

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 настывший электролит. 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

стороны, необходимо для поддержания реакции электролиза. С другой стороны, температуры различных слоев и областей электролизера должны быть постоянны и оптимальны, поэтому обязательно наличие защитного слоя настыва на бортах электролизера.

В связи с наличием настыва и различным химическим составом расплавленного и застывшего электролита в электролизере присутствует взаимосвязь теплового и массового баланса. Поэтому задача управления составом электролита эффективно решается только вместе с решением тепловой задачи.

**Математическая модель процесса.** Математическое описание процесса должно содержать следующие разделы:

- модель магнитогидродинамических явлений в расплавах: деформация поверхности раздела, поля скоростей расплавов;
- тепловую динамическую модель электролизера: расчет температур выделенных областей и поверхностей, расчет плавления настыва, уровня спекания анода, тепловых затрат на реакции, нагрева сырья;
- модели массового и электрического балансов: поступление и расход сырья, производство металла, расчет падения напряжения в электролите, прогноз анодных эффектов.

Модель для управления состоит из обыкновенных дифференциальных уравнений и зависимостей, полученных из предварительных расчетов пространственными моделями; это модель для принятия решений в реальном времени.

Программа, содержащая динамическую модель, для расчета получает начальные значения технологических переменных (состав и температура электролита, уровни расплавов, значения силы тока и напряжение на электролизере и т. п.) и по заданному типу электролизера использует параметры конструкции электролизера (размеры шахты и анода, толщины и теплофизические свойства

футеровки, характеристики магнитного поля). Осуществляется расчет начального состояния, затем при воздействиях рассчитываются динамические изменения параметров. Выходными данными могут быть все рассчитываемые моделью переменные – температуры областей и поверхностей электролизера, химический состав электролита, толщина настыва, высота спеченного анода, запас МГД-стабильности и т. п.

На основе модели процесса были разработаны два программных комплекса для управления электролизом алюминия: программа «Стабилизация состава электролита на базе математической модели» [1] и учебно-консультационная программа «Виртуальный электролизер» [2]. В статье представлены алгоритмы первой программы для управления химическим составом электролита.

Поскольку для эффективного управления составом электролита необходимо рассчитывать взаимосвязанные изменения теплового и массового баланса электролизера, остановимся на методике тепловых расчетов и определении изменения толщины бортовой настыва.

Тепловая динамическая модель основана на схематизации электролизера по характерным областям и использовании нуль-мерных моделей. Дифференциальные уравнения для расчета динамики средних температур металла, электролита, подовых блоков, слоев анода приводятся в работе [3]. В работе [4] выписаны уравнения для расчета температур бортовой футеровки и слоя настыва и с использованием условия фазового перехода получена формула для динамического расчета толщины настыва, связывающая тепловой и массовый баланс электролизера:

$$\delta_n^{n+1} = 0,5 \left( \delta_n^n - \frac{\Delta t \cdot \alpha_{э-н}}{\rho_n L_n} (\hat{T}_3 - T_{лик}^э) \right) + \sqrt{0,25 \left( \delta_n^n - \frac{\Delta t \cdot \alpha_{э-н}}{\rho_n L_n} (\hat{T}_3 - T_{лик}^э) \right)^2 + \frac{2\lambda_n \Delta t}{\rho_n L_n} (T_{лик}^э - \hat{T}_n)}, \quad (1)$$

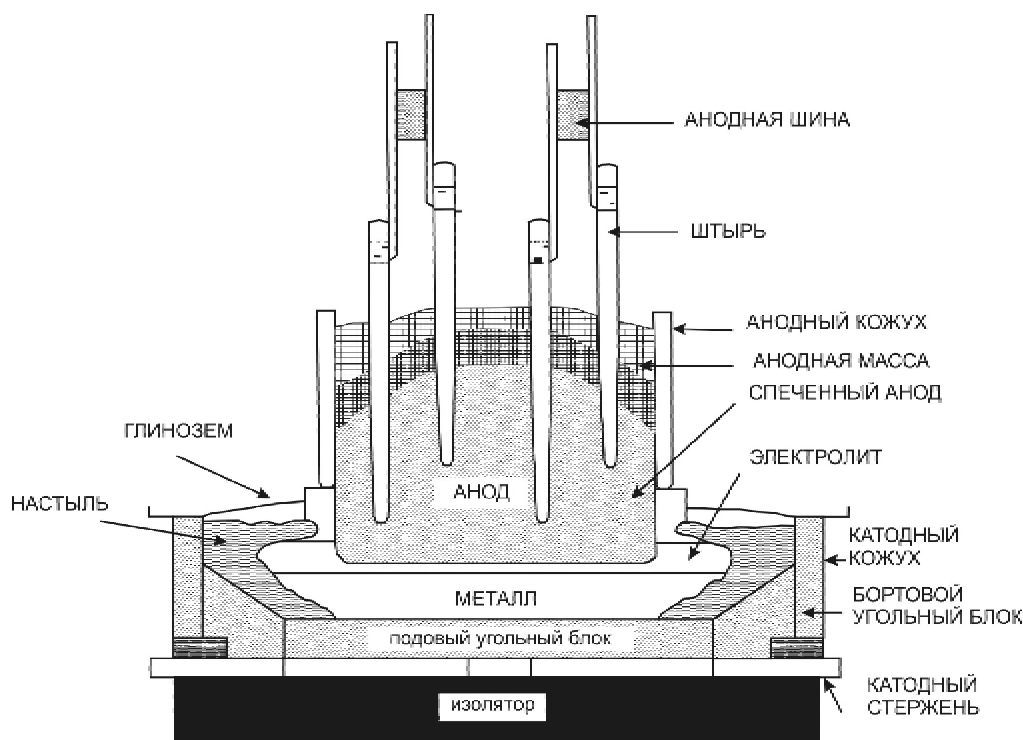


Рис. 1. Поперечный разрез алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом

где  $\rho_n, L_n, \lambda_n$  – плотность, удельная теплота плавления, теплопроводность настъли;  $\delta_n$  – толщина настъли;  $\hat{T}_n$  – средняя температура слоя настъли. По формуле (1) определяется как новая толщина настъли на каждом временном шаге  $\Delta t$ , так и масса расплавившейся или застывшей настъли за время  $\Delta t$ . Как уже отмечалось выше, изменение массы настъли меняет химический состав всего расплава. Также при добавлении различных видов сырья в расплав меняется температура кристаллизации расплава  $T_{лик}^{\ominus}$ , что изменяет тепловой поток из расплава и по уравнениям, приводимым в работе [3], изменяет температуры областей электролизера.

Начальное стационарное распределение температур находится совместным решением систем теплообмена с нулевой правой частью во всех областях. Совокупность систем дифференциальных уравнений для расчета средних температур и теплообмена в выделенных областях, а также уравнения массового баланса решаются численно, методом Эйлера.

**Управление химическим составом электролита.** Программа «Стабилизация состава электролита на базе математической модели» [1] является предметом ежедневного промышленного использования и рассчитывает для каждого электролизера добавки сырья  $AlF_3$  для корректировки криолитового отношения (КО) электролита – важнейшего параметра химического состава, имеющего непосредственное влияние на эффективность работы электролизера.

Криолитовое отношение равно отношению числа молей  $NaF/AlF_3$  в расплаве. Анализы КО выполняются 1–2 раза в неделю для каждого электролизера. Впервые в

практике автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) электролиза в программе использовался встроенный динамический имитатор для расчета прогноза КО между анализами и оптимального выбора суточной дозы сырья  $AlF_3$ .

Необходимость расчета прогноза КО обусловлена следующим:

- зависимостью изменений КО от теплового баланса ванны;
- инерционностью КО;
- зависимостью потерь  $AlF_3$  от параметров электролиза и свойств сырья.

Например, если повышать напряжение электролизера, то повысится температура электролита и, как следствие, расплавится настъль, КО повысится, так как криолитовый модуль настъли выше, чем электролита, и мы должны отреагировать на это увеличением подачи  $AlF_3$ . Последствия увеличенной подачи  $AlF_3$ , изменений напряжения сказываются полностью через 3–5 дней. Необходимость использования динамической модели процесса для управления составом электролита впервые была обоснована в работе [5]. Разумеется, существуют способы управления составом только по результатам анализов химического состава, по стационарным измерениям массового баланса, например, способ, приведенный в работе [6]. Но эти способы требуют настроечных коэффициентов по каждому электролизеру для учета отмеченных выше факторов.

Рассмотрим работу алгоритмов программы (рис. 2). После запроса необходимых данных (блок 1) программа рассчитывает прогноз значений КО и других параметров электролизера на текущий момент (блок 2). Затем по этим

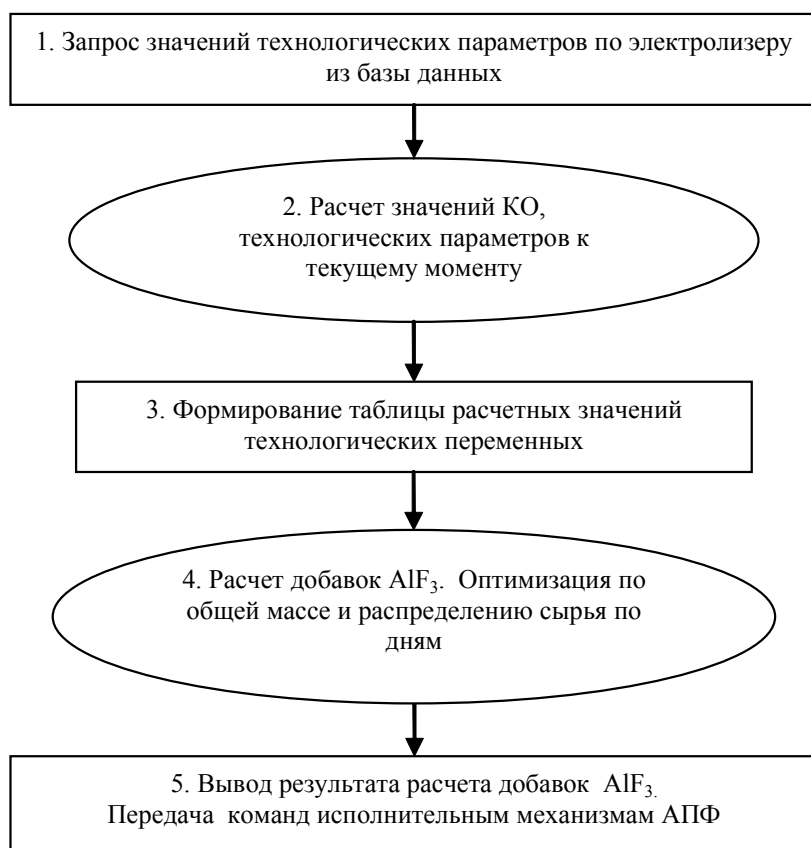


Рис. 2. Схема работы программы «Стабилизация состава электролита на базе математической модели»

спрогнозированным параметрам программа осуществляет расчет добавок сырья  $AlF_3$  на три последующих дня с использованием процедуры оптимизации (блок 4). Эти рассчитанные добавки передаются на исполнительные механизмы системы автоматической подачи фторсолей (АПФ) (блок 5).

Программа должна ликвидировать разницу между прогнозом КО на сегодняшний день и целевым значением КО. Для этого в блоке 4 используется оптимизационная процедура выбора общей массы добавки сырья  $M$  и распределения этого сырья по дням  $m_1, m_2, m_3$ :  $M = m_1 + m_2 + m_3$ . От разных способов добавки сырья меняется прогнозируемый тренд  $КО_{i\text{факт}}$  в целевой функции  $dFun$ :

$$dFun = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (КО_{\text{цель}} - КО_{i\text{факт}}(m_1, m_2, m_3))^2}{N}} \rightarrow \min \quad (2)$$

где  $N$  – общее число расчетных шагов.

Для оптимизации используется метод градиентного спуска (рис. 3). Градиент определяется в пространстве

двух переменных – общей массы сырья  $M$  на три дня и распределения массы по дням.

Начальная масса сырья определяется из стехиометрической разности между целевым КО и прогнозируемым на текущий момент, начальное распределение сырья – поровну на дни оптимизации. Это средняя точка креста оптимизации. Затем при равномерном распределении массы по дням общая масса сырья увеличивается (левая точка креста) и уменьшается (правая точка креста). Верхняя и нижняя точки получаются увеличением или уменьшением добавки сырья в первый день с сохранением общей первоначальной массы. На построенном пятиточечном кресте определяется градиент целевой функции.

Далее осуществляется одномерный спуск в направлении антиградиента до достижения заданной точности  $\xi$  либо до прекращения уменьшения целевой функции. В последнем случае снова находится градиент в точке, куда мы спустились, и снова осуществляется спуск.

На выходе из процедуры оптимизации, при переходе к блоку 5 (см. рис. 2), имеем график суточных добавок

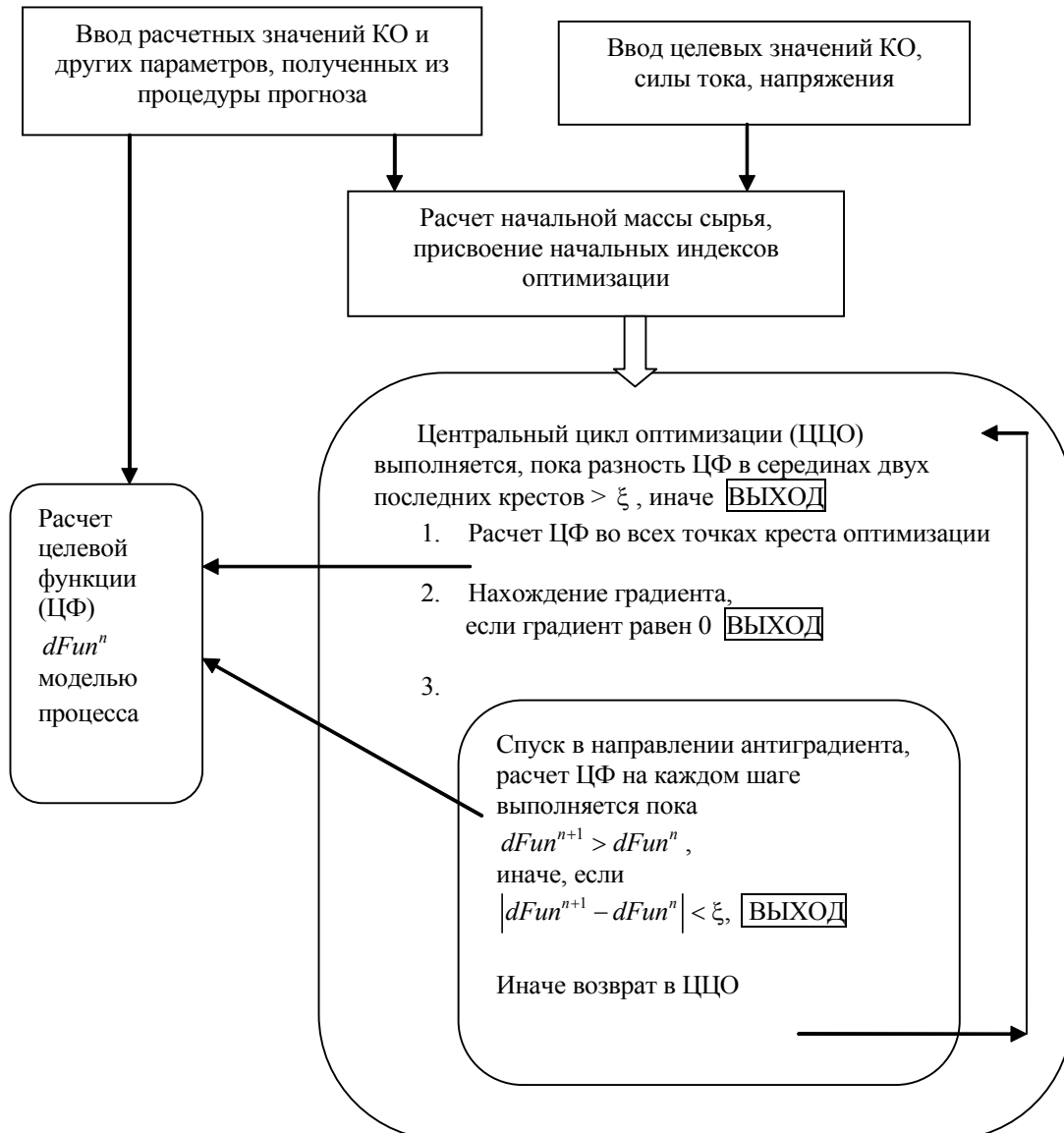


Рис. 3. Схема работы процедуры оптимизации

сырья, значения технологических параметров, рассчитанные при последнем шаге оптимизации.

Результаты расчетов выводятся либо в виде специальной таблицы для технологов корпусов, не оборудованных системой автоматической подачи фторсолей (рис. 4), либо передаются сразу в виде команд АСУТП на исполнительные механизмы АПФ.

Интерфейс программы с выполненным расчетом сырья приведен на рис. 4. Например, на электролизер № 350 рассчитано по 18 кг добавки  $AlF_3$  на каждый день, что близко к нормативному расходу (последний столбец), а на № 353 добавки в первый и второй день – 43 и 27 кг – значительно превышают нормативный расход. Это связано с отличием полученного значения КО от цели. В столбце «Прог. КО» указывается расчет прогноза КО на текущий момент, в столбце «Тек. КО» – результат последнего измерения КО, в столбце «Цел. КО» – целевое значение параметра по каждому электролизеру.

Программа на всех заводах внедрялась на опытных группах или корпусах, результаты которых сравнивались с корпусами-«свидетелями». Так, на Красноярском алюминиевом заводе программа в течение года работала на половине корпусов, на второй половине корпусов завода управление КО осуществлялось технологами.

Кроме улучшения качества управления, снижения количества отклонений по КО, было также получено снижение удельного расхода сырья  $AlF_3$  не менее 3 %. При испытаниях на Новокузнецком алюминиевом заводе была достигнута экономия сырья до 8 %. Экономия сырья обеспечил именно оптимальный расчет добавок. За счет этого снизилось время нахождения электролизера в состоянии технологического нарушения, и уменьшились потери фторида алюминия. Подробнее о внедрении и эксплуатации

программы на этих заводах рассказано в работах [7; 8]. На Хакасском алюминиевом заводе (ХАЗ) программа работает с момента пуска завода. Этот завод оборудован системой автоматической подачи фторсолей, что позволило полностью автоматизировать управление КО. Стандартное отклонение КО на ХАЗе не превышает 0,06 единиц, что является очень хорошим показателем качества управления.

Таким образом, благодаря использованию встроенной математической модели программа смогла заменить технолога по составлению ежесуточного задания на каждый электролизер по добавке фторида алюминия – это было основной задачей разработки алгоритмов. Но программа принесла еще экономический эффект:

1. Улучшение качества управления – снижение среднеквадратичного отклонения криолитового отношения от целевого значения не менее чем на 0,03 единицы.

2. Снижение удельного расхода  $AlF_3$  в среднем на 1 кг на тонну алюминия. На некоторых опытных корпусах экономия доходила до 3 кг на тонну алюминия. Это составляет от 3 до 8 % удельного расхода сырья.

Программа внедрена на Красноярском, Новокузнецком, Хакасском алюминиевых заводах и функционирует в составе АСУТП. В режиме промышленной эксплуатации программы обеспечивается выполнение технологических требований к стабильности параметра КО. Расход сырья  $AlF_3$  на всех отмеченных производствах удовлетворяет техническим нормам.

### Библиографические ссылки

1. Стабилизация состава электролита на базе математической модели : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Манн В. Х., Юрков В. В.,

№ эл-ра	Тек. КО	Цел. КО	Прог КО	Темп. электролизера (°C)	Эск. расход $AlF_3$ (кг/т)	АПФ $AlF_3$ 23 Оч	АПФ $AlF_3$ 23 П	АПФ $AlF_3$ 24 П	Норматив расхода
Итого	2.46	2.47	2.46	950.7	30.57	491.6	479.6	467.0	474
350	2.5	2.33	2.488	966	14.39	18	18	17.6	21.1
351	2.46	2.4	2.4	962	35.14	16.3	16.7	17.2	24.6
352	2.45	2.37	2.396	966	23.21	16.3	16.7	17.2	22.9
353	2.66	2.51	2.616	966	2.53	43.1	27.3	11.9	11.9
354	2.4	2.4	2.4	966	45.21	25.5	25.5	25.5	26
355	2.4	2.4	2.4	966	45.84	18.9	18.5	18.5	23.8
356	2.4	2.4	2.4	966	45.84	0	0	0	0
357	2.4	2.4	2.4	966	45.84	23.8	23.8	23.3	25.1
358	2.4	2.41	2.405	966	35.79	16.3	16.3	17.2	22.9
359	2.4	2.44	2.46	966	34.90	30.0	30.4	30.4	22.9
360	2.4	2.4	2.4	966	45.84	20.5	20.5	20.5	20.5

Рис. 4. Примеры расчетов программой стабилизации состава электролита

Пискажова Т. В., Требух О. А., Никандров К. Ф.; РОСПАТЕНТ. №2003612185; 23.09.2003.

2. Учебно-консультационная программа «Виртуальный электролизер»: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Никандров К. Ф., Пискажова Т. В., Синельников В. В., Манн В. Х.; РОСПАТЕНТ. №2003610551; 28.02.2003.

3. Белолипецкий В. М., Пискажова Т. В., Емельяшин М. В. Тепловая динамическая модель для управления технологией электролиза алюминия // Вестн. СибГАУ. Вып. 5 (12). 2006. С. 19–24.

4. Белолипецкий В. М., Пискажова Т. В. Тепловая динамическая модель для автоматического управления тех-

нологией производства алюминия // Вестн. КазНУ. Т. 13. Вычислительные технологии. 2008. №3(58). С. 267–274.

5. Манн В. Х., Юрков В. В., Пискажова Т. В. Исследование зависимости между криолитовым отношением и температурой электролита в алюминиевом электролизере // Цветные металлы. 2000. № 4. С. 95–101.

6. Entner Peter M. Control of  $AlF_3$  Concentration // Light Metals. 1992. P. 369–374.

7. Piskazhova T. V., Mann V. C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model // JOM. Vol. 58, № 2. 2006. P. 48–52.

8. Виртуальный электролизер и его практическое применение на ОАО «КрАЗ» / Т. В. Пискажова [и др.] // Алюминий Сибири : сб. ст. Красноярск, 2002. С. 60–65

T. V. Piskazhova

## METHOD OF OPTIMUM CONTROL OF ELECTROLYTE CHEMICAL COMPOSITION AT ALUMINUM PRODUCTION

*Algorithms for electrolyte chemical composition control with optimum calculation of operating influences were developed on the basis of mathematical model of process. These algorithms were entered to automatic Control System, and this new way of control resulted in economic benefit.*

*Keywords: mathematical model of process, algorithms for automatic control, electrolyte composition stabilization.*

© Пискажова Т. В., 2010

УДК 620.17

G. G. Krushenko

## TESTING OF ALUMINUM-SILICON ALLOYS MECHANICAL PROPERTIES ON SEPARATELY CASTED SPECIMENS

*The mechanical properties of aluminum alloys before casting into moulds were determined on separately casted control specimens casted in horizontal or vertical forms. A comparison of the mechanical properties (tensile strength  $\sigma_t$ , elongation  $\delta$ , hardness HB) of 12-mm-diameter individually casted of AK7ch alloy control specimens and its density in the solid state ( $\rho$ ) showed that it is necessary to use specimens casted in a horizontal mold for evaluation of castings quality.*

*It was estimated that position of separately casted test samples in the foundry metal form influences the indicators of mechanical properties of aluminium-silicon alloys.*

*Keywords: aluminum-silicon alloys, tested specimens, mechanical properties.*

In chill mold casting of aluminum alloy parts individually cast test specimens with a diameter of 12 mm are poured in some plants in a horizontal chill mold and in others in a vertical one (see the figure).

In order to establish the influence of the position of test specimens in the chill mold on mechanical properties tests were made on one of the common aluminum casting alloys, AK7ch (RF Aluminium casting alloys GOST 1583–93: 6,0–8,0 % Si; 0,2–0,4 % Mg; Al – remainder), a typical representative of Al-Si system alloys. After tests of the 12-mm-diameter specimens cast in horizontal and vertical chill mold from their heads there were machined specimens with a gage length diameter of 6 mm, which were also tested to

fracture. Before the test their density was found by the method of hydrostatic weighing [1].

According to the results obtained the tensile strength  $\sigma_t$  of the separately cast vertical specimens is 238 MPa and of the horizontal 225 MPa while, on the other hand, the elongation  $\delta$  is higher for the horizontal specimens, 6,19 % vs 3,3 %. Such differences in absolute values of the mechanical properties are related to the fact that the specimens were cast in different plants in which the alloys were produced from different charges and by different methods.

A study of the geometry of gating and feeding systems of both types of chill mold showed that they differ