УДК 681.3

В.С. СУЗДАЛЬ, канд. техн. наук***,*** ИСМА (г. Харьков),
Л.В. ДЕРБУНОВИЧ д-р техн. наук***,*** проф. каф. АУТС НТУ "ХПИ",
Л.И. ГЕРАСИМЧУК, канд. техн. наук***, Ю.М. ЕПИФАНОВ,*** канд. техн. наук, ИСМА, ***А.А. ТРИПОЛЬСКИЙ,*** СП "АМКРИС" (г. Харьков)

АЛГОРИТМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫРАЩИВАНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ

У статті розглянуті результати розробки алгоритмів для системи управління технологічними процесами у виробництві великогабаритних сцинтиляційних монокристалів. Алгоритми призначені для різних стадій росту кристала і дозволяють підвищити ефективність процесу управління.

In this paper we present results of developing technology control algorithms, which are used in production of the large size scintillating single crystals. The algorithms are applied at different stages of the crystal growth thereby increasing effectiveness of process control.

Постановка проблемы. В мировой практике сцинтилляционные монокристаллы (МК) больших размеров получают методом Чохральского, корректируя тепловые условия роста МК по результатам контроля уровня расплава [1]. Процесс получения МК состоит из трех стадий: подготовительной (подготовки сырья, расплава, аппаратуры ростовых установок), собственно, выращивания МК и заключительной (выгрузки из ростовой печи, охлаждения, транспортировки, обработки и раскроя кристалла на заготовки требуемой номенклатуры).

Стадия выращивания МК включает в себя операции инициирования его роста с помощью затравочного кристалла (ЗК) и вытягивания образца сначала с переменным сечением (разращивание МК), а затем с постоянным сечением (рост цилиндрической части МК). Наиболее ответственным этапом рассматриваемой стадии является рост образца с постоянным диаметром поперечного сечения, поскольку геометрические и физико-химические параметры цилиндрической части МК определяют степень пригодности для потребителей этого вида продукции. Однако значительная часть дефектов и структурных несовершенств зависит от результатов предшествующих этапов роста кристалла.

Высокая стоимость единицы продукции, большой вес МК увеличивают степень риска от производственных потерь (в числе других причин, из-за формирования физически плохо обусловленных управляющих воздействий) и определяют высокие требования к повышению эффективности применяемых алгоритмов управления.

Анализ литературы. Характерные особенности ТП выращивания МК больших размеров методом Чохральского из расплава, которые находят

отражение в требованиях, предъявляемых к алгоритмам управления, рассмотрены в [2]. В [3 – 5] определены основные подходы к разработке алгоритма этапа инициации роста МК, а в [6 – 7] – этапа роста МК с переменным диаметром. В [8] рассмотрен процесс развития системы управления (СУ) выращивания МК из расплава методом Чохральского в Институте сцинтилляционных материалов (ИСМА) НАН Украины и проанализированы его результаты. Постановка и решение задачи регулирования параметров ТП выращивания МК, в частности, температуры, осуществлены в [9].

Цель работы. В настоящей статье обобщены результаты алгоритмизации основных этапов выращивания крупногабаритных МК в производстве сцинтилляторов и рассмотрены алгоритмы регулирования и восстановления параметров ТП в разработанных ранее [9] устройствах серии РПМ.

Обобщенный алгоритм управления ТП. Успешное решение задачи разработки эффективных алгоритмов управления существенно зависит от степени учета особенностей технологического процесса (ТП) получения МК, как объекта управления [2]. Это связано с тем, что с возрастанием размеров МК, и, соответственно, ростовой камеры ухудшаются такие показатели, как управляемость процесса и воспроизводимость его результатов. Необходимая при росте МК больших размеров подпитка расплава исходным сырьем увеличивает нестабильность гидродинамических режимов в расплаве при вытягивании и вращении образца. Характеристики тепловых полей в системе кристалл – расплав становятся существенно неоднородными и нестабильными.

Эти особенности находят отражение при разработке специального математического обеспечения для объектного уровня СУ с присущими ему задачами первичной обработки информации, расчета и формирования управляющих воздействий, обмена информацией с верхним уровнем СУ и представления необходимой информации техническому персоналу [1].

Рассмотрим процесс управления в СУ выращиванием МК в наиболее общем виде (алгоритм управления приведен на рисунке). Управление осуществляется циклически, начиная с измерения в i-м рабочем цикле значений выходных сигналов от объекта управления: Y_{1i}, ..., Y_{ki}, и вычисления ошибок управления S_{1i}, ..., S_{Mi}.

В соответствии с величинами ошибок S_{1i}, ..., S_{Mi} формируют управляющие воздействия на выходные параметры ТП: U_{1i},, ...,U_{mi}. По окончании рабочего цикла массу расплава дополняют до прежнего уровня с помощью его подпитки исходным сырьем. Задают значения индекса χ стадии выращивания МК: $\chi = 1$ – рост МК, $\chi = 0$ – подпитка расплава, и в зависимости от значения χ по-разному формируют управляющие воздействия на устройства подачи дополнительного сырья.

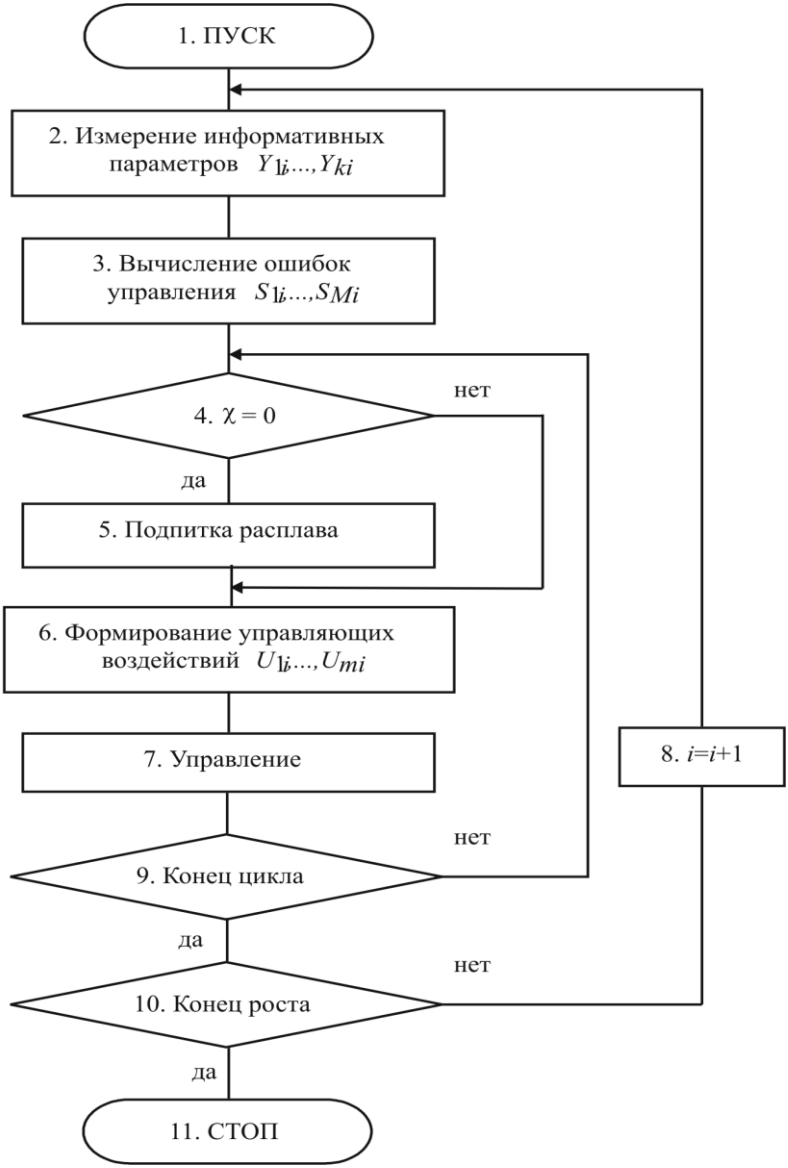

Рис. Обобщенный алгоритм управления ТП выращивания МК

Алгоритмы управления ТП на стадии выращивания МК. Из трех этапов стадии выращивания МК первый – инициирование роста образца –

является человеко-машинным, поскольку его успешная реализация требует участия квалифицированного технического персонала

Этап инициирования роста образца с помощью ЗК в значительной степени определяет качество выращенного кристалла. Практически на всех промышленных установках, предназначенных для получения МК, все операции этого этапа не автоматизированы, что приводит к большим затратам времени и усилий технического персонала.

Алгоритм инициирования роста МК (ручные операции) состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Снижение температуры расплава со скоростью меньше или равной 1÷2 град/час.

Шаг 2. Погружение ЗК в расплав и уменьшение (синхронно с выполнением шага 1) скорости погружения.

Шаг 3. Оценивание состояния системы "ЗК – расплав". По достижении положения динамического равновесия переход к шагу 4, иначе – к шагу 1.

Шаг 4. Конец этапа. Переход к алгоритму управления ростом МК с переменным диаметром.

Очевидно, что начальные операции, реализуемые на шаге 1 и шаге 2, целесообразно оставить в ручном исполнении, а операции оценивания состояния системы "ЗК – расплав" и дальнейшего принятия решения о переходе к следующей стадии роста МК следует автоматизировать.

Задача автоматизации этапа инициирования роста МК решена с использованием зависимости активного сопротивления расплава R_0 от температуры. Для решения этой задачи определены численные значения целого ряда характеристик расплава различных кристаллизуемых веществ (экспериментально полученные значения некоторых из этих характеристик приведены в таблице).

Исследования температурной зависимости активного сопротивления расплава проведены с помощью специально разработанной аппаратуры [3, 4]. Анализ полученных результатов послужил основой разработки автоматизированного способа определения момента начала кристаллизации при выращивании МК [5]. Этот способ состоит в следующем. Расплав, температура которого превышает температуру плавления, охлаждают с заданной скоростью, одновременно измеряя его температуру и полное электросопротивление (Z_i), определяют резонансную частоту (в диапазоне 0,5÷50 кГц), реактивную и активную составляющие Z_i, а о начале кристаллизации судят по изменению величины активной составляющей Z_i в 10÷100 раз. Перед запуском СУ устанавливают исходные данные этапа инициирования роста МК. Последовательно выполняют ручные операции приведенного выше алгоритма, задают начальные значения скорости снижения температуры расплава и опускания ЗК и переходят к алгоритму автоматизированного инициирования роста МК.

Таблица

Результаты исследования свойств расплавов

Свойства расплавов	Тип расплава	
	KCl	NaCl
Температура, T, $^{\circ}$C	850	900
Резонансная частота, $f_р$, Гц	3000	2000
Приэлектродная емкость, $C_{пр}$, мкф	620	1400
Активное сопротивление, R_0, Ом	0,17	0,18
Шунтирующее сопротивление, $R_ш$, Ом	2,35	1,10
Методическая ошибка, Δ, %	1,8	1,6

Алгоритм автоматизированного инициирования роста МК:

Шаг 1. Снижение температуры расплава на заданную величину.

Шаг 2. Выдержка расплава при заданной температуре.

Шаг 3. Измерение температуры T_i расплава.

Шаг 4. Измерение активной составляющей R_i электросопротивления расплава.

Шаг 5. Вычисление разности текущего и предшествующего значений температуры $\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$.

Шаг 6. Вычисление разности текущего и предшествующего значений активной составляющей электросопротивления расплава $\Delta R_i = R_i - R_{i-1}$.

Шаг 7. Определение температурного коэффициента изменения электросопротивления расплава $M_i = \Delta R_i / \Delta T_i$.

Шаг 8. Сравнение M_i и M_{i-1}.

Шаг 9. Если $M_i \leq 10 \cdot M_{i-1}$, перейти к шагу 1.

Шаг 10. Конец этапа. Перейти к алгоритму управления ростом МК с переменным диаметром.

Изменения ΔT_i и ΔR_i между (i–1)-м и i-м циклами программы позволяют определять в каждом цикле управления значение температурного коэффициента M_i (шаг 7) и сравнивать его с величиной $M_{(i-1)}$ (шаг 8). Функционирование алгоритма завершают по достижении динамического равновесия температур ЗК и расплава, после чего переходят к алгоритму управления этапом роста кристалла с переменным диаметром, который заключается в программном снижении температуры расплава по результатам сравнения фактического значения информативного параметра со значением, рассчитанным по математической модели.

Целью моделирования изменения информативного параметра на этапе роста МК с переменным диаметром является определение условий плавного перехода от ЗК к цилиндрической части кристалла без скачкообразных изменений массовой скорости кристаллизации. Для процесса Чохральского без подпитки расплава вопрос о разращивании МК по диаметру в СУ с датчиком уровня расплава теоретически решен в [6], где показано, что наиболее простой функцией, описывающей опускание уровня h расплава и обеспечивающей условия непрерывности на границе "кристалл-расплав" при постоянной скорости вытягивания, является полином: $\Delta h = bt + ct^2 - dt^3$, где $t \leq t_r$, а коэффициенты b, c, d определяются из заданных условий в начальный момент времени и через промежуток времени t_r.

Для полунепрерывного метода получения МК из расплава [1] на всем протяжении процесса выращивания скорость вытягивания v_b, равная аксиальной скорости роста образца, поддерживается постоянной, а постепенное увеличение диаметра МК осуществляют только за счет программирования массовой скорости подпитки расплава v_n. Наиболее экономичной является такая программа $v_n(t)$, которая обеспечивает коническую форму разращиваемой от ЗК части кристалла (и, следовательно, постоянную радиальную скорость роста МК): $v_n(t) = v_{n0}+(v_{nк} - v_{n0})t/t_r$, где $v_{nк}$, v_{n0} – конечное и начальное значения скорости подпитки расплава, t_r – время разращивания. Форма разращиваемой части МК соответствует параболоиду вращения с диаметром сечения: $D_s = 2[v_{n0}/(\pi\rho_s v_b)+L(v_{nк} - v_{n0})/(\pi\rho_s v_b^2 t_r)]^{1/2}$, где длина МК: $L = tv_s$, (v_s – скорость роста МК), ρ_s – плотность твердой фазы.

Диаметр МК плавно увеличивают также путем программирования скорости вытягивания или скорости изменения высоты столба расплава в тигле, однако, как показано в [6], расчет диаметра образца при неплоской границе "кристалл – расплав", характерной для выращивания МК больших размеров, следует осуществлять, учитывая изменение объема W, находящегося ниже плоскости расплава. Пренебрегая тепловым расширением расплава, для МК с выпуклой границей твердой и жидкой фаз, находящейся ниже свободной поверхности расплава, из условия сохранения массы вещества в процессе кристаллизации следует: $[\rho_s\pi D_s^2 v_b - \mu]+\pi[|\rho_l D_l^2 - \rho_s D_s^2|]v_l = -4(\rho_s - \rho_l)dW/dt$, где D_l – диаметр тигля с расплавом, ρ_l – плотность жидкой фазы, v_b, v_l – скорость вытягивания и скорость изменения уровня расплава, μ – массовая скорость подпитки расплава исходным сырьем. Зависимость текущего значения диаметра МК от времени в этом случае можно получить (при условиях $v_l = 0$, $v_b = \text{const}$ и $\mu = \pi\rho s D_G^2 v_b/4$, где D_G – конечный радиус образца), задавая форму подрасплавной части МК. Например, в случае шарового сегмента с высотой $h = \text{const}$ модель разращивания МК от начального значения диаметра D_0 [7]: $D = D_0+t\,(D_G^2 - D_0^2)/[(\rho_s - \rho_l)h^2/v_b]$.

Несмотря на большое количество самых различных подходов к проблеме разращивания МК и существование соответствующих алгоритмов, задача разработки новых, более эффективных алгоритмов не перестает оставаться

актуальной, особенно при увеличении размеров МК. Отсутствие плавного сопряжения профиля разращиваемой части МК с его цилиндрической частью при большой тепловой инерции системы "нагреватель – тигель – расплав – кристалл" приводит к существенному повышению скорости изменения регулирующих воздействий и к ухудшению качества МК из-за резких изменений скорости роста МК. Использование при выращивании больших МК эмпирических приемов, когда плавный переход от D_g к D_G зависит только от искусства технического персонала, приводит к получению МК, далеких от совершенства.

Для устранения этих недостатков разработан адаптивный алгоритм формирования задающего сигнала в СУ с датчиком уровня расплава.

Полагая модель изменения диаметра $D_i(t)$ кристалла на стадии его роста с переменным диаметром в i-м временном интервале линейной:

$$D_i = a+bt_i;\ a = D_g;\ \ b = (D_G - D_g)/t_r,\ i = 1, \ldots, I, \tag{1}$$

найдем приращение (усеченный конус) ΔV_i объема МК за время $\Delta t = t_i - t_{i-1}$:

$$\Delta V_i = (\pi\Delta t v_s/12)(D_i^2+D_{i-1}^2+D_iD_{i-1}). \tag{2}$$

Из (1) и (2) следует: $\Delta V_i = (\pi\Delta t v_s/12)[3a(a+bt_i+bt_{i-1})+b^2(t_i^2+t_{i-1}^2+ t_it_{i-1})]$, и после перехода к единичному временному интервалу ($I = [t_r/\Delta t] = [t_r]$) и отсчета текущих значений диаметра МК от нулевого значения получаем: $\Delta V_i=V_i-V_{(i-1)}= (\pi b^2v_s/12)(t_i^2+t_{i-1}^2+t_it_{i-1}) = (\pi/12)b^2v_s(3t_i^2-3t_i+1)$.

В процессе роста МК приращение его массы $\rho_s\cdot\Delta V_i$ обеспечивают путем управления количеством расплава в тигле по результатам измерения уровня расплава.

С учетом условия сохранения массы вещества в процессе кристаллизации ($\theta = \rho_l/\rho_s;\ \Delta h_i = [h_i - h_{i-1}]$):

$$(\pi/12)b^2v_s(3t_i^2-3t_i+1) = (\pi/4)\theta D_l^2\Delta h_i, \tag{3}$$

а также известного [7] соотношения для скоростей v_s – роста МК, v_l – изменения уровня расплава в тигле, $v_b = c = \text{const}$ – вытягивания МК из расплава: $v_s = v_l+v_b$, и определения $v_{l,i}$ при $\Delta t = 1$: $v_{l,i} \approx \Delta h_i/\Delta t = \Delta h_i$, от модели (1) переходим к программе изменения Δh_i на стадии роста МК с переменным диаметром:

$$\Delta h_i = qb^2(\Delta h_i+c)(3t_i^2-3t_i+1);\ q = 1/(3\theta D_l^2). \tag{4}$$

Преобразуя (4) в $\Delta h_i = c/\{[qb^2(3t_i^2-3t_i+1)]^{-1}-1\}$, и учитывая дискретный характер управления $t_i = i\Delta t = i;\ i = 1, \ldots, I$, получаем практическую модель задающего устройства в цифровой СУ с датчиком уровня расплава:

$$\Delta h_i = c/\{[qb^2(3i^2-3i+1)]^{-1}-1\}. \tag{5}$$

Фактическое значение $\Delta h_i^{ф}$ отличается от заданного значения на величину ошибки ε_i. По измеренной величине $\Delta h_i^{ф}$ из (3) находим

$b_i^{ф} = [1/\{q(1+c/\Delta h_i^{ф})(3i^2-3i+1)\}]^{1/2}$, откуда $D_i^{ф}=b_i^{ф}t$, и можно рассчитать значение b_{i+1} для следующего, $(i+1)$-го шага:

$$b_{i+1}= (D_G - D_i^{ф})/[2(t_r - t_i)] = (D_G - D_i^{ф})/[2(I - i)], \quad (6)$$

а из (5) – новое задание для изменения уровня расплава Δh_{i+1}.

Алгоритм управления стадией роста кристалла с переменным диаметром:

Шаг 1. Ввод параметров D_g, D_G, t_r, D_l.

Шаг 2. Расчет констант $I = [t_r]$, $\theta = \rho_l/\rho_s$, $q = 1/(3\theta D_l^2)$.

Шаг 3. Установка $i = 1$ и начального значения Δh_i.

Шаг 4. Измерение $\Delta h_i^{ф}$. Расчет ошибки управления $\varepsilon_i = \Delta h_i^{ф} - \Delta h_i$.

Шаг 5. Если $i = I$, то конец работы.

Шаг 6. Определение коэффициента b_{i+1} по (6).

Шаг 7. Расчет $(i+1)$-й точки задания Δh_{i+1} по (5).

Шаг 8. Установка $i = i+1$. Переход к шагу 4.

Адаптивные свойства приведенного алгоритма заключаются в том, что параметры модели изменения уровня расплава перестраивают в зависимости от ошибки управления в текущем рабочем интервале. Алгоритм роста МК с постоянным диаметром представляет собой последовательность операций, обеспечивающих поддержание таких условий роста, при которых отклонения диаметра растущего образца от заданного значения минимальны. Алгоритм задающего устройства по сравнению со стадией роста МК с переменным диаметром существенно упрощается, т.к. на этой стадии заданные значения D_i $(i = 1, \ldots, I) = D_G = \text{const}$ и $\Delta h_i = \text{const}$.

Для стадии роста МК с постоянным диаметром разработан и защищен патентами Украины комплекс устройств управления, каждому из которых соответствуют новые алгоритмы управления, используемые в автоматизированных установках типа "РОСТ" при выращивании МК больших размеров и функционально дополняющие друг друга [8].

Алгоритмы регулирования температуры ростовых установок. При выращивании крупногабаритных МК основным ожидаемым результатом применения в канале управления температурой ростовых установок дискретного ПИД-алгоритма: $y_i = k\Delta x_i + (\Delta tk/T_и)\sum\Delta x_i + (T_д/\Delta t)(x_i - x_{i-1})$ является отсутствие скачкообразных изменений тепловых условий ТП (y_i – выходной сигнал регулятора в i-й точке регулирования; Δx_i – ошибка регулирования; k, $T_и$, $T_д$ – параметры регулятора; Δt – период расчета управляющих воздействий).

Это обеспечивается, во-первых, тем, что операции дифференцирования предшествует сглаживание входного параметра, что исключает возможность резких колебаний управляющих сигналов.

Во-вторых, для повышения стабильности тепловых полей в ростовом пространстве соблюдается условие $(\Delta tK/T_и) < 1$, что обеспечивает необходимую устойчивость системы, поскольку в противном случае любые

автономные изменения k и $T_и$ в процессе настройки приводят к увеличению амплитуды изменения выходного сигнала регулятора. Для выполнения этого условия в алгоритме ограничено влияние предшествующих членов суммы, входящей в состав интегральной составляющей, при перестройке коэффициентов на каждом шаге управления. Интегральная составляющая представлена в виде двух слагаемых и дополнительно ограничено влияние изменения коэффициентов на выходной параметр путем добавления ко времени изодрома $T_и$ периода управления Δt [9]: $y = K_n\Delta x+b_n$; $b_n = b_{n-1}+\{\Delta t K_n/(T_и+\Delta t)\}\Delta x_n$.

В-третьих, ограничен интервал изменения коэффициентов регулирования, а перед блоком формирования управляющих воздействий добавлен блок контроля достоверности регулируемого параметра (по абсолютной величине и по скорости его изменения), чтобы избежать необоснованных воздействий регулятора на объект управления и повысить качество регулирования.

С целью повышения надежности регулирования теплового режима кристаллизации решены задачи восстановления параметров управления и ограничения скорости изменения температуры после аварийного отключения напряжения питания. Вследствие большой инерционности тепловых полей установок для выращивания больших образцов, при отключении напряжения питания тепловые условия, достаточные для продолжения процесса кристаллизации, физически сохраняются в достаточно протяженном временном интервале. Этот факт использован для плавного восстановления процесса управления тепловым режимом выращивания после возобновления подачи питающего напряжения. В схему регулятора (ранее разработанной серии РПМ [10]) введены: датчик наличия питающего напряжения и блок аварийного питания, который после отключения напряжения сети поддерживает работу микропроцессора в течение 10 с – времени, достаточного для занесения в энергонезависимую память текущих значений параметров управления [11].

Алгоритм восстановления теплового режима выращивания МК:

Шаг 1. Считывание из запоминающего устройства регулятора последнего значения управляющего сигнала.

Шаг 2. Измерение величины регулируемого сигнала.

Шаг 3. Установка значения, определенного на шаге 1, в качестве заданной величины.

Шаг 4. Установка нулевого значения ошибки управления.

Шаг 5. Установка нулевых значений интегральной и дифференциальной составляющих алгоритма.

Шаг 6. Включение регулятора и продолжение программного изменения температуры объекта управления от нового заданного значения до ранее установленной величины.

Рассмотренные алгоритмы внедрены в производство крупногабаритных сцинтилляционных МК на опытном предприятии ИСМА и, в совокупности с прежде разработанными программно-техническими средствами, обеспечили выращивание МК с нестабильностью диаметра, не превышающей 1%, и с равномерным распределением примеси по объему образца (при ее концентрации в диапазоне 0,041 – 0,056), что гарантировало получение на их основе высококачественных детекторов.

Выводы. Разработаны алгоритмы автоматизированного управления ТП выращиванием крупногабаритных сцинтилляционных МК. На основе полученных результатов разработано программное обеспечение СУ процессами выращивания крупногабаритных МК с квазинепрерывным и непрерывным [1] вытягиванием образца.

Результаты внедрения и опытной эксплуатации свидетельствуют о работоспособности и эффективности разработанных алгоритмов и о целесообразности их использования при дальнейшем проектировании СУ модернизированными и новыми ростовыми установками.

Список литературы: **1.** *Горилецкий В.И., Гринев Б.В., Заславский Б.Г., Смирнов Н.Н., Суздаль В.С.* Рост кристаллов. – Харьков: АКТА, 2002. – 535 с. **2.** *Суздаль В.С., Горилецкий В.И., Заславский Б.Г., Герасимчук Л.И., Звягинцев В.Н.* Характерные особенности автоматизированного роста больших монокристаллов из расплава // Известия ВУЗ'ов. Материалы электронной техники. – 1999. – № 2. – С. 46–49. **3.** *Суздаль В.С., Епифанов Ю.М.* Измеритель проводимости расплава // ПТЭ. – 1984. – № 4. – С. 246. **4.** *Епифанов Ю.М., Суздаль В.С., Герасимчук Л.И.* Комплекс технических средств для исследования свойств расплава // Заводская лаборатория: Тем. вып. "Диагностика материалов". – 1996. – № 5. – С. 28–31. **5.** Способ определения начала кристаллизации при выращивании кристаллов из раствора-расплава. А.с. 1589173 (СССР, МКИ G01 N 25/04 / *Воронов А.П., Епифанов Ю.М., Космына М.Б., Некрасов В.В., Суздаль В.С.* – № 4615320/25-25. Заявл. 02.11.88. – Опубл. 30.08.90. – Бюл. № 32. **6.** *Тиман Б.Л., Бурачас С.Ф.* Разращивание кристаллов по диаметру при вытягивании из расплава / Получение и исследование монокристаллов, Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1978. – № 1. – С. 7–10. **7.** *Горилецкий В.И., Радкевич А.В., Эйдельман Л.Г.* Принципы управляемого вытягивания монокристаллов из расплава: обз. инф. / Харьков: ВНИИ монокристаллов. – М.: НИИТЭХИМ, 1977. – 37 с. **8.** *Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Звягинцев В.Н., Герасимчук Л.И., Тавровский И.И. и др.* Развитие систем управления процессами получения крупногабаритных монокристаллов из расплава. – Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЭ. – № 4 (17). – 2001. – С. 91–95. **9.** *Голант А.И., Альперович Л.С., Васин В.М.* Системы цифрового управления в химической промышленности. – М.: Химия, 1985. – 254 с. **10.** *Раисов Ю.А., Суздаль В.С., Тавровский И.И.* Алгоритм настройки ПИД-регулятора температуры // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. – № 4, 5 (37). – С. 21–23. **11.** Цифровое задающее устройство: А.с. 983123 СССР, МКИ3 G05 B 19/18 / *Л.Б. Грищенко, В.С. Суздаль, Н.И. Стрельников, Ю.М. Епифанов* (СССР). – №3301029. Заявл. 15.06.81. – Опубл. 23.12.82. – Бюл. № 47.

Поступила в редакцию 11.10.2005