

нивать достоверность полученных сигналов и работоспособность самой системы.

Библиографические ссылки

1. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978.

2. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенко [и др.]; САА. Красноярск, 2000.

3. Тихоненко Д. В. Автоматическая система слежения за стыком при ЭЛС с рентгеновским датчиком стыка // Вестник НИИ СУВПТ: сб. науч. тр. Красноярск, 2008. Вып. 26. С. 78–84.

4. Тихоненко Д. В., Мурыгин А. В. Анализ достоверности информации по форме сигнала датчика стыка при электронно-лучевой сварке // Вестн. СибГАУ. Вып. 3 (10). 2006. С. 61–64.

5. Тихоненко Д. В. Автоматическое определение ошибки наведения на стык деталей при ЭЛС // Вестник НИИ СУВПТ: сб. науч. тр. Красноярск, 2008. Вып. 26. С. 75–77.

D. V. Tikhonenko, A. V. Murygin

AUTOMATIC SYSTEM OF INDUCTION ON JOINT FOR ELECTRON BEAM WELDING

The article presents mathematical model of combined x-ray data transmitter for electron beam welding (EBW) which affords to correlate data transmitter amplitude, form of signal and the position of electronic ray against the joint. Method of automatic-tracking on a joint, which makes possible to promote aiming exactness, is offered, and functional diagram and algorithm of functioning of the track system behind a joint at EBW is considered in the article.

Keywords: electron beam welding (EBW), track system, x-ray detectors.

© Тихоненко Д. В., Мурыгин А. В., 2010

УДК 004.7

С. П. Саханский, С. М. Баркин

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КРЕМНИЯ

Предложена математическая модель формирования задания температуры на установке выращивания монокристаллов кремния по способу Чохральского, которая позволяет автоматизировать процесс его ввода в микропроцессорную систему управления установкой.

Ключевые слова: модель, температура, выращивание, монокристалл, кремний.

Методы вытягивания кристаллов из расплава по способу Чохральского берут начало от работ таких авторов, как R. Nacem, S. Kyroghulos и J. Czochralski. Основа этих методов состоит в том, что небольшую монокристаллическую затравку вводят неглубоко в расплав и затем ее медленно вытягивают из расплава. При вытягивании температуру расплава сначала повышают, что приводит к образованию шейки, затем температуру расплава снижают до первоначального уровня, в результате чего диаметр затравки возрастает. Этот процесс носит название подрезания затравки. Он позволяет получить гарантированную монокристаллическую затравку. После подрезания затравки для перехода в автоматический режим выращивания кристалла по программе, закладываемой в систему управления, производится вытягивание шейки затравки определенного диаметра и длины с одновременным обеспечением заданной скорости вытягивания, что позволяет стабилизировать тепловые условия перед переходом в автоматический режим работы по программе. Выращивание кристаллов кремния производится

обычно в протоке инертного газа аргона, при этом расплав помещается во вращающийся тигель (с угловой скоростью вращения в пределах 2–10 об/мин), а затравке с кристаллом придается программируемое вращение (с угловой скоростью в пределах 10–90 об/мин). В процессе вытягивания форма прямого конуса кристалла, его цилиндрической части и обратного конуса, а также процесс последующего отжига кристалла (снижения температуры после отрыва кристалла от расплава) программируется системой управления за счет программного изменения скорости вытягивания кристалла и температуры. Во многих системах управления поддерживается постоянный уровень расплава в тигле и имеются подсистемы измерения и управления текущим диаметром кристалла. Интенсивное перемешивание расплава в тигле за счет центробежных сил позволяет отбросить от кристалла возможные возникающие паразитные кристаллические зародыши и исключить радиальные температурные градиенты, способные вызвать неправильный (боковой) рост кристалла. Это благоприятствует поддер-

жанию однородности расплава. При выращивании совершенных кристаллов необходимо избегать тепловых и механических колебаний; при которых нарушается форма кристалла и в нем возникают дефекты. Важно также отметить тот факт, что напряжения, возникающие после вытягивания кристалла из расплава, сводятся к минимуму за счет его последующего медленного охлаждения или так называемого процесса отжига (до 24 ч для кристаллов германия диаметром 270 мм). Процесс вытягивания монокристаллов кремния из расплава по способу Чохральского требует соблюдения целого ряда дополнительных условий, обеспечивающих получение качественного материала заданной геометрии. Кроме чистоты используемого сырья и возможности загрязнения расплава посторонними примесями из тигля и других частей печи, необходимо также создать определенные физические условия, обеспечивающие минимальные дефекты кристаллической решетки в процессе роста кристалла. Изменения скорости вытягивания монокристалла, степени охлаждения и температуры расплава влияют на заданную геометрию выращиваемого кристалла и во многом определяют количество дефектов кристаллической решетки. Особенно сильно влияют колебания температуры расплава (более 0,1 °C) и скорости вытягивания кристаллов [1–3]. Поэтому для выращивания совершенных марок монокристаллов используются автоматизированные системы управления с контролем и управлением текущей площадью кристалла в процессе роста. Микропроцессорная система управления выращиванием монокристаллов кремния представлена на рис. 1. Под управлением системы управления в камере производится выращивание монокристалла диаметром d , со скоростями вытягивания V_3 и вращения кристалла W_3 , при этом расплавленный металл, находящийся в тигле с внутренним диаметром D , вращается с угловой скоростью W_T . Для поддержания постоянного уровня расплава в тигле, кроме скорости подъема тигля вверх V_T , в системе формируется информация о перемещении тигля $X_{\text{итц}}$ с дискретностью Δ_T и информация $X_{\text{изц}}$ о перемещении кристалла вверх (с дискретностью Δ_3). Управление от ЭВМ скоростями вытягивания кристалла V_3 , вращения кристалла W_3 , вращения тигля W_T осуществляется через соответствующие приводы. Управление температурой расплава осуществляется на основе формирования задания температуры T_3 от ЭВМ на регулятор температуры. В качестве датчика обратной связи по температуре используется радиационный пирометр с оптической системой, которая направлена на боковую поверхность графитового нагревателя. Информация о выращиваемом диаметре кристалла поступает с оптической системы на преобразователь, на основе чего в системе формируется текущее положение яркостного ореола мениска кристалла и происходит вычисление сигнала управления, который пропорционален отклонению диаметра выращиваемого кристалла от заданного по программе. Полученный сигнал управления используется для коррекции диаметра выращиваемого кристалла по каналам управления скоростью вытягивания и температурой расплава. Программное задание закона изменения температуры T в микропроцессорных системах выращивания кремния задается технологом за счет ввода в систе-

му управления программы изменения температуры на всех участках выращивания. После выращивания первых образцов заданной марки кристалла, введенный выше программный закон изменения температуры корректируется на основе анализа предыдущих записей. При производстве кристаллов кремния удовлетворительным получается процесс корректировки программного закона изменения температуры после выращивания от четырех до пяти кристаллов заданной марки, что является трудоемким процессом.

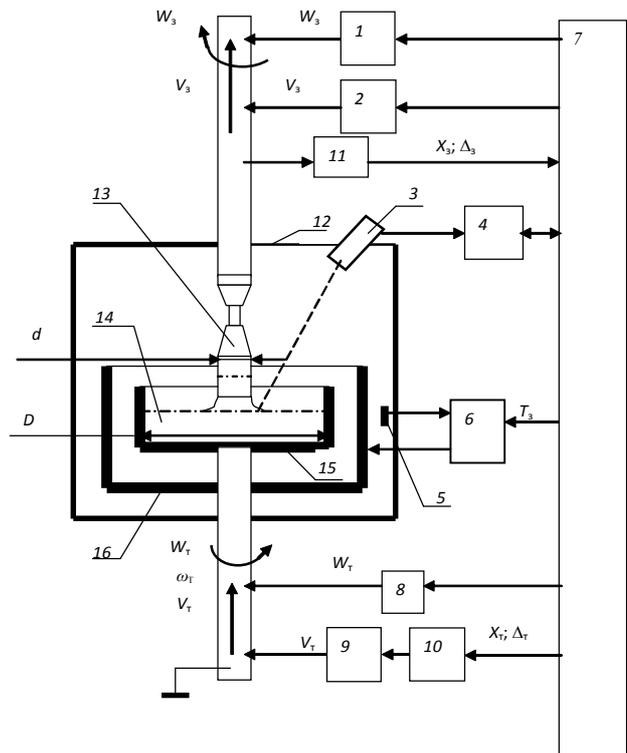


Рис. 1. Система управления выращиванием монокристаллов кремния: 1 – привод вращения затравки; 2 – привод перемещения затравки; 3 – оптическая система; 4 – преобразователь изображения мениска; 5 – датчик температуры; 6 – регулятор температуры; 7 – ЭВМ; 8 – привод вращения тигля; 9 – шаговый двигатель; 10 – блок управления шаговым двигателем; 11 – датчик перемещения затравки; 12 – камера; 13 – слиток; 14 – расплав металла; 15 – тигель; 16 – нагреватель

Приведем математические выражения для формирования программного задания температуры T , которые позволяют автоматизировать данный процесс. Модель управления температурой (рис. 2) при выращивании кремния можно представить в виде выражения

$$T(x) = F(\mathbf{Z}, \mathbf{Y}, V_{\text{зн}}(x), L(x), x),$$

где $T(x)$ – средняя температура расплава в зоне фронта кристаллизации; $V_{\text{зн}}(x)$ – программное задание скорости вытягивания кристалла; x – координата перемещения вдоль оси кристалла; $L(x)$ – линейный осевой градиент в твердом кристалле; \mathbf{Z} – вектор задания геометрии выращиваемого кристалла; \mathbf{Y} – вектор задания теплофизических параметров материала.

Если приравнять вес массы столбика расплава силам поверхностного натяжения, действующим по окружност-

ти, и учесть выражение высоты столбика расплава через уравнение теплового баланса на фронте кристаллизации, то можно получить зависимость диаметра кристалла d от скорости вытягивания V_3 и температуры расплава T в виде следующего выражения [1]:

$$d = C_t \frac{[L - C_V \cdot V_3]}{[T - T_k]}, \quad (1)$$

где $C_V = \rho_{ж} \frac{E}{\lambda_{ТВ}}$; $C_t = 4 \frac{\sigma \cdot \lambda_{ТВ}}{\rho_{ж} \cdot \lambda_{ж} \cdot g}$; V_3 – скорость вытягивания кристалла; T_k – температура кристаллизации материала; T – средняя температура расплава в зоне фронта кристаллизации; L – линейный осевой градиент в твердом кристалле; E – удельная теплота плавления материала; $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности расплава; $\lambda_{ТВ}$ – коэффициент теплопроводности кристалла; g – ускорение свободного падения; σ – поверхностное натяжение расплава; $\rho_{ж}$ – удельная плотность жидкого материала; d – диаметр выращиваемого кристалла.

Для задания средней температуры расплава выражение (1) можно представить в виде

$$T(x) = T_k + C_t \frac{[L - C_V \cdot V_{3п}(x)]}{d_3(x)}, \quad (2)$$

где $d_3(x)$ – программное задание выращиваемого диаметра кристалла; $V_{3п}(x)$ – программное задание скорости вытягивания кристалла; x – координата перемещения кристалла.

Процесс управления основными параметрами выращивания монокристалла кремния приведен на рис. 3. Используя линейную аппроксимацию параметров на узловых участках выращивания кристалла, можно получить выражения для вычисления программы управления температурой на всех участках выращивания.

Выражения по заданию диаметра $d_3(x)$ и температуры $T(x)$ на прямом конусе кристалла примут вид

$$d_3(x) = d_0 + \frac{x \cdot [d_1 - d_0]}{x_1},$$

$$T_{3п}(x) = T_k + C_t \cdot \frac{[L_0 - C_V \cdot V_{3п}(x)]}{\left[d_0 + \frac{x \cdot [d_1 - d_0]}{x_1} \right]},$$

где x_1 – координата завершения формирования прямого конуса кристалла; L_0 – величина осевого градиента в кристалле на конусной части; d_0 – диаметр вытягиваемой шейки кристалла; d_1 – диаметр цилиндрической части кристалла.

Выражения по заданию диаметра $d_3(x)$ кристалла и температуры $T(x)$ на цилиндрической части кристалла примут вид

$$d_3(x) = d_1,$$

$$T(x) = T_k + C_t \frac{\left[L_0 + [x - x_1] \frac{(L_1 - L_0)}{(x_2 - x_1)} - C_V \cdot V_{3п}(x) \right]}{d_1},$$

где x_2 – координата завершения формирования цилиндрической части кристалла; L_1 – осевой градиент в кристалле в конце цилиндрической части.

Выражения по заданию диаметра $d_3(x)$ кристалла и температуры $T(x)$ на обратном конусе примут вид

$$d_3(x) = d_1 - \frac{(x - x_2) \cdot [d_1 - d_0]}{(x_3 - x_2)},$$

$$T_{3п}(x) = T_k + C_t \frac{[L_1 - C_V \cdot V_{3п}(x)]}{\left[d_1 - \frac{(x - x_2) \cdot [d_1 - d_0]}{(x_3 - x_2)} \right]},$$

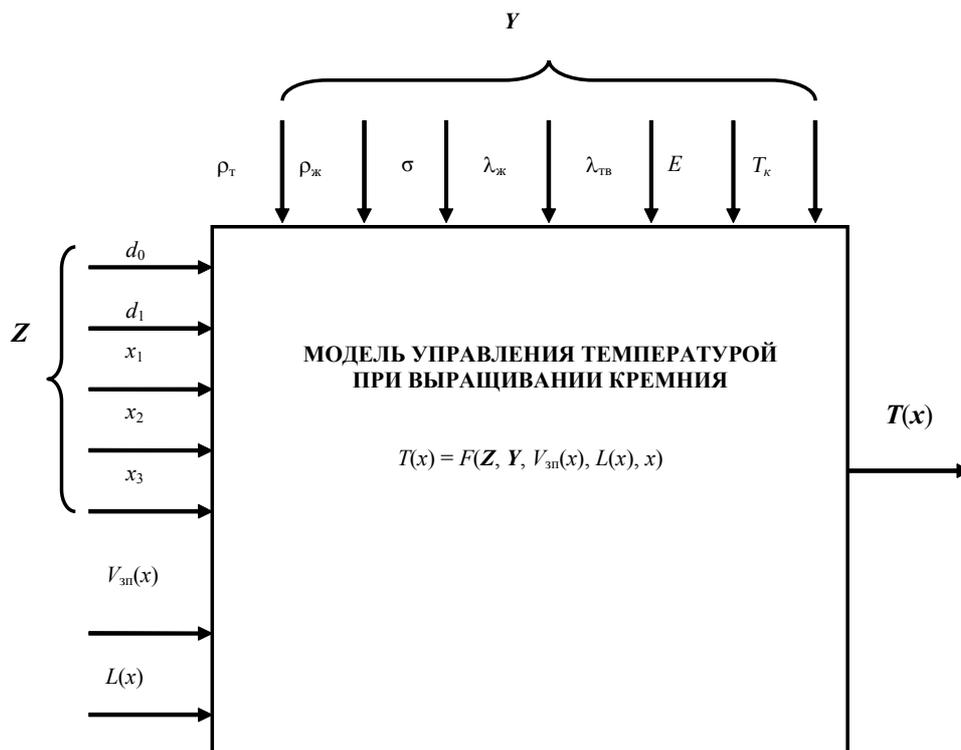


Рис. 2. Модель управления температурой при выращивании кремния

где x_3 – координата завершения формирования обратного конуса кристалла.

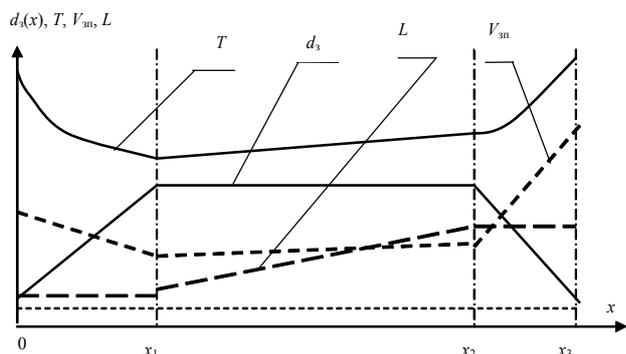


Рис. 3. Задание параметров процесса выращивания кристаллов кремния: d_3 – задание диаметра выращиваемого монокристалла; T – программное задание закона изменения температуры; L – задание осевого градиента; x – перемещение кристалла; x_1 – координата завершения формирования прямого конуса кристалла; x_2 – координата завершения формирования цилиндрической части кристалла; x_3 – координата завершения формирования обратного конуса кристалла; V_{3n} – программное задание закона изменения скорости вытягивания

Моделирование температуры выращиваемых кристаллов кремния разных диаметров с заданием диаметра и скорости вытягивания на всех участках выращиваемого кристалла на основе приведенных зависимостей и тепло-

физических постоянных материала кремния [4] приведено на рис. 4–6.

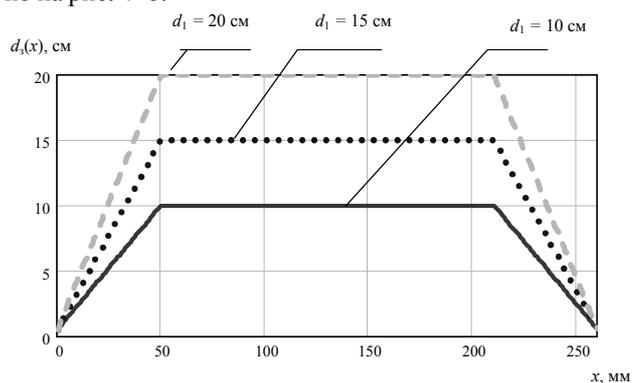


Рис. 4. Задание диаметра кристалла кремния: $x_1 = 50$ мм; $x_2 = 210$ мм; $x_3 = 260$ мм; $d_0 = 0,5$ см

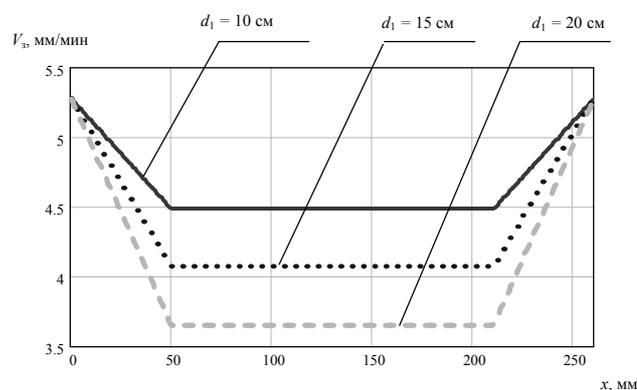


Рис. 5. Задание скорости вытягивания кремния: $d_0 = 0,5$ см; $x_1 = 50$ мм; $x_2 = 210$ мм; $x_3 = 260$ мм

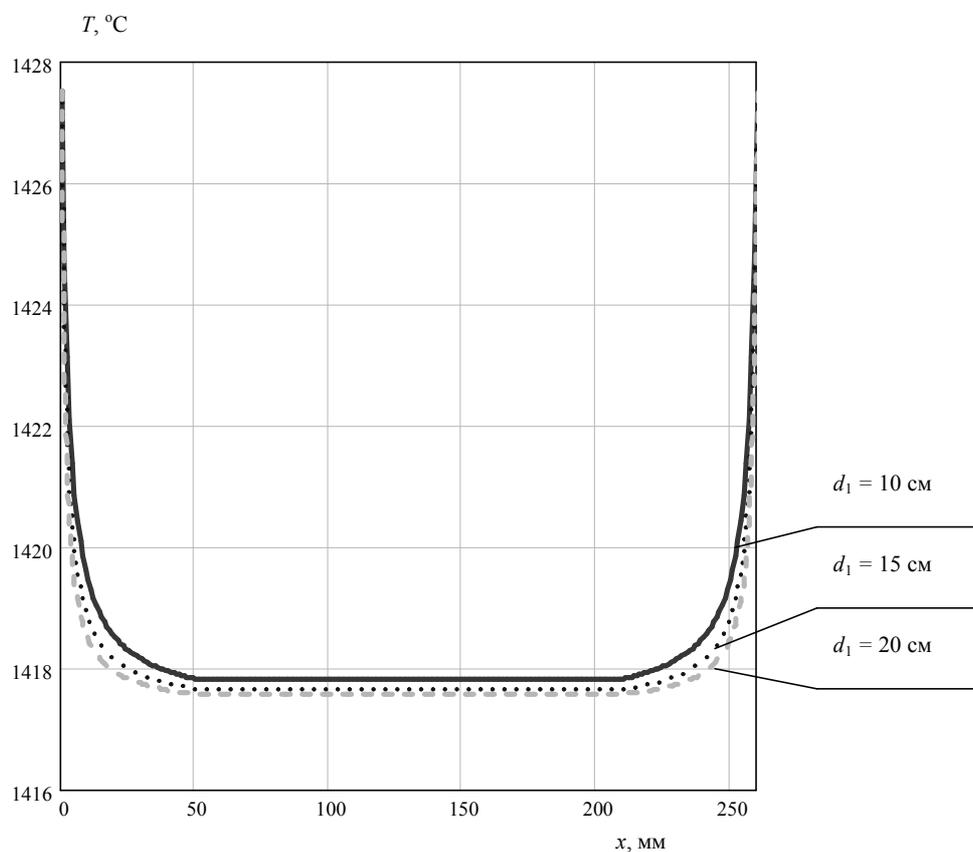


Рис. 6. Задание температуры вытягивания кремния: $d_0 = 0,5$ см; $x_1 = 50$ мм; $x_2 = 210$ мм; $x_3 = 260$ мм

Моделирование программы задания температуры позволяет без процесса предварительного вытягивания монокристалла кремния ввести смоделированное задание температуры в систему управления установкой вытягивания, что значительно сокращает цикл изготовления готовой продукции. Для системы автоматического управления выращиванием кристаллов кремния необходимо учитывать и то обстоятельство, что в системе управления регулирование температуры расплава осуществляется на основе задания и регулирования температуры части боковой поверхности нагревателя с применением оптических пирометров, что можно учесть с помощью измерения и последующего расчета коэффициента связи средней температуры расплава и регулируемой области нагревателя.

Таким образом, предложена математическая модель формирования задания температуры на установке выращивания монокристаллов кремния, которая позволяет при изготовлении готовой продукции смоделировать и автоматизировать процесс ввода программного задания

температуры в систему управления установкой перед процессом выращивания монокристалла, что сокращает цикл получения качественной продукции для каждой новой марки выращиваемых кристаллов.

Библиографические ссылки

1. Разработка прибора прецизионного регулирования температуры с использованием светопровода : отчет Гиредмет по науч.-исслед. теме СКБРМ-1. М., 1962.
2. Саханский С. П. Управление температурой нагревателя на установке выращивания монокристаллов германия // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2008. № 1. С. 42–46.
3. Саханский С. П. Управление процессом выращивания монокристаллов германия: моногр. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008.
4. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. Физические величины : справ. / под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мелихова. М. : Энергоатомиздат, 1991.

S. P. Sakhanski, S. M. Barkin

MODEL OF TEMPERATURE ASSIGNMENT OF SILICON GROWING

Mathematical model of formation of temperature setting for silicon mono crystal growing system by Czochralski method is offered in the article. The model allows to automate the process of its entering to microprocessor control system.

Keywords: model, temperature, growing, mono crystal, silicon.

© Саханский С. П., Баркин С. М., 2010

УДК 669.295

Т. В. Пискажова

СПОСОБ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ АЛЮМИНИЯ

На основе математической модели процесса разработаны алгоритмы управления химическим составом электролита с оптимальным расчетом управляющих воздействий. Алгоритмы вошли в состав АСУТП электролиза, и при внедрении нового способа управления был получен экономический эффект.

Ключевые слова: математическая модель процесса, алгоритмы автоматического управления, стабилизация состава электролита.

Одной из важных задач при управлении процессом электролитического получения алюминия является разработка алгоритмов автоматической системы управления для стабилизации технологических параметров возле назначенных целей.

Сущность процесса электролиза состоит в следующем. В прямоугольных ваннах (электролизерах), футерованных углеродистыми материалами, находится на подине слой расплавленного алюминия, выше – слой электролита (рис. 1). На стенках ванны образуется настывль из застывшего электролита. Температура процесса около 960 °С. Сверху в ванну опущен угольный анод, частично погру-

женный в электролит. Катодом служит расплавленный алюминий. Электролитическое разложение глинозема, растворенного в электролите, происходит в междуполосном зазоре «анод–металл».

При прохождении тока через токоподводящие элементы и сам электролизер, возникают значительные электромагнитные силы, создающие стационарные магнитогидродинамические (МГД) явления в расплавах внутри ванны, а также нестационарные возмущения поверхности раздела.

Кроме того, при прохождении тока через электролит выделяется большое количество тепла, которое, с одной