

А. Г. Архипов, П. В. Поляков

## ИЗУЧЕНИЕ ОБЖИГА АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ПРИ ПОМОЩИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Стадия обжига и пуска является одним из главных факторов, влияющих на срок службы алюминиевого электролизера. В мировой алюминиевой промышленности до сих пор нет единого мнения о лучшем способе, регламенте обжига и пуска электролизеров. Представлены математические модели двух наиболее распространенных способов обжига электролизеров: обжига на коксе и плазменного обжига, полученные в результате расчета температурных, электрических полей и напряженно-деформированного состояния электролизеров с использованием конечно-элементного пакета ANSYS и CFD-пакета «Star-CD».*

Главной причиной преждевременного выхода из строя алюминиевого электролизера является нарушение целостности подины и, как следствие, протек расплава к блюмсам и в цоколь электролизера. Одним из главных факторов, влияющих на целостность подины (по данным М. Сорлье и Х. Ойя [1], это 25 %), является технология обжига и пуска электролизера. Поэтому проблема выбора оптимального метода обжига и пуска электролизера является достаточно актуальной.

Существенную помощь в выборе оптимальных технологических параметров обжига и пуска может оказать математическое моделирование процессов, протекающих в электролизере, основанное на оценке тепловых, электрических полей электролизера, напряженно-деформированного состояния (НДС) катодного устройства и целостности подины.

Обжиг – это предварительный нагрев электролизера до температур, близких к рабочим, перед заливкой в него электролита с температурой 960...980 °С (пуск) и металла. Обжиг служит для достижения следующих целей:

- создания монолитной подины;
- уменьшения натриевого расширения при пуске;
- уменьшения термического удара при заливке электролита.

Вследствие неправильного или некачественного обжига нарушение целостности подины в процессе обжига или при пуске может произойти по следующим причинам:

- вследствие возникновения трещин и расслоений в швах вследствие термических напряжений;
- отрыва межблочных швов от продольных и торцевых сторон подового блока и последующего протекания расплава к блюмсам и в цоколь электролизера;
- отрыва периферийных швов от бортовой футеровки и торцевых сторон подового блока и протекания расплава к блюмсам и в цоколь электролизера;
- неравномерности натриевого расширения;
- неравномерности распределения тока в подине.

Эти причины могут быть вызваны неодинаковым термическим расширением стального катодного кожуха, материалов футеровки и подовых блоков, усадкой подовой массы в процессе коксования, высокими термическими градиентами по поверхности и высоте подины.

Существует несколько способов обжига электролизеров, которые можно разбить на две группы: обжиг внутренними и обжиг внешними источниками тепла. В настоящее время в алюминиевой промышленности наибольшую популярность получили два способа обжига: обжиг на коксе электролизера, являющийся разновидностью обжига внутренними источниками тепла и пламенный обжиг – разновидность обжига внешними источниками тепла. Рассмотрим построение математической модели происходящих в электролизере процессов для каждого из этих способов.

**Расчет обжига на коксе электролизера с обожженными анодами.** Как мы уже отметили, обжиг на коксе является разновидностью обжига внутренними источниками тепла. Нагрев электролизера происходит за счет Джоулевого тепла, которое выделяется в анодах, угольной подине и слое прокаленного нефтяного кокса (коксовой крупки), который укладывается на подину и на который ставятся аноды. Электролизер включается в электрическую цепь электролизного корпуса и обжигается в течение 68...74 ч. Когда температура подины становится близка к рабочей, обжиг заканчивается и начинается пуск электролизера, когда в него заливается электролит с рабочей температурой около 960 °С. Обжиг на коксе обычно проводится с использованием шунтов-реостатов, за счет которых часть тока проходит мимо электролизера для того, чтобы сделать нагрев подины более плавным и избежать токового удара. Во время обжига шунты-реостаты по очереди отключают, постепенно увеличивая нагрузку.

Для оценки тепловых полей и напряженно-деформированного состояния катодного устройства при обжиге на коксовой крупке по чертежам и технологической инструкции была построена трехмерная конечно-элементная модель электро-

лизера с обожженными анодами при обжиге на коксе.

Поскольку электролизер имеет симметричную конструкцию, то строилась модель четверти электролизера, состоящая из катодного устройства, обожженных анодов со штангами, части анодной и катодной ошиновки и коксовой постели (рис. 1). Пространство между бортом и анодом и верх анодов засыпаны флотационным криолитом, пространство между анодами заполнено воздухом, а сверху закрыто асбестовым картоном. Катодное устройство состоит из углеродных подовых блоков, в которые заделаны специальной пастой или залиты чугуном стальные блюмсы; под подовыми блоками располагаются несколько слоев огнеупорных и теплоизоляционных материалов; по бокам катодного устройства на огнеупорной бровке установлены угольные бортовые блоки или карбидокремниевые плиты. Пространство между ними и подовыми блоками, а также между самими блоками набито углеродной подовой массой. Все катодное устройство заключено в стальной кожух.

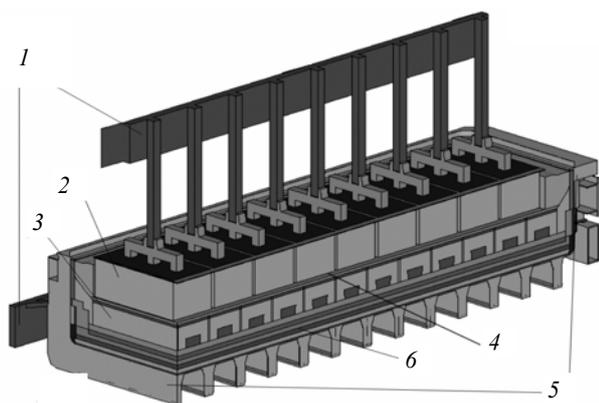


Рис. 1. Модель четвертой части электролизера с обожженными анодами при обжиге на коксе: 1 – часть ошиновки; 2 – обожженные аноды; 3 – подовые блоки; 4 – коксовая крупка; 5 – стальной кожух; 6 – теплоизоляция и огнеупоры

Разработка и отладка математической модели обжига на коксе электролизера производилась с учетом температур и напряжений, измеренных при обжиге реальных электролизеров на коксе.

Для нахождения температурного поля электролизера во время обжига необходимо решить сопряженную нестационарную задачу, состоящую из двух задач – теплопроводности и электропроводности [2].

Для решения этой задачи применялся конечно-элементный пакет ANSYS.

Конечно-элементная модель состояла из структурированной шестигранной сетки. В термоэлектрической модели присутствовало около 90 000 узлов, 80 000 элементов SOLID-69 и 50 материалов. Как в термоэлектрической модели, так и в модели расчета напряженно-деформированного состояния использовались

тепловые, электрические и механические свойства исходных материалов, зависящие от температуры. Для решения нестационарной термоэлектрической задачи задавались следующие свойства: удельная теплопроводность, теплоемкость, плотность, а также удельное электрическое сопротивление.

Ставились следующие граничные условия: ток прикладывался к границе анодной ошиновки, а нулевой потенциал – к выходу катодной ошиновки; коэффициенты теплоотдачи, включающие конвективную и лучистую составляющие, определялись на внешних поверхностях электролизера.

Коэффициенты теплоотдачи задавались в табличном виде для учета температурной зависимости. Коэффициенты конвективной теплоотдачи рассчитывались по эмпирической формуле, в которую входила зависимость температуры стенки и температуры окружающей среды от положения стенки в пространстве (горизонтального или вертикального) и ее характерного размера. Коэффициент теплоотдачи излучением задавался в зависимости от степени черноты материала, температуры стенки и температуры окружающей среды. Для катодного кожуха угловой коэффициент брался равным 0,5.

Отключение шунтов реостатов моделировалось путем скачкообразного увеличения силы тока во времени, значения которой выбирались согласно замерам тока, текущего через электролизер во время обжига реальных электролизеров на коксовой крупке.

Нестационарный термоэлектрический расчет выполнялся от момента подключения электролизера на обжиг до 72 ч обжига с шагом 4 ч при температуре окружающей среды 0 °С (рис. 2).

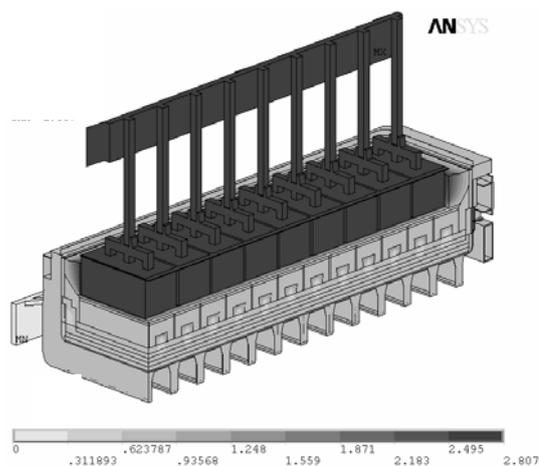


Рис. 2. Распределение электрического потенциала В через 48 ч обжига

После получения температурного поля анализировались распределение температур (рис. 3) и температурные градиенты (рис. 4) (высокие температурные градиенты были отмечены в крайней подовой секции).

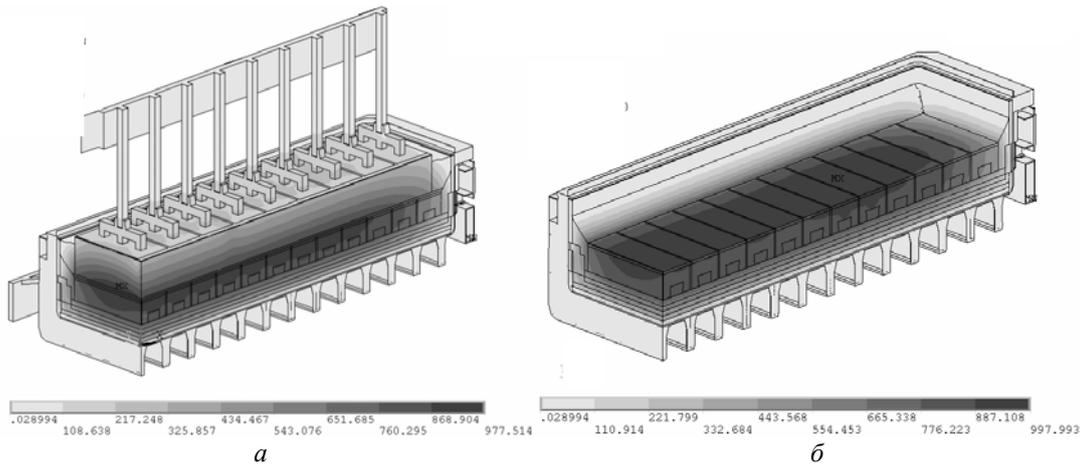


Рис. 3. Температурное поле в конце обжига: а – весь электролизер; б – катодное устройство

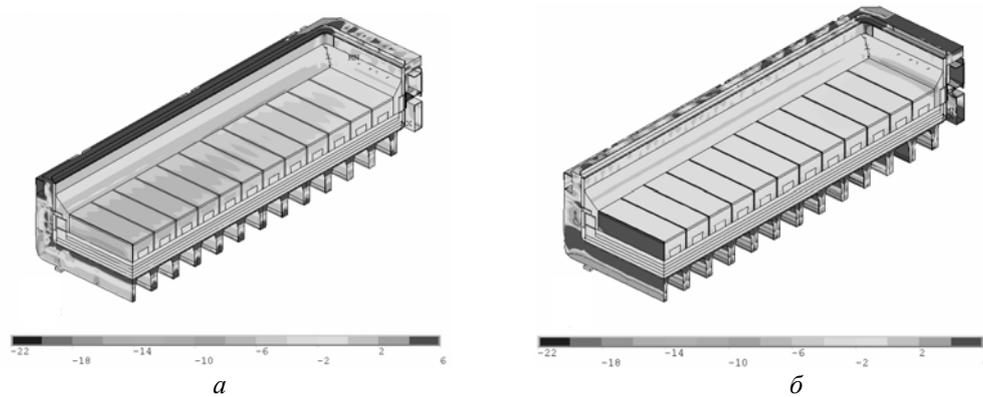


Рис. 4. Нормальные напряжения, МПа, в подине после 72 ч обжига: а – продольное направление; б – поперечное направление

После нахождения температурного поля в определенные моменты времени обжига (24, 48 и 72 ч) полученное тепловое поле передавалось в математическую модель для расчета напряженно-деформированного состояния катодного устройства и решения задачи термоупругопластичности.

Для расчета НДС было взято только катодное устройство. Размерность модели составила 80 000 узлов и 65 000 элементов. Тип элемента менялся на SOLID-185. Для расчета НДС задавались следующие свойства материалов: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность и коэффициент термического линейного расширения. Для стали необходимо учитывать нелинейное поведение материала, в связи с чем задавались предел текучести и модуль упрочнения.

Были поставлены следующие граничные условия: создавался дополнительный слой элементов в том месте, где катодное устройство опиралось на подкатодную раму, на эти элементы устанавливалось нулевое перемещение по вертикали, а на поверхности которая граничит с низом катодного устройства, и на самом катодном устройстве создавались контактные элементы, в результате чего это устройство могло свободно подниматься вверх, но не могло опускаться ниже подкатодной рамы. Кроме того, были заданы условия симметрии

в плоскости симметрии; ускорение свободного падения для учета силы тяжести: температуры в узлах, полученные по данным термоэлектрического анализа.

По результатам расчета напряженно-деформированного состояния (рис. 5) определялись возможности разрушения катодного устройства, нарушения целостности подины и многие другие параметры. Под целостностью катода в данной статье понимается следующее:

- соблюдается целостность подины: она хорошо обжата со всех сторон и нет раскрытия межблочных и периферийных швов;

- нет разрушений футеровки (оценивается по критерию Мора);

- катодный кожух сохраняет свою целостность, нет трещин и разрушений в катодном кожухе (оценивается по критерию фон Мизеса).

Разработанная авторами методика позволяет делать расчеты различных режимов обжига на коксе любых типов электролизеров, оценивать температурные поля и целостность подины электролизера для выбора оптимального режима обжига. С помощью данной методики проведены расчеты для выбора технических решений по минимизации температурных градиентов и термических напряжений в крайних подовых блоках.

Предложенное техническое решение внедрено на Саянском алюминиевом заводе, поданы 2 заявки на патент.

Данная методика, применяемая к одному типу электролизера, позволила провести серию расчетов как для различных технологических параметров обжига, так и для различных конструктивных решений с точки зрения оценки их влияния на качество обжига.

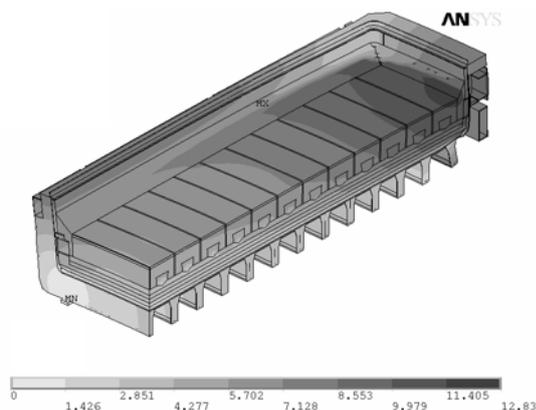


Рис. 5. Деформированное состояние, мм

**Расчет тепловых полей при пламенном обжиге с учетом тепломассопереноса и горения топлива.** Пламенный обжиг электролизеров относится к обжигу внешними источниками тепла. Нагрев электролизера происходит за счет сжигания жидкого топлива или природного газа несколькими форсунками, установленными в пространстве между анодом и подиной. Пространство между анодом и боковой футеровкой сверху укрыто стальными листами и засыпано слоем криолита. Отвод газов осуществляется через несколько отверстий сверху. Обжиг ведется в течение 48...72 ч зависимости от типа электролизера.

В начале для решения задачи пламенного обжига была разработана методика расчета температурного поля с использованием эффективных коэффициентов теплопроводности [2], которая позволяла получить нужное температурное поле и провести оценку целостности подины по методике, описанной выше.

По этой методике проводилась серия расчетов для трех типов электролизеров, и было рассчитано три варианта пламенного обжига, отличающихся степенью обжига периферийных швов. По полученным температурным полям определялось напряженно-деформированное состояние катодного устройства, при этом было выяснено, что наименьшие растягивающие напряжения возникают в случае укрытия продольных периферийных швов и их наименьшем обжиге. Рекомендации, полученные по результатам этого расчета, были реализованы на Братском алюминиевом заводе.

Однако такая технология расчета имеет ряд существенных недостатков. Она не позволяет оценить схему расстановки горелок, определить параметры обжига новых электролизеров, для которых еще нет замеров, и др. Для преодоления этих недостатков и повышения точности решения была разработана методика расчета пламенного обжига с решением задачи тепломассопереноса и горения топлива, которая позволяет получить следующие результаты:

- температурное поле электролизера и газовой среды в любой момент времени и другие тепловые характеристики;
- скорость движения газовой среды и другие газодинамические характеристики.

Для решения задачи пламенного обжига использовался CFD-пакет «Star-CD-3.22», основанный на методе контрольного объема [3].

Решение полной нестационарной задачи, отражающей весь комплекс физико-химических процессов при пламенном обжиге электролизера, требует очень больших вычислительных затрат. На каждом шаге по времени должна быть обеспечена заданная точность решения, что требует выполнения достаточного количества внутренних итераций по каждому процессу. Кроме того размер временного шага не может превышать минимального характерного времени изменений в системе.

Решение этой задачи методом прямого счета, т. е. совместное решение сопряженной задачи, состоящей из нестационарной задачи теплопереноса в газовой среде и нестационарной задачи теплопроводности в твердом теле, показало, что для устойчивого счета размер временного шага не должен превышать 0,1 с иначе газодинамическая задача становится неустойчивой и решение не может быть получено. Каждый временной шаг даже на компьютере класса Pentium IV, занимает порядка нескольких минут, следовательно расчет всего процесса обжига, который длится десятки часов, займет несколько лет. Поэтому метод прямого счета не подходит для промышленных расчетов на имеющейся в настоящее время вычислительной технике.

Из-за значительной разницы во времени и протекания процессов в газовой фазе и твердом теле можно считать поле скоростей газовой среды постоянным в определенный промежуток времени, т. е. квазистационарным, что позволяет замораживать поле скоростей и решать только тепловую задачу.

Идея метода замораживания заключается в следующем: после решения полной сопряженной задачи для небольшого промежутка времени (10 с) с очень мелким шагом по времени (0,001...0,100 с), когда совместно решаются не-

стационарная задача теплопереноса в газовой среде и нестационарная задача теплопроводности в твердом теле, решение уравнений для гидродинамических характеристик (скорости, давления, вязкости) отключается. Таким образом, поле скоростей замораживается, т. е. скорости фиксируются во времени, что позволяет для этого поля скоростей решать сопряженную нестационарную задачу теплопереноса в газовой среде и теплопроводности в твердом теле с большим шагом по времени (10 мин).

Но поле температур все-таки имеет влияние на поле скоростей, поэтому через определенный промежуток времени (4...12 ч) решение всех уравнений гидродинамики снова включается на небольшой промежуток времени (5 с) с маленьким шагом (0,1 с). После того как поле скоростей перестроилось и перестало заметно меняться, решение уравнений гидродинамики отключается и решается только задача теплопереноса с большим временным шагом (рис. 6).

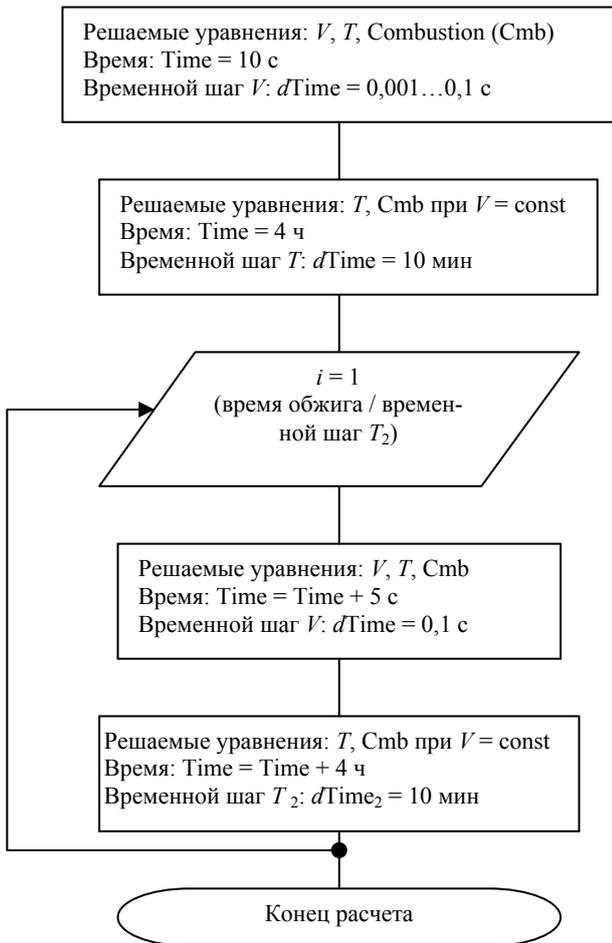


Рис. 6. Блок-схема методики расчета тепловых полей при пламенном обжиге с учетом теплопереноса и горения топлива с замораживанием поля скоростей:  $V$  – решение всех уравнений, связанных с гидродинамикой (скорости, давления, плотности, вязкости);  $T$  – решение уравнений только для температуры; Combustion (Cmb) – решение уравнений горения топлива

Этот процесс перезапусков был автоматизирован с помощью написания специального скрипта на внутреннем языке программирования Star-CD. При такой постановке значительно сокращается время счета, поскольку решается в основном нестационарная задача теплопроводности, не требующая столь больших вычислительных ресурсов и не имеющая таких жестких ограничений на временной шаг, как газодинамическая задача, а полная нестационарная задача с газодинамической частью решается только для небольших отрезков времени.

По чертежам и технологическому регламенту строилась сеточная модель целого электролизера, которая включала анодное устройство, катодное устройство, газозвудушную среду, укрытия и засыпку из вторичного криолита. На границах между жидкими – твердыми ячейками строился пограничный слой с достаточно мелким размером ячейки (около 1 мм), чтобы  $y^+$  был равен 100.

Конечно-элементная модель представляет собой структурированную шестигранную сетку (рис. 7). Количество жидких ячеек – 202 000, твердых ячеек – 303 000.

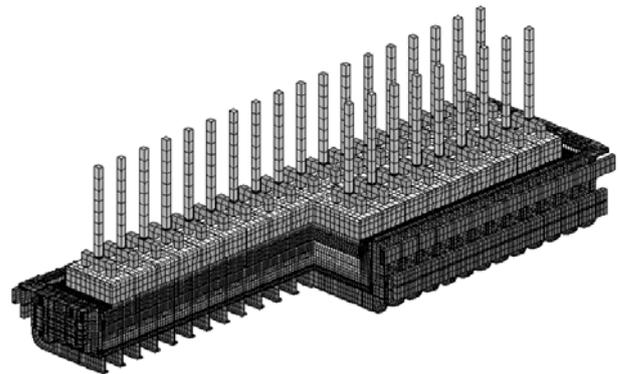


Рис. 7. Конечно-элементная модель электролизера (представлена ¼ модели)

На внешних границах электролизера задавались тепловое сопротивление, включающая коэффициент конвективной теплоотдачи и потери тепла излучением и пересчитываемая в зависимости от температуры поверхности на каждой итерации, и температуре окружающей среды.

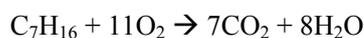
Турбулентность была представлена в виде  $k - \epsilon$ -модели.

В местах установки горелок ставилось входное граничное условие Inlet на поверхность, площадь которой равна площади выходного сопла горелки. На этих границах согласно требуемому массовому расходу задавались компоненты скорости  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , а также температура входящей газовой смеси. В местах выхода потока из укрытий на поверхности, площадь которых равна площади выходных отверстий, принималось условие равенства давления нулю.

На всех границах между жидкими и твердыми ячейками задавалась степень черноты и коэффициент отражения, соответствующие материалу, – для расчета теплообмена излучением внутри газовой области и переизлучения твердых поверхностей. Газовоздушная среда также участвовала в теплообмене излучением с коэффициентом поглощения  $0,05 \text{ м}^{-1}$ . Тепловое излучение моделировалось методом дискретных ординат.

Для твердых материалов задавались теплофизические свойства: плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность в зависимости от температуры; для компонентов газовой среды – температурные зависимости молекулярных свойств: плотность, динамическая вязкость, удельная теплоемкость, теплопроводность, молекулярный вес; для дополнительных компонентов, участвующих в реакции, такие свойства, как теплота и температура образования.

Предполагалось, что процесс горения дизельного топлива осуществляется по следующей реакции:



Для расчета процесса горения была выбрана стандартная модель обрыва вихря. При наблюдениях за реальными горелками, используемыми при пламенном обжиге электролизеров, выяснилось, что процесс горения происходит в основном за пределами самой горелки, поэтому был выбран полностью смешанный тип реакции, когда ком-

поненты реакции выходят из горелки одним смешанным потоком. На входных граничных условиях Inlet задавалась массовая концентрация входящих скаляров  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{C}_7\text{H}_{16}$ , с учетом соотношения подачи топлива и воздуха: их стехиометрического количества, избытка или недостатка воздуха.

После установки всех параметров проводился нестационарный тепловой расчет (рис. 8).

При реальном обжиге установка может сама регулировать расход топлива и воздуха для поддержания заданного графика нагрева подины, ориентируясь на показания нескольких термопар, измеряющих температуру поверхности подины. Расход также может регулироваться вручную, на основе показаний термопар.

Для того чтобы выдержать заданный график нагрева, в определенные моменты времени при расчете изменялась скорость входящего потока, исходя из рассчитанных температур поверхности подины в точках совпадающих с местом установки термопар.

После решения тепловой задачи обжига полученное температурное поле было передано в конечно-элементный пакет ANSYS для расчета напряженно-деформированного состояния.

Разработанная авторами методика расчета пламенного обжига различных типов электролизеров может быть использована для выбора оптимальных параметров обжига.

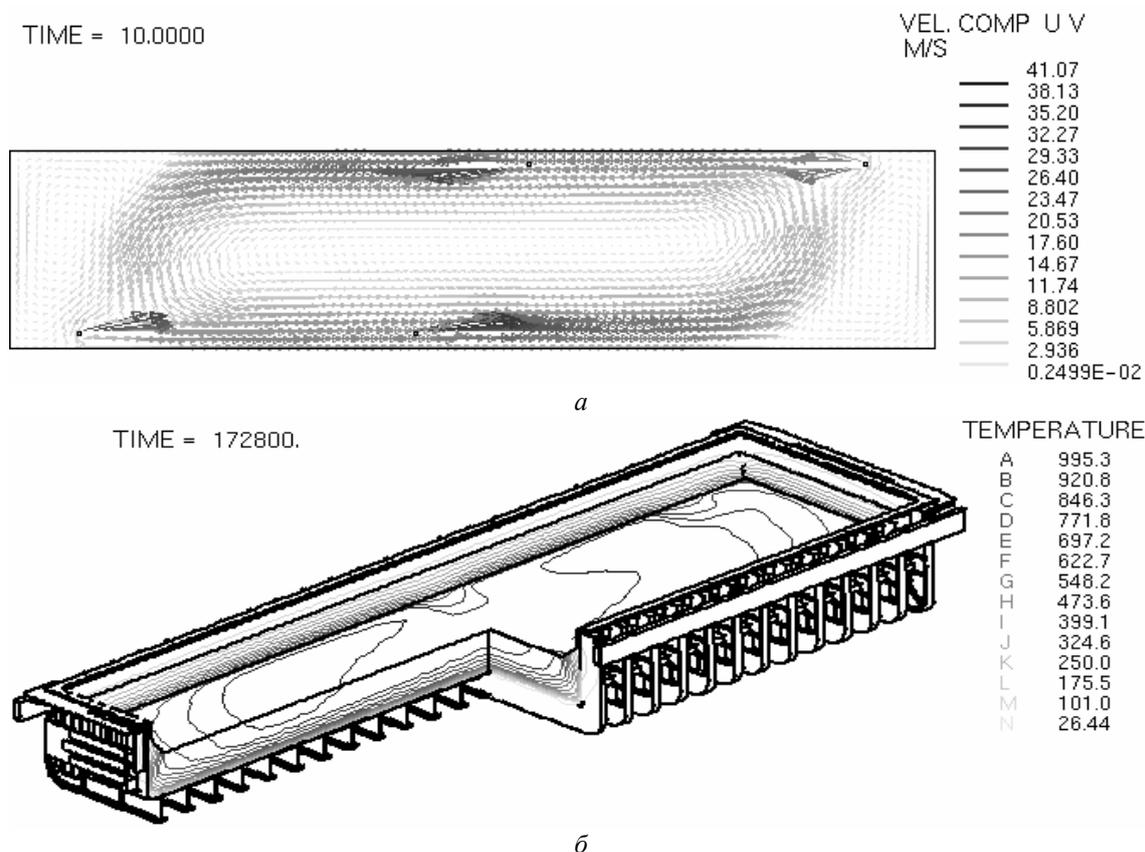


Рис. 8. Результаты расчета тепловых полей: а – поле скоростей, м/с, газовой среды в начале обжига; б – температурное поле, с, катодного устройства в конце обжига

Данная методика позволяет оценить влияние на температурное поле и напряженно-деформированное состояние следующих параметров:

- количества горелок;
- расстановки горелок;
- времени обжига;
- конструкции электролизера;
- расхода топлива и соотношения воздуха – топлива;
- технологии обжига (засыпать или нет периферийную часть, нужно ли укрывать аноды и т. д.).

Подводя итог вышесказанному, сформулируем следующие выводы:

- разработана методика и проведены расчеты температурных, электрических полей и напряженно-деформированного состояния при обжиге на коксе алюминиевого электролизера. Сравнительный анализ рассчитанных и измеренных температур подины показывает их удовлетворительное совпадение;
- проведена серия расчетов различных конструктивных и технологических параметров на одном типе электролизера, оценено их влияние на целостность подины при обжиге;
- по данной методике были рассчитаны параметры электрического обжига для нескольких типов электролизеров на Саяногорском алюминиевом заводе, чтобы улучшить целостность подины при обжиге. По результатам расчета были внесены изменения в технологический регламент;
- разработана методика расчета температурных полей при пламенном обжиге с использованием эффективных коэффициентов теплопровод-

ности и проведены расчеты температурного поля и напряженно-деформированного состояния электролизеров контрфорсного и шпангоутного типа для трех вариантов пламенного обжига с различной степенью обжига периферийных швов. Сделан вывод о том, что наименьшие растягивающие напряжения возникают в случае укрытия продольных периферийных швов и их наименьшем обжиге;

– разработана методика расчета пламенного обжига с учетом динамики газовой среды и горения топлива и проведен расчет температурных полей при обжиге нескольких типов электролизеров. В настоящее время проводятся расчеты для оценки влияния различных параметров пламенного обжига на целостность подины.

### Библиографический список

1. Сорлье, М. Катоде в алюминиевом электролизере / М. Сорлье, Х. А. Ойя ; пер. с англ. П. В. Полякова ; Краснояр. гос. ун-т. Красноярск, 1997. 460 с.
2. Архипов, А. Г. Расчет алюминиевых электролизеров при обжиге, пуске и послепусковом периоде / А. Г. Архипов, П. В. Поляков // Алюминий Сибири–2004 : сб. ст. Красноярск, 2004. С. 149–155.
3. Разработка модели пламенного обжига с учетом газодинамики газовой среды и горения топлива / А. Г. Архипов, П. В. Поляков, А. А. Дектерев, К. Ю. Литвинцев // Алюминий Сибири–2005 : сб. ст. Красноярск, 2005. С. 9–14.

A. G. Arkhipov, P. V. Polyakov

### ALUMINUM REDUCTION CELL PREHEAT STUDYING USING MATHEMATICAL MODELING

*Preheat and start-up stage is the one of the most important factors impacts on aluminum reduction cell life. In the whole aluminum industry isn't common opinion about the best way of the cell preheating and start-up yet. This article about two the most popular kinds of cell preheat studying using mathematical modeling for calculation of thermal, electrical fields and stress-strained state with help of finite-element code ANSYS and CFD code Star-CD.*