

Моделирование динамики электролита в алюминиевом электролизере

С. В. Боговалов

*Институт прикладных информационных технологий
при Московском Инженерно-физическом институте (гос. университете)
Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия*

Развитие промышленных электролизеров для производства алюминия сопровождается увеличением полного электрического тока электролизеров. Соответственно, возрастает влияние электромагнитных сил, пропорциональных квадрату тока, на гидродинамические процессы в жидком электролите и металле. Возникают проблемы, связанные с большой деформацией поверхности раздела электролита и металла, замыканием анодов на катодный металл, волнением металла и др. Все эти процессы необходимо учитывать при проектировании новых установок. Однако, сделать это весьма непросто.

Измерения на работающих электролизерах затруднены из-за высокой температуры и химической агрессивности криолитов расплава. Если учесть, что многократная переделка электролизера стоит очень дорого, то становится ясно, что единственным приемлемым методом оптимизации электролизера является математическое моделирование всего комплекса происходящих в нем процессов.

При том, что это направление активно используется при проектировании электролизеров, моделирование магнитогидродинамических процессов с учетом всех существенных факторов, оставалось до недавнего времени недоступным в силу его сложности. Обзор современного состояния работ выходит за рамки данной краткой записки. Отметим только, что возможны два пути решения этой проблемы. Один путь – создание оригинальных математических пакетов для моделирования МГД процессов в электролизерах. Ряд российских институтов выходит с предложением разработать такие программные продукты. Однако, это путь долгий, дорогой и с плохо предсказуемым результатом (скорее всего отрицательным).

Нам представляется, что более перспективным является использование для моделирования хорошо зарекомендовавших себя коммерческих пакетов для моделирования гидродинамических течений (таких как CFX или STAR-CD) и расчета электромагнитных полей (ANSYS). В этом случае мы уже имеем надежные численные коды, которые учитывают практически все существенные процессы, происходящие в установке, и способные воспроизводить при расчетах реальную геометрию устройства. Единственная проблема, которую надо решить – это модифицировать эти пакеты так, чтобы они позволяли моделировать реальные МГД течения.

Целью нашей работы является разработка на основе коммерческих

пакетов CFX, STAR-CD и ANSYS программного комплекса для моделирования всего ряда физико-химических процессов, происходящих в электролизерах. Он должен включать в себя:

- Расчет электромагнитного поля, создаваемого первичными источниками с учетом сложной системы проводящих шин, системами анодов и катодов, а также токораспределением в жидком алюминии и электролите с учетом вихревых токов, индуцируемых в проводящей среде.
- Полную трехмерную геометрию установки.
- Гидродинамические течения в системе электролит – расплав с учетом свободной поверхности как электролита, так и границы раздела электролит-металл.
- Расчет электромагнитного поля должен осуществляться с учетом влияния на поле движения свободной поверхности. Только в этом случае можно решать задачу МГД неустойчивости свободной поверхности электролита или границы раздела электролит-металл.
- Расчет температурных полей и химических процессов в электролизере.

Система гидродинамических уравнений, которая решается программным комплексом в демонстрационном примере, имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho v = 0;$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i v_k - \tau_{ik})}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + [j \times B]_i - \rho g_i;$$

Здесь v_i, v_k – компоненты скорости, p – давление, ρ – плотность, g – ускорение свободного падения, τ_{ik} – тензор вязких напряжений, j – плотность электрического тока, B – магнитное поле.

К ним добавляются уравнения для плотности энергии турбулентных пульсаций k и скорости их диссипации ε .

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho v_i k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) =$$

$$= \mu_t 2s_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - (v_i v_j - 2s_{ij}) \frac{\partial v_i}{\partial x_j};$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho v_i \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \\ & = \frac{\varepsilon}{\kappa} \left[1.44 \cdot 2s_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right] - \\ & 1.44 \cdot \frac{\varepsilon}{\kappa} \cdot (v_i v_j - 2s_{ij}) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - 1.92 \cdot \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} - 0.33 \rho \varepsilon \frac{\partial v_i}{\partial x_i}; \end{aligned}$$

Она дополняется уравнением для функции C - VOF (volume of fraction), которая описывает границу раздела фаз или свободную поверхность. Эта же функция используется для задания электрической проводимости среды.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_i \frac{\partial}{\partial x_i} C = 0;$$

Электромагнитное поле в системе описывается векторным \vec{A} и скалярным электрическим V потенциалами. Система уравнений для них имеет вид

$$rot \frac{1}{\mu \mu_0} rot \vec{A} = \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V + [\vec{v} \times \vec{B}] \right);$$

$$div \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V + [\vec{v} \times \vec{B}] \right) = 0;$$

Для векторного потенциала используется Кулоновская калибровка.

Для реализации решения этой системы уравнений были решены несколько проблем:

1. Модифицированы конечные элементы в ANSYS, чтобы при расчете электромагнитного поля учитывались члены, описывающие адвекцию магнитного поля в проводящей среде при произвольном поле скоростей.
2. Модифицирован расчет сил Ампера в проводящей среде, чтобы учитывалось влияние произвольного поля скоростей на эту силу.
3. Модифицированы конечные элементы в ANSYS так, чтобы электромагнитные поля рассчитывались с произвольным распределением

проводимости среды в пространстве. Это необходимо для расчета электромагнитных полей с учетом меняющейся свободной поверхности проводника.

4. Развита технология передачи сил из ANSYS в CFX или STAR-CD и обратно передача поля скоростей и скаляра VOF из CFX или STAR-CD в ANSYS.

5. Развита технология синхронизации работы этих программных пакетов, чтобы обеспечить их совместную работу по решению полной системы уравнений.

Для демонстрации возможностей созданного программного комплекса мы провели моделирование переходного процесса, возникающего после подачи напряжения на анод и катод модельного электролизера. Геометрия этого электролизера показана на рис. 1. Он состоит из ванны прямоугольной формы. Анод также представляет собой прямоугольник, погруженный в электролит в центре ванны. Задача полностью трехмерная. Симметрия геометрии не использовалась.

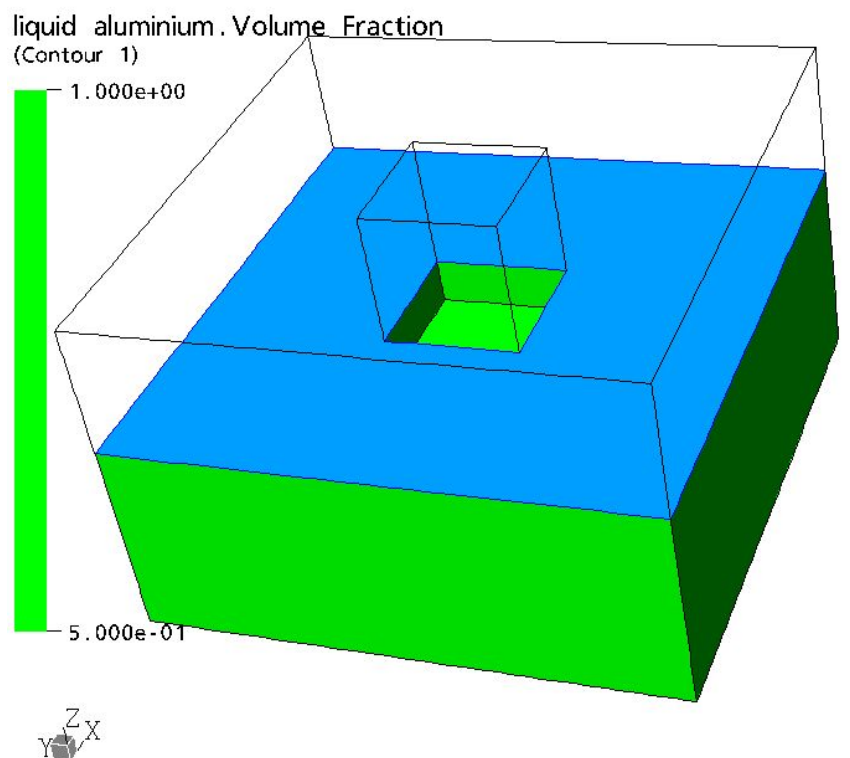


Рис. 1. Геометрия модельного электролизера.

В прямоугольную ванну, заполненную электролитом до поверхности, показанной голубым цветом, погружен анод. Анод, расположенный в центре ванны, также имеет форму прямоугольника.

В момент времени $t=0$ на анод подается напряжение. Из-за самоиндукции всей

системы ток в ней нарастает с характерным временем ~ 0.5 сек. В это время нарастающее магнитное поле давит на поверхность проводящей жидкости сверху вниз, отталкивая ее от анода. Поверхность начинает деформироваться. Последовательность рисунков, показывающая форму поверхности в различные моменты времени показана на рис. 2. Момент, когда контакт жидкости и анода минимален, показан на втором рисунке из этой серии. В течение примерно 0.5 сек в электролизере развиваются колебания поверхности жидкости. Выглядят они как автоколебания. Но к концу моделирования положение поверхности вблизи анода становится практически стационарным, хотя в ванне еще продолжают довольно интенсивные движения. В представленном случае все моделирование проводилось для периода времени в 1 сек. после подачи напряжения на анод.

Моделирование выполнялось на персональном компьютере, имеющем процессор с тактовой частотой 2.8 ГГц и оперативной памятью 1 Гбайт.

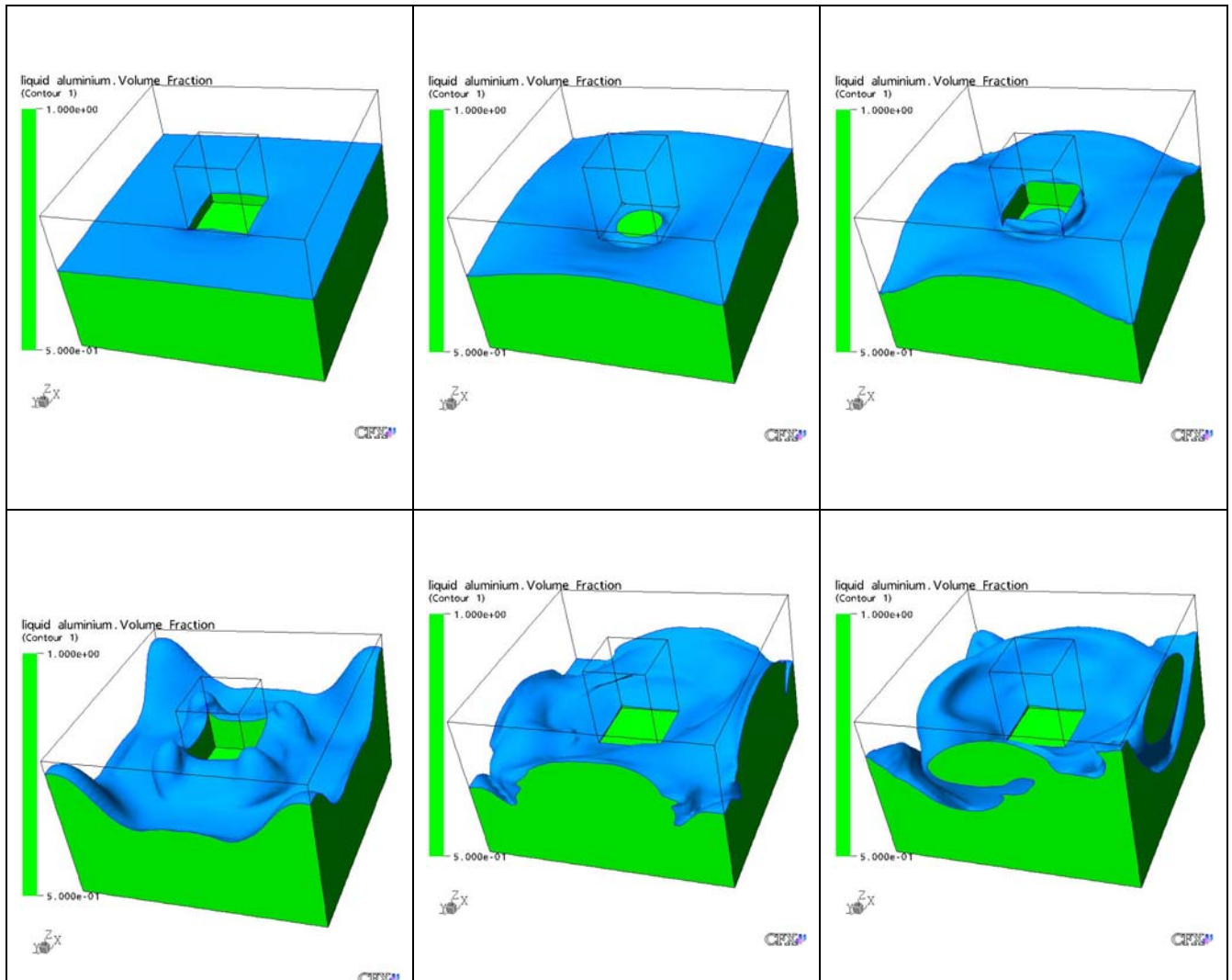


Рис. 2. Положение свободной поверхности воздух-электролит в моменты времени 0.1, 0.18, 0.32, 0.49, 0.69 и 0.84 сек после подключения напряжения.

Заключение

Модификация и объединение коммерческих пакетов CFX, STAR-CD и ANSYS в единый программный комплекс позволяет решать практически весь комплекс задач, возникающих при проектировании промышленных установок для производства алюминия. В частности, нами продемонстрировано, что даже такие сложные задачи, как деформация поверхности раздела двух сред под влиянием магнитного поля, могут быть решены при помощи созданного программного комплекса. Это дает основание считать, что проблема оптимизации алюминиевых электролизеров по отношению к магнитогидродинамическим движениям электролита и поверхности раздела двух сред электролит-металл переходит из плоскости научных разработок в разряд обычного инженерного расчета.