граничное условие на поверхности жидкого алюминия:

$$\begin{aligned} \left(\nabla C_2 + \frac{z_2 F}{RT} C_2 \nabla \varphi \right) \Big|_n &= -\frac{j_c}{4FD_2}, \quad \left(\nabla C_3 + \frac{z_3 F}{RT} C_3 \nabla \varphi \right) \Big|_n = -\frac{j_c}{4FD_3}, \\ \left(\nabla C_4 + \frac{z_4 F}{RT} C_4 \nabla \varphi \right) \Big|_n &= \frac{j_c}{10FD_4}, \quad \left(\nabla C_5 + \frac{z_5 F}{RT} C_5 \nabla \varphi \right) \Big|_n = 0, \\ \left(\nabla C_6 + \frac{z_6 F}{RT} C_6 \nabla \varphi \right) \Big|_n &= 0, \end{aligned}$$

где j_c – значение вертикальной компоненты плотности тока на жидком катоде.

В непроводящей части гарнисажа (защитного слоя бортов ванны) и настыли (застывшие отложения на внутренней поверхности ванны) потоки всех ионов через границу равны нулю

$$\left(\nabla C_k + \frac{z_k F}{RT} C_k \nabla \varphi \right) \Big|_n = 0, \quad k = \overline{2, 6}.$$

Концентрация ионов натрия находится из условия электронейтральности электролита

$$\sum_{k=1}^6 z_k C_k = 0.$$

Для молекул газа и алюминия, которые восстанавливаются на соответствующих электродах в процессе химических реакций, выписываются соответственные задачи Коши с нулевыми начальными данными:

$$\begin{cases} \frac{dC_{Al}}{dt} = \frac{i_c}{F}, \\ C_{Al} = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} \frac{dC_{CO_2}}{dt} = \frac{i_a}{F}, \\ C_{CO_2} = 0 \end{cases}.$$

Концентрации молекул связаны со слагаемыми поступления фазы J_1 и J_3 следующими соотношениями

$$\begin{aligned} J_1 &= M_{Al} \delta C_{Al}, \quad J_3 = M_{CO_2} \delta C_{CO_2} \\ \delta C &= C(t_{n+1}) - C(t_n). \end{aligned}$$

где M_{Al} и M_{CO_2} – молярные массы алюминия и газа соответственно.

2. Вычислительный эксперимент

В представленном численном эксперименте проводится моделирование развития анодного эффекта для многоанодного электролизера с 22

обоженных анодами. Начальное распределение скоростей в смеси, а также конфигурация жидких фаз считаются известными.

Начальное зеркало металла (рис. 2) не является горизонтальным, а имеет небольшое возмущения в виде волны, которое, помимо сил Лоренца, будет влиять на характер движение смеси.

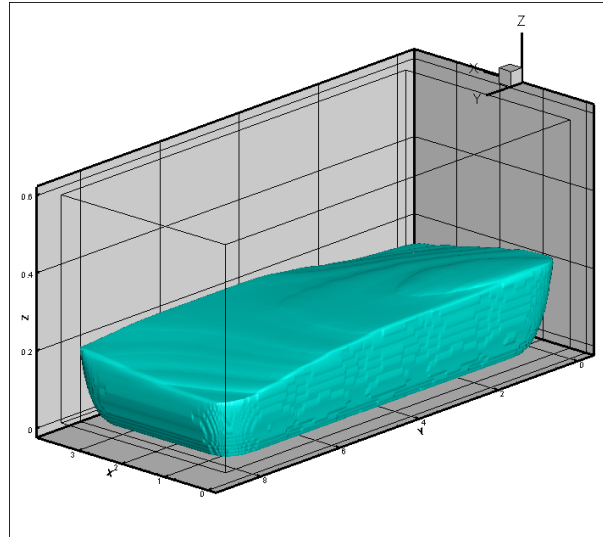


Рис. 2. Распределение жидкого металла в объеме, $t = 0$ с.

Динамика зоны обратного окисления представляет большой интерес при оценке МГД-стабильности процесса электролиза, на рисунках 3 и 4 представлены начальные распределения газовой фазы для различных объёмных долей. Здесь зеленым цветом (рис. 3) обозначена объемная доля газов, близкая к единице, синим (рис. 4) – объемная доля равная одной десятой.

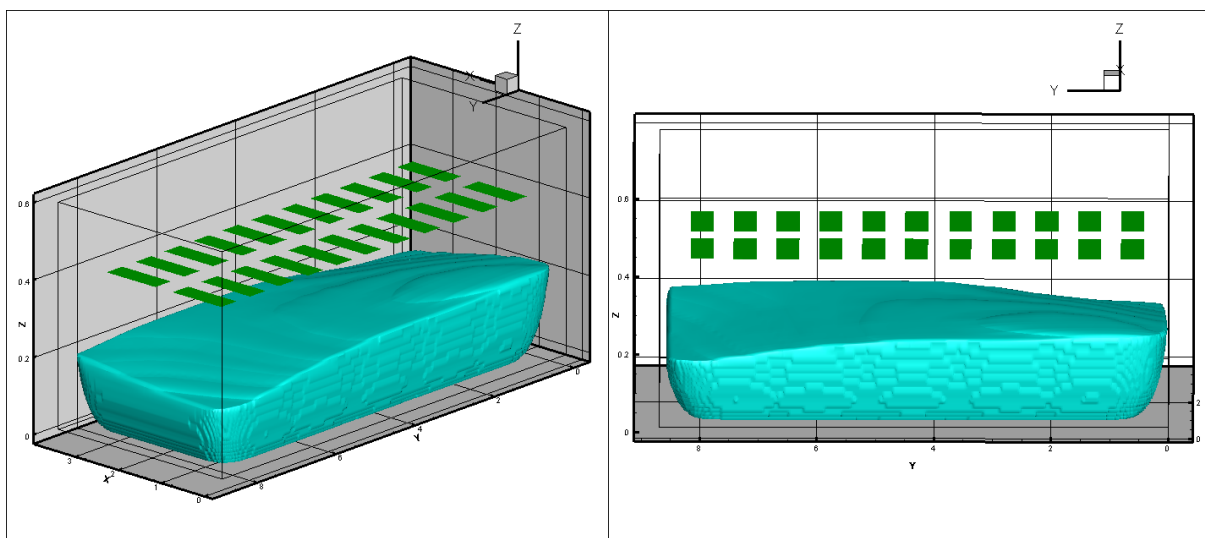


Рис. 3. Распределение жидкого металла и газовой фазы в объеме с объемной долей газа близкой к единице, $t = 0$ с.

Зона с низкой объемной долей газа существенно больше, однако в начальный момент качественно не отличается от зоны с высокой объемной долей газа.

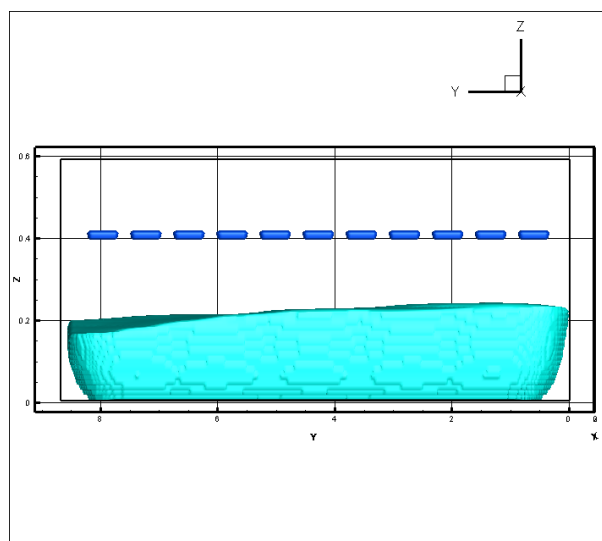


Рис. 4. Распределение жидкого металла и газовой фазы в плоскости YZ с объемной долей газа 0.1, $t = 0$ с.

Основная вынуждающая сила – сила Лоренца зависит от распределения плотности тока (рис. 5) в ванне и от магнитного поля (рис. 6).

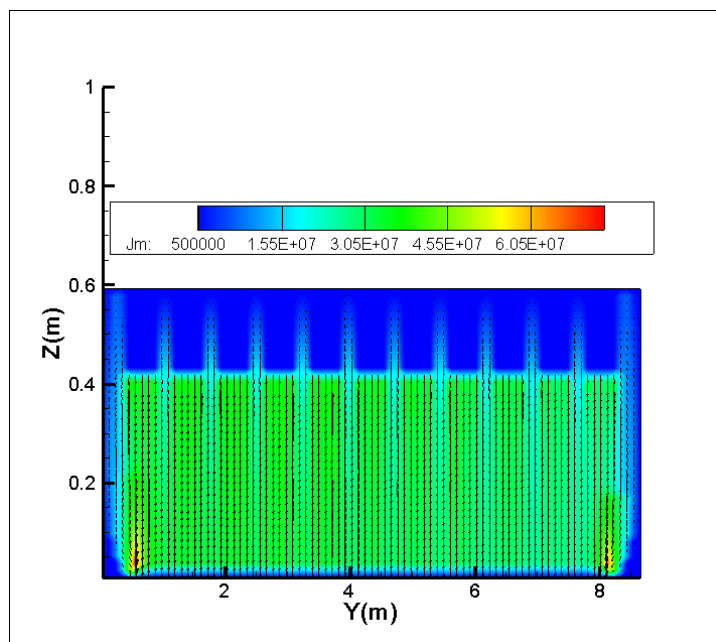


Рис. 5. Распределение плотности тока в плоскости YZ ($x = 2.0$ м.), $t = 0$ с.

В представленном численном эксперименте потенциал считается одинаковым на всех анодах и равен 4 В. Результирующая плотность электрического тока выше непосредственно под анодами и у краев катода и направлена почти во всей области вертикально вниз.

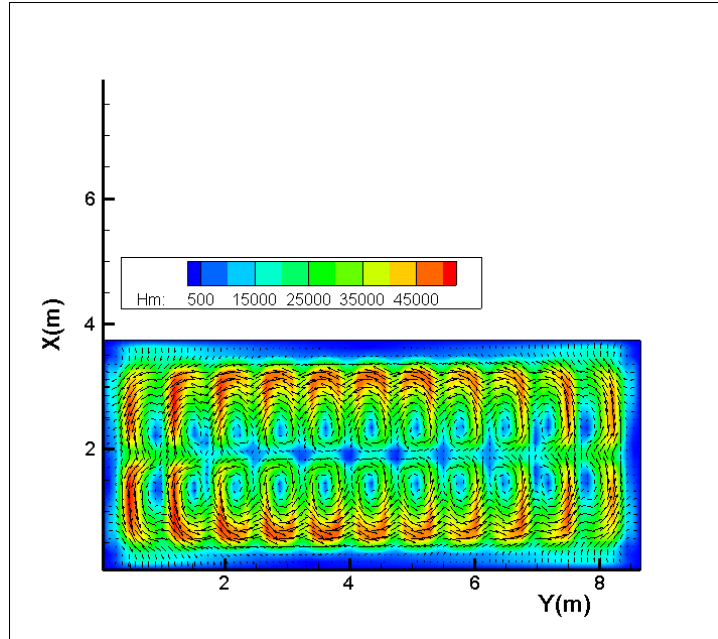


Рис. 6. Распределение магнитного поля в плоскости XY ($z = 0.3\text{м.}$), $t = 0\text{с.}$

Магнитное поле образует небольшие вихри под каждым анодом, что соответствует направлению электрического тока и распределению его плотности. Интенсивность магнитного поля несимметрична относительно оси OX и чуть выше в начале координат, данная неравномерность вызвана поднятием металла в этой области.

Начальное распределение сил Лоренца (рис. 7) такое, что их вектор направлен к центру анодов, плотность сил самая высокая у центральной пары анодов.

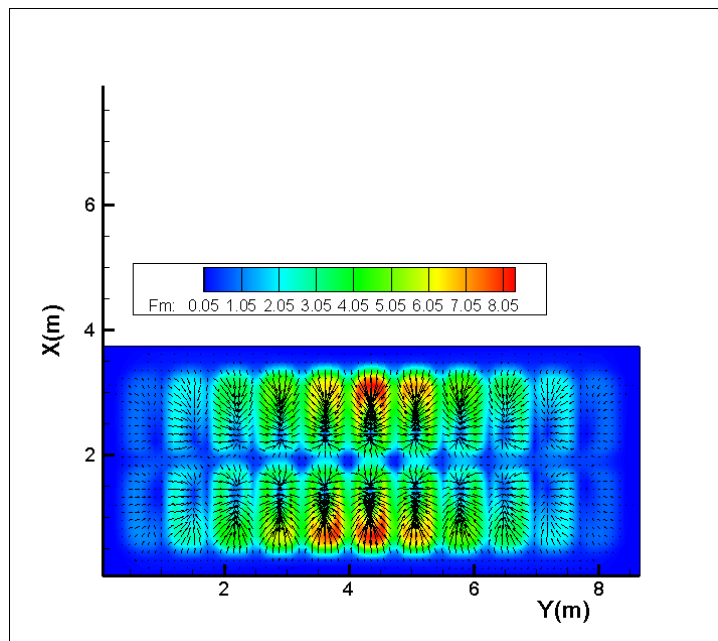


Рис. 7. Распределение сил Лоренца в плоскости XY ($z = 0.3\text{м.}$), $t = 0\text{с.}$

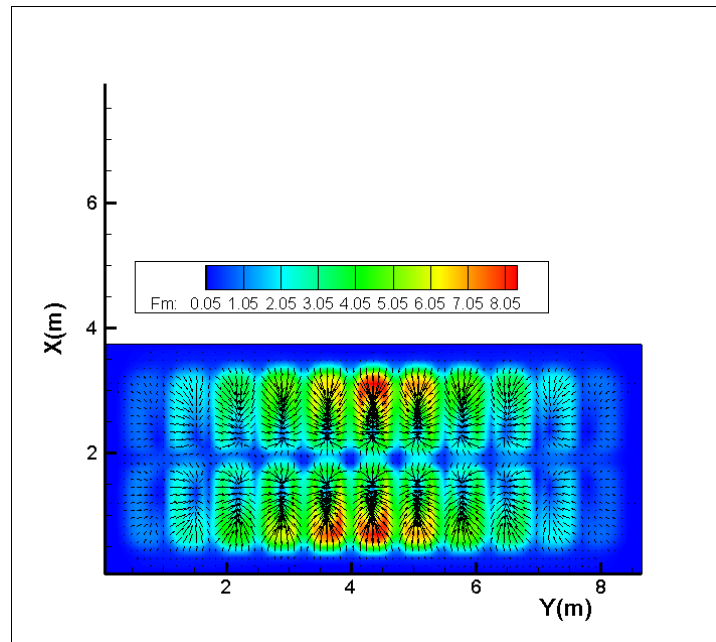


Рис. 8. Распределение температуры в плоскости YZ ($x = 2.0\text{м.}$), $t = 0\text{с.}$

Начальное распределение температур, обусловленное протекающим в электролизной ванне током, имеет наибольшее значение в центральной области. Форма рабочего пространства соответствует МГД-стабильному случаю, когда настыль заканчивается под проекцией анодов на дно ванны.

В начальный момент времени распределение плотности электрического тока и магнитного поля практически симметричны в плоскости XY относительно центра ванны. Небольшая несимметричность вызвана неравномерностью поверхности раздела фаз алюминий-электролит и наличием течения в начальный момент времени.

Химическая реакция, в результате которой выделяются парниковые газы, происходит, в основном, на подошвах анодов, где плотность силы тока имеет наибольшее значение. Они начинают быстро распространяться в электролите и в области между анодами, образуя зону обратного окисления металла. При моделировании анодного эффекта газовая фаза играет двойную роль, с одной стороны формирует зону обратного окисления, которая определяет возникновение МГД-нестабильности процесса при попадании в нее жидкого металла, с другой – газ формирует крупные домены, которые снижают проводимость среды. Так как газ распространяется неравномерно, образуя домены непосредственно под анодами, плотность электрического тока и магнитное поле перераспределяются соответствующим образом. Сила Лоренца, которая является основной вынуждающей силой, также распределяется неравномерно с образованием областей, в которых ее интенсивность существенно выше. Такая конфигурация электромагнитных полей приводит к возникновению колебаний на поверхности жидкого металла (рис. 9), которые в некоторых случаях приводят к развитию МГД-нестабильности. В

представленных на рисунке 9 результатах, область, подозрительная на возникновение МГД-нестабильности, расположена в районе 6 и 7 пары анодов.

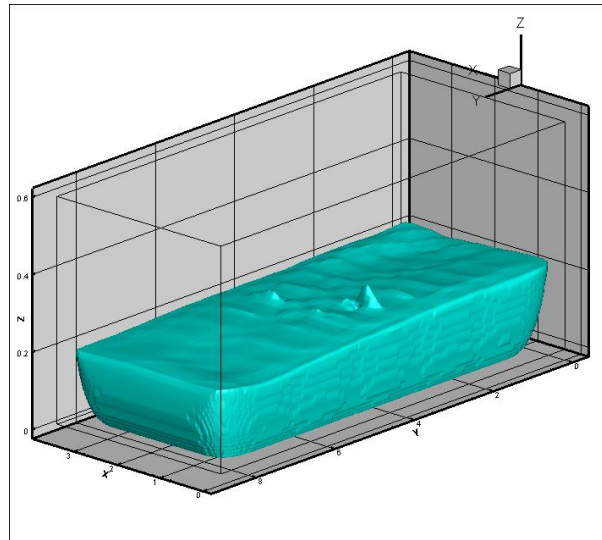


Рис. 9. Распределение жидкого металла в объеме, $t = 30$ с.

При этом пузырьки газа еще не полностью обволакивают подошвы анодов, пропускавая электрический ток, однако большая часть анодов уже не смачивается электролитом (рис. 10).

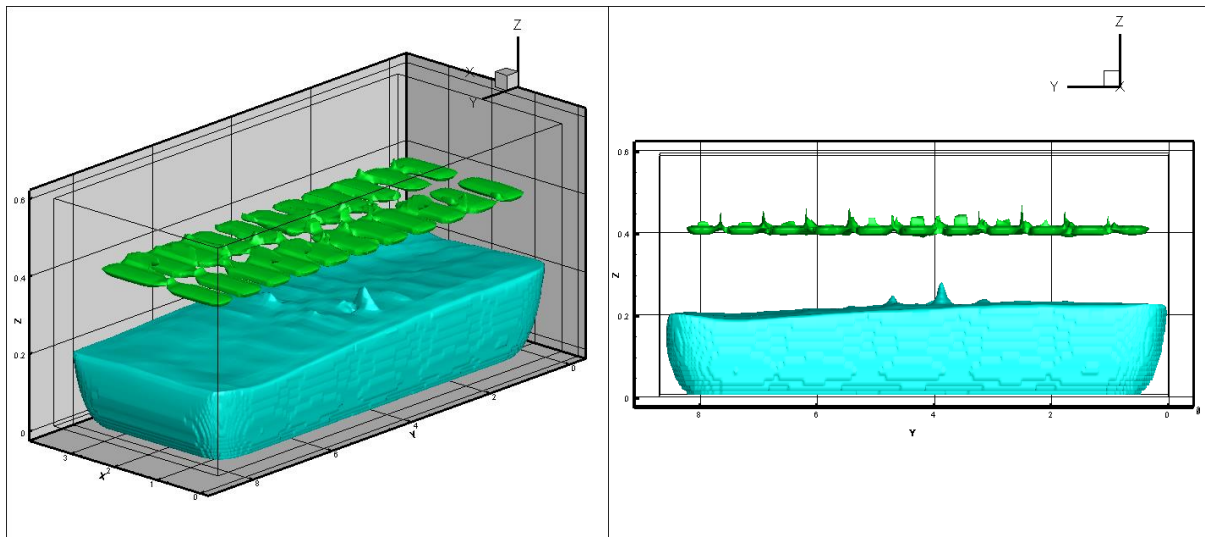


Рис. 10. Распределение жидкого металла и газовой фазы в рабочем пространстве с близкой к единице объемной долей газа, $t = 30$ с.

Возникающее вихревое движение жидкого электролита вдоль оси Z способствует переносу газовой фазы вниз, ближе к алюминию, тем самым повышая риск его обратного окисления.

Как видно из рисунка 11 вихревое движение наблюдается в основном в жидком электролите, интенсивность горизонтального движения в алюминии существенно ниже.

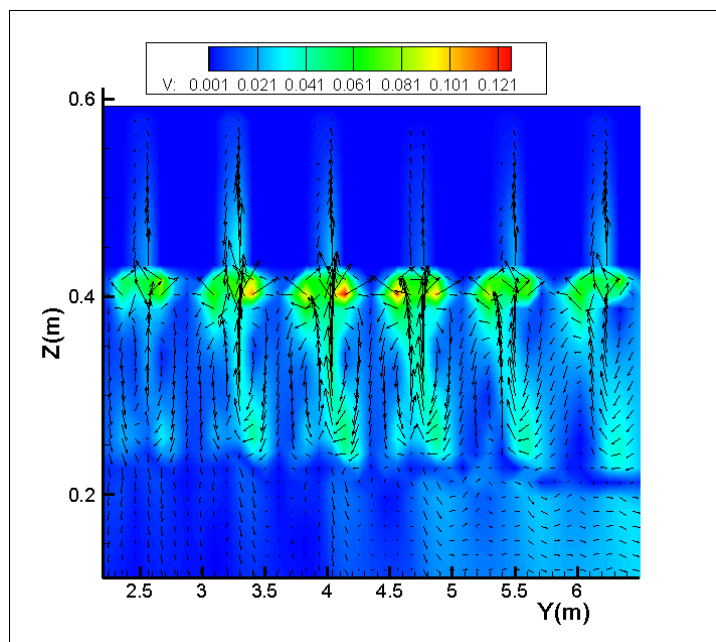


Рис. 11. Распределение скоростей в плоскости YZ ($x = 2.0\text{ м.}$), $t = 30\text{ с.}$

В данном численном эксперименте металл поднимается достаточно высоко, однако не попадает в зону обратного окисления, потери выхода алюминия по току не происходит (рис. 12).

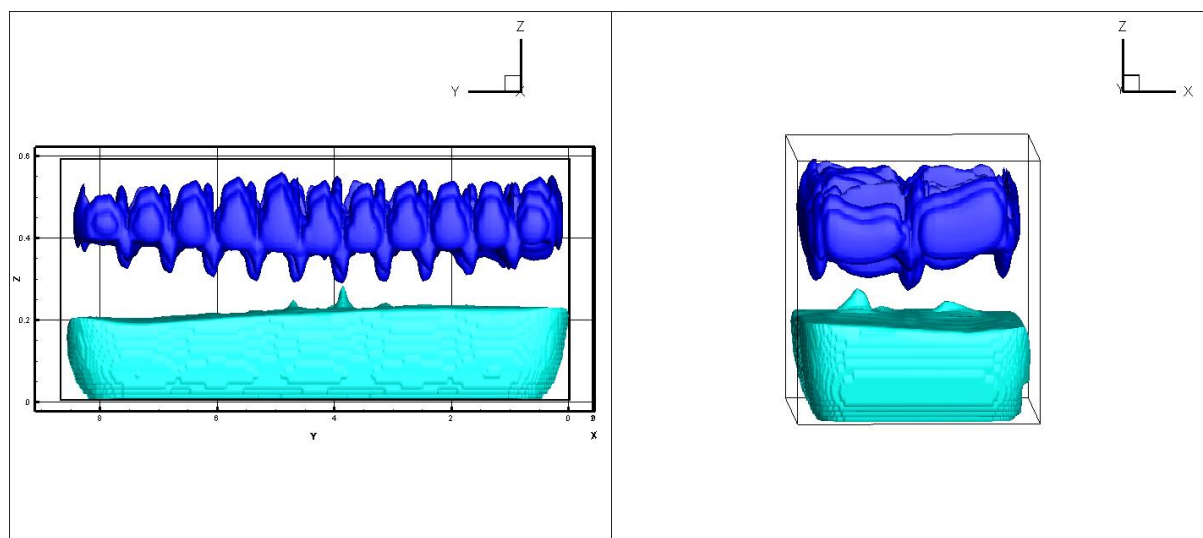


Рис. 12. Распределение жидкого металла и газовой фазы с объемной долей газа 0.1, $t = 30\text{ с.}$

При изменении поверхности расплавленного алюминия и увеличении плотности пузырьков под анодами, электрический ток перераспределяется

таким образом, что его наибольшее значение находится в области наибольшего подъёма металла, которая в свою очередь соответствует межанодному пространству. Данная конфигурация полей объясняется тем, что в процессе развития анодного эффекта плотность газовой фазы становится меньше в пространстве между анодами, поэтому плотность электрического тока (рис. 13) и напряжённость магнитного поля (рис. 14) начинают расти в области 6-ой и 7-ой пары анодов.

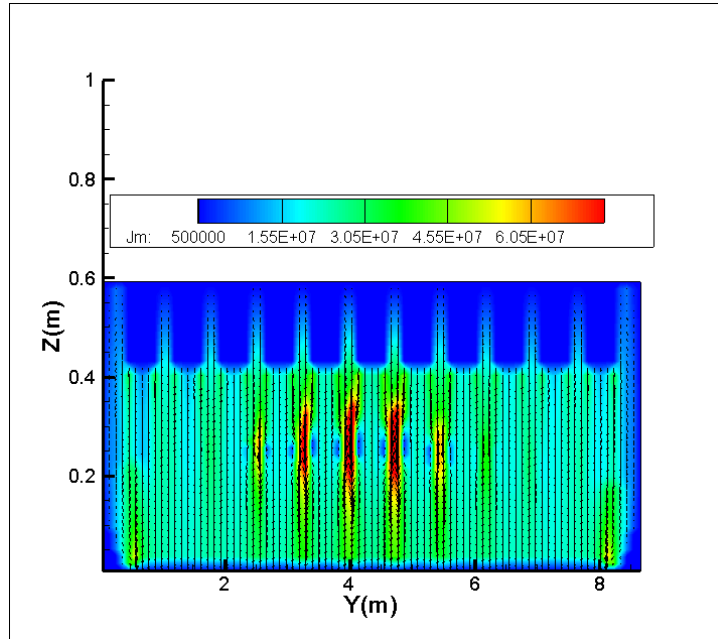


Рис. 13. Распределение плотности тока в плоскости YZ ($x = 2.0\text{м.}$), $t = 30\text{с.}$

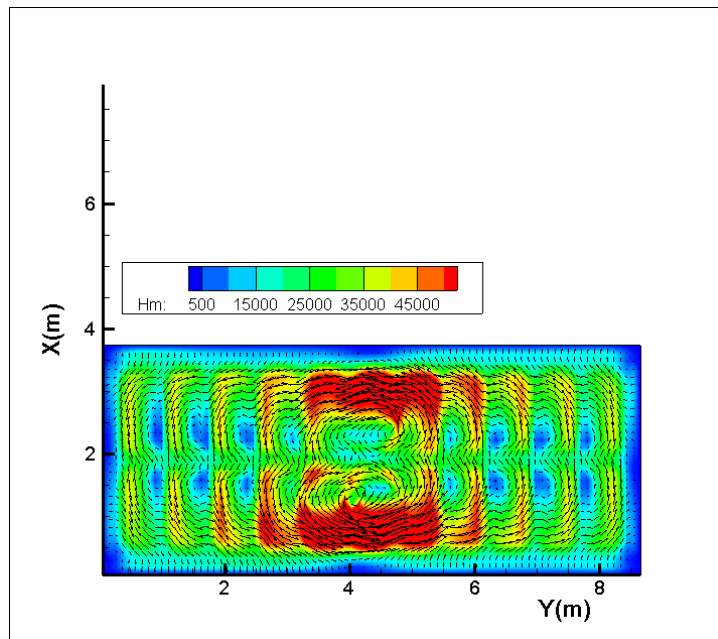


Рис. 14. Распределение магнитного поля в плоскости XY ($z = 0.3\text{м.}$), $t = 30\text{с.}$

Это изменение увеличивает силу Лоренца (рис. 15), которая вызывает подъем жидкого металла к анодам. Подъем жидкого алюминия может продолжаться до тех пор, пока сила тяжести не скомпенсирует вертикальную компоненту силы Лоренца, или пока, как в представленном численном эксперименте, выделение газов не уменьшит плотность тока и, тем самым, силу Лоренца. Температура также имеет максимум в центральной области ванны, который обусловлен теплом, выделившимся по закону Джоуля-Ленца (рис. 16)

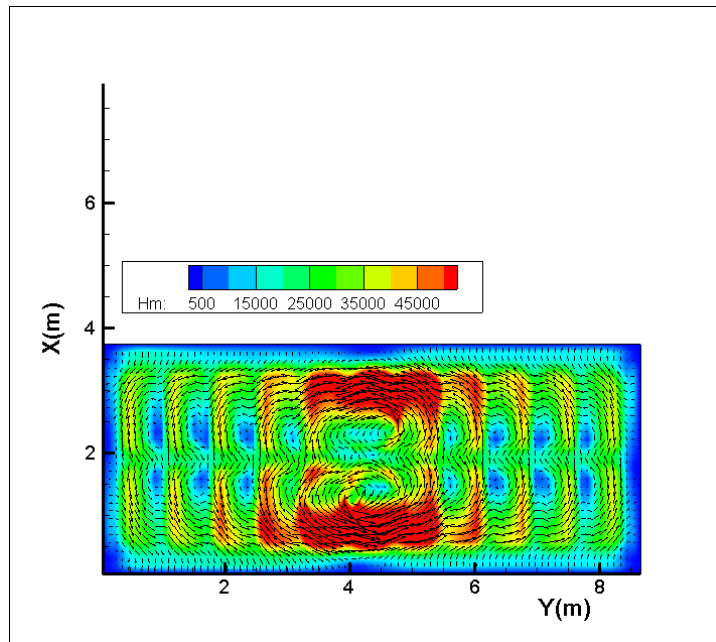


Рис. 15. Распределение сил Лоренца в плоскости XY ($z = 0.3\text{м.}$), $t = 30\text{с.}$

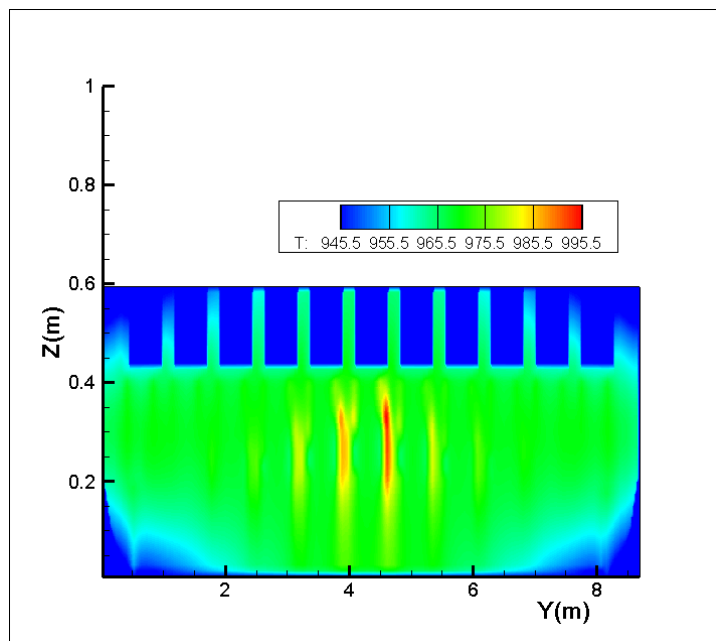


Рис. 16. Распределение температуры в плоскости YZ ($x = 2.0\text{м.}$), $t = 30\text{с.}$

При полном покрытии подошв анодов, а также пространства между анодами газовыми доменами (рис. 18), сопротивление смеси увеличивается настолько, что электрический ток практически перестает течь в расчетном объеме, что приводит к уменьшению модуля силы Лоренца и к релаксации колебаний зеркала алюминия (рис. 17). Процесс электролиза алюминия при данных физических условиях полностью прекращается.

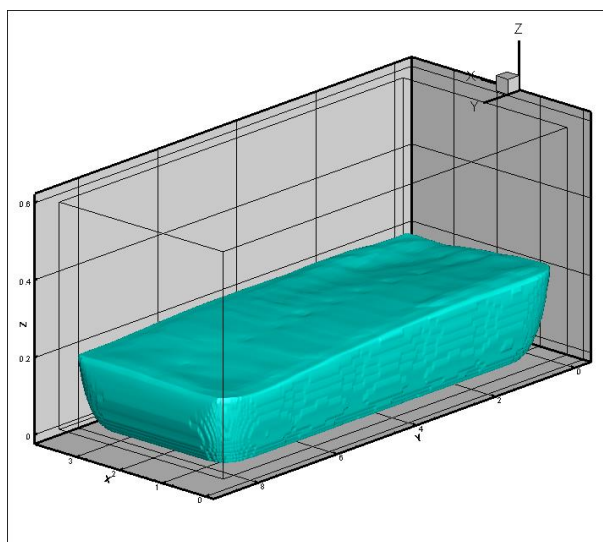


Рис. 17. Распределение жидкого металла в объеме, $t = 50\text{с}$.

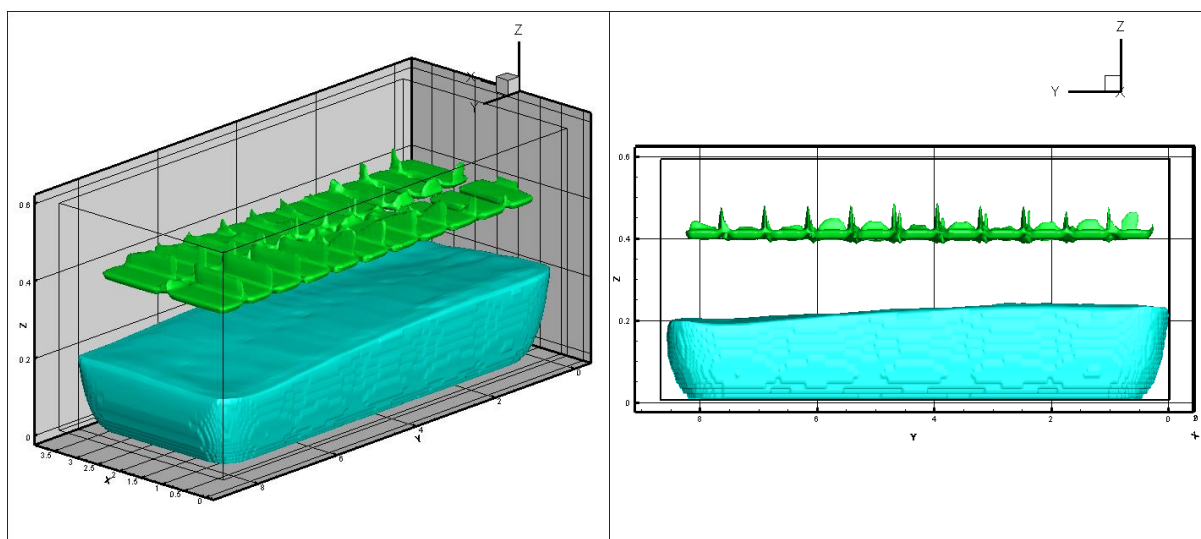


Рис. 18. Распределение жидкого металла и газовой фазы в объеме с объемной долей газа близкой к единице, $t = 50\text{с}$.

Незначительный вертикальный перенос электролита препятствует быстрому поднятию газов к анодам, таким образом, зона обратного окисления долгое время сохраняет свою форму (рис. 19). Жидким металл, являясь самой

тяжелой компонентой смеси, при отсутствии сил Лоренца приходит в стабильное состояние, разглаживая возникшую нестабильность.

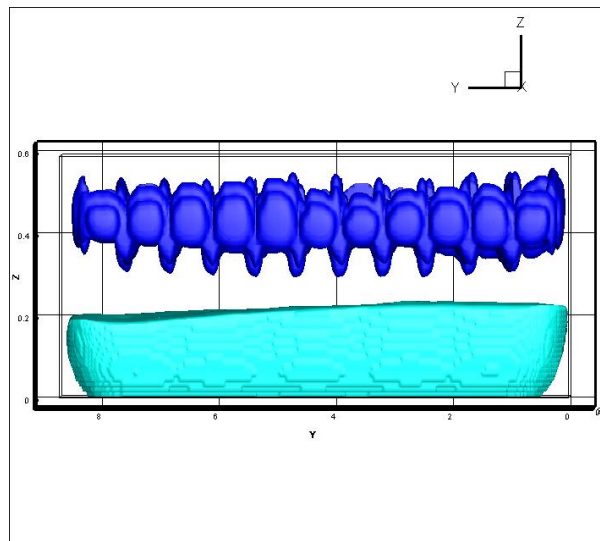


Рис. 19. Распределение жидкого металла и газовой фазы с объемной долей газа 0.1, $t = 50$ с.

Увеличившееся сопротивление среды уменьшает плотность протекающего тока (рис. 20), устройства, подключённые параллельно к электролизёру, могут сигнализировать о наступлении анодного эффекта.

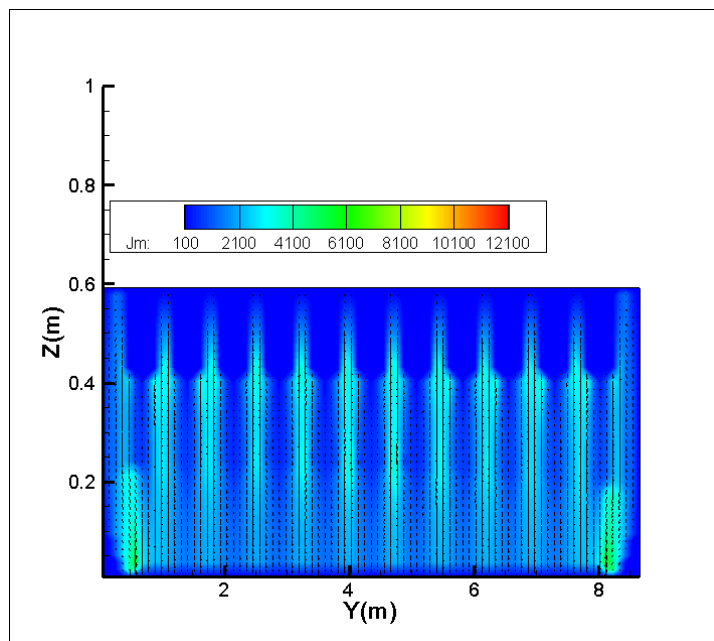


Рис. 20. Распределение плотности тока в плоскости YZ ($x = 2.0$ м.), $t = 50$ с.

Зависящая от плотности протекающего тока напряженность магнитного поля так же по модулю уменьшается на несколько порядков.

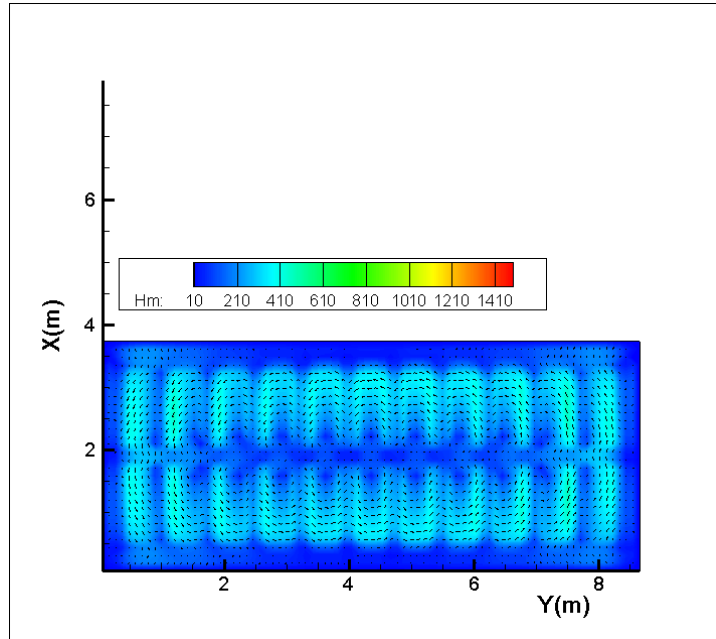


Рис. 21. Распределение магнитного поля в плоскости XY ($z = 0.3\text{ м.}$), $t = 50\text{ с.}$

Сила Лоренца при наступлении анодного настолько мала, что уже не вносит каких-либо существенных изменений в динамику смеси (рис. 22).

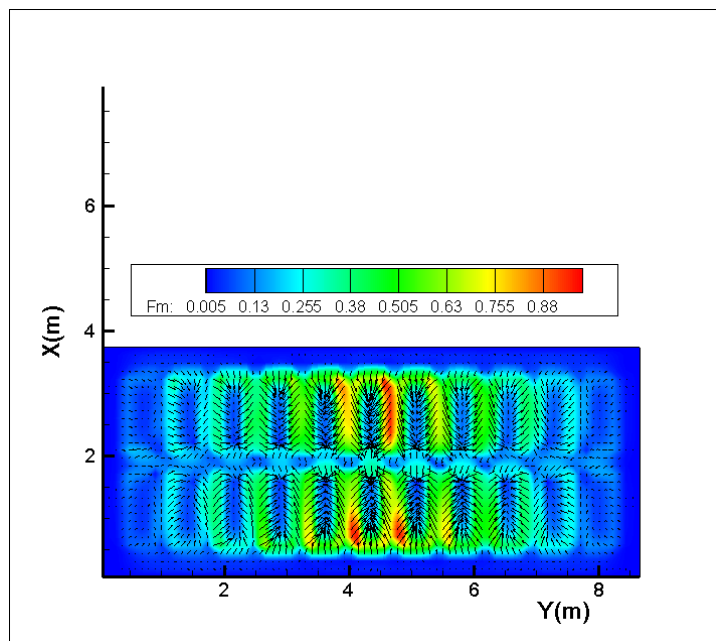


Рис. 22. Распределение сил Лоренца в плоскости XY ($z = 0.3\text{ м.}$), $t = 50\text{ с.}$

Нагретая увеличившейся силой тока область электролизера постепенно начинает остывать, а тепло распространяться по всему объёму ванны (рис. 23).

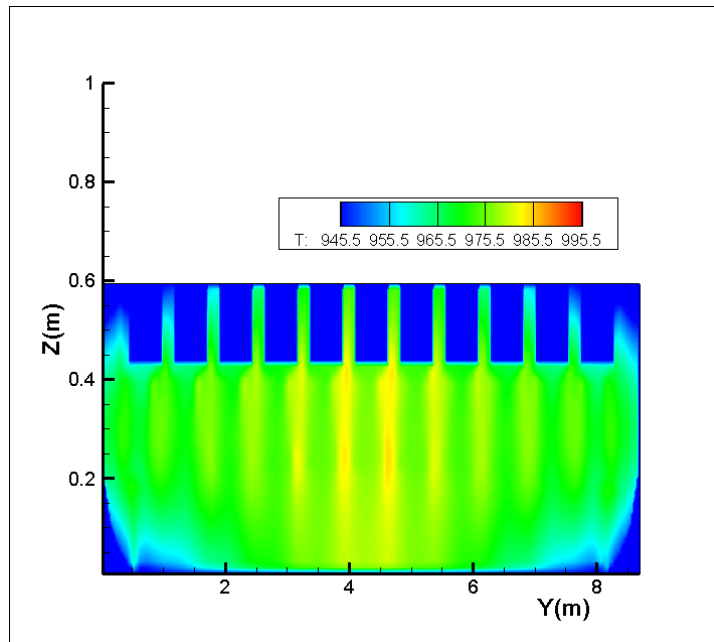


Рис. 23. Распределение температуры в плоскости YZ ($x = 2.0\text{ м.}$), $t = 50\text{ с.}$

Заключение

В представленных результатах численных экспериментов процесс развития анодного эффекта можно условно разбить на три стадии:

- **Начальная МГД-стабильная стадия.**
- **Стадия развития МГД-нестабильности.** Происходит увеличение объемной доли газовой фазы непосредственно под подошвой анодов и перераспределение токов в объеме ванны, которое вызывает локальное увеличение силы Лоренца. На этой стадии анодного эффекта может развиваться МГД-нестабильность.
- **Конечная стадия МГД-нестабильности, прекращение процесса электролиза.** Объемной доля газа под анодами достигает значения, при котором электрический ток начинает уменьшаться. Модуль силы Лоренца при этом снижается до значений, при котором она не может существенно повлиять на динамику процесса электролиза. На этой стадии происходит снижение скорости реакции электролиза до нуля.

Проведенное исследование позволило промоделировать процесс развития анодного эффекта до стадии, на которой происходит прекращение процесса электролиза, что на практике приводит к уменьшению выхода металла. Обычно технологические работы по устранению анодного эффекта производятся уже на третьей стадии, когда ток перестает течь в электролизной ванне. Численные эксперименты показали, что для предотвращения потери первичного алюминия работы нужно начинать в начале второй стадии, предотвращая развитие МГД-нестабильности.

Список литературы

1. Thonstad J., Fellner P., Haarberg G.M., Híveš J., Kvande H., Sterten A., Aluminium Electrolysis. Fundamentals of the Hall-Héroult Process // 3rd edition, Aluminium-Verlag, Dusseldorf. 2001. 359 p.
2. Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия. Решение задач управления технологией // Красноярск: Сибирский федеральный университет. 2013. 271 с.
3. Савенкова Н.П., Кузьмин Р.Н., Анпилов С.В., Калмыков А.В. «Моделирование влияния динамики изменения внутреннего пространства ванны алюминиевого электролизёра на МГД-процессы» // Успехи прикладной физики, 2016, Т.4, № 4, С. 409-415.
4. Ariana M., Désilets M., Proulx P. On the analysis of ionic mass transfer in the electrolytic bath of an aluminum reduction cell // The Canadian journal of chemical engineering. 2014, Vol. 92, P. 1951-1964.