

Синтез системы управления температурным полем углеграфитового теплового узла при выращивании кристаллов лейкосапфиров

В. Г. Фетисов¹, Е. А. Яромич^{1✉}, И. М. Новожилов²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ lizavetayaromich@ya.ru

Аннотация. Рассматривается разработка модели системы управления температурным полем углеграфитового теплового узла при выращивании кристаллов лейкосапфира по методу горизонтальной направленной кристаллизации. Приводятся результаты разработки модели автоматизированной системы управления для поддержания заданных температурных условий на фронте кристаллизации. В рамках решения поставленной задачи управления была разработана математическая модель процесса выращивания кристаллов, на основании численного решения которой проведены анализ и идентификация объекта управления. В качестве корректирующего устройства применялся распределенный высокоточный регулятор, настройки которого были рассчитаны с помощью частотного метода синтеза, для анализа модели замкнутой системы управления использовались методы компьютерного моделирования. На основании полученных переходных характеристик были рассчитаны прямые показатели качества синтезированной системы управления, которые подтвердили, что рассчитанные настройки корректирующего устройства позволяют достичь цели управления – поддержания заданных температурных условий на фронте кристаллизации.

Ключевые слова: выращивание кристаллов, метод горизонтальной направленной кристаллизации, распределенный высокоточный регулятор

Для цитирования: Фетисов В. Г., Яромич Е. А., Новожилов И. М. Синтез системы управления температурным полем углеграфитового теплового узла при выращивании кристаллов лейкосапфиров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 2. С. 78–91. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-78-91.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Synthesis of the Control System of the Temperature Field in the Carbon-Graphite Thermal Node During the Growth of Leucosapphires

V. G. Fetisov¹, E. A. Yaromich^{1✉}, I. M. Novozhilov²

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ lizavetayaromich@ya.ru

Abstract. This article is devoted to the development of a control system of the temperature field in the carbon graphite thermal unit during the growth of leucosapphire crystals by the horizontal directional crystallization (HDC) method. The paper presents the results of developing a model of automated control system for maintaining the specified temperature conditions at the crystallization front. The work solves the following tasks: the mathematical model of the crystal growth process was developed, analysis and identification of the control object based on the numerical solution, calculation of distributed high-precision controller parameters using frequency synthesis method, computer modeling of a closed-loop control system. Based on the obtained transient

characteristics, direct quality indicators of the synthesized control system were calculated, which confirmed that the calculated settings of the corrective device allow to achieve the control objective – maintaining the specified temperature conditions at the crystallization front.

Keywords: crystal growth, horizontal directional crystallization method, distributed high-precision controller

For citation: Fetisov V. G., Yaromich E. A., Novozhilov I. M. Synthesis of the Control System of the Temperature Field in the Carbon-Graphite Thermal Node During the Growth of Leucosapphires // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 78–91. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-78-91.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Искусственно выращенные кристаллы лейкосапфира находят широкое применение в таких областях производства, как микроэлектроника, машиностроение и оптическая промышленность. Востребованность применения синтезированных кристаллов в качестве конструкционных или оптических материалов обусловлена уникальными свойствами сапфировых изделий: высокой температурой плавления, устойчивостью к механическим воздействиям, прозрачностью и стойкостью в агрессивных средах [1]. Для успешного применения таких элементов ключевое значение имеет качество кристаллов, так как дефекты, образование которых происходит при их выращивании, значительно снижают эксплуатационные свойства объектов, построенных на их основе.

В производственной практике одним из наиболее распространенных методов выращивания кристалла служит метод горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК), который исключает ряд проблем, характерных для прочих используемых методов, и обеспечивает получение кристаллов высокого качества. Данный метод основывается на теории теплопроводности и заключается в управлении температурным полем углеродистого теплового узла (УГТУ), при этом ввиду изменения постоянства тепловых условий на протяжении всего цикла кристаллизации, проблема управления температурным полем УГТУ остается актуальной, а дальнейшее совершенствование технологии выращивания монокристаллов требует повышения качества управления процессами кристаллизации.

Постановка задачи. Одна из основных проблем технологического процесса выращивания кристаллов по методу ГНК заключается в изменении постоянства температурных условий на фронте кристаллизации, что обуславливается фазовыми переходами исходного материала в течение цикла кристаллизации. Описанным фактом определяется необходимость рассмотрения параметров объекта как пространственно-распределенных, что позволит

нивелировать изменение температуры на фронте кристаллизации и обеспечить высокую точность управления температурным полем в ходе технологического процесса.

Решения описанной проблемы можно достичь как с помощью изменения существующих типовых конструкций ростового оборудования с целью управления температурным полем посредством косвенных параметров, так и с помощью разработки систем автоматизированного управления без внесения конструктивных изменений в оборудование.

В [2] предложена новая конфигурация приемного отделения тепловой печи, через элементы которой на протяжении всего технологического процесса подается инертный газ. Так, посредством изменения скорости потока газа предлагается контролировать температурный градиент на фронте кристаллизации, что позволит сократить количество тепловых экранов и повысить качество управления температурным полем углеродистого теплового узла. В [3] предложен способ дополнительного нагрева контейнера через зазор в платформе лодочки, при этом результаты моделирования показали значительное изменение характера тепло- и массопереноса, обеспечивающего более стабильное распределение температуры на фронте кристаллизации.

В [4] приводится описание основных подходов к автоматизации процесса выращивания кристаллов, в качестве корректирующих устройств рассматриваются ПИД-регуляторы, осуществляющие управление скоростью движения тигля и степенью вакуума в кристаллизационной установке, изменение значений которых влияет на тепловое поле кристалла. В [5] предложен способ управления температурным полем УГТУ с учетом изменения массы материала в ходе технологического процесса, что позволяет учесть изменение высоты расплава и влияние внутренних параметров при формировании управляющего воздействия на нагреватели. В [6] приведены результаты

разработки следящей системы управления технологическим процессом выращивания кристалла, в которой наравне с управлением температурой на нагревателях осуществляется управление скоростью перемещения лодочки.

Стоит отметить, что в литературе наиболее полно исследованы способы управления скоростью перемещения лодочки, степенью вакуума и весом на основе ПИД-регуляторов, однако заданное распределение температуры в тепловом узле может быть обеспечено с помощью управления параметрами не только по времени, но и по пространственным координатам. Системы управления с распределенными параметрами подтвердили свою эффективность при решении задач поддержания стабильности температурного поля для объектов горнодобывающей промышленности [7], электромагнитных [8] и тепловых [9], [10] объектов, что служит основным требованием технологического процесса выращивания кристаллов. Данная статья посвящена разработке системы управления температурным полем УГТУ при выращивании кристаллов лейкосапфира по методу ГНК с целью поддержания постоянных температурных условий на фронте кристаллизации.

Разработка математической модели. По методу ГНК выращивание кристалла происходит в вакуумной камере, где тигель с исходным материалом протягивается через тепловое поле, создаваемое системой из верхнего и нижнего нагревателей. В процессе роста кристалла происходит поэтапное изменение структуры исходного материала, что ведет к изменению теплового поля. В то же время для получения кристалла заданного качества необходимо поддержание постоянных температурных условий в зоне плавления исходного материала. Описанные факторы определяют необходимость изменения мощности нагревателей в зависимости от этапа технологического процесса.

Цикл получения монокристалла по методу ГНК состоит из периодов, представленных на рис. 1 [11].

Цикл выращивания монокристалла состоит из четырех периодов, которые выделяются в соответствии со структурными изменениями исходного материала. Рассмотрим их более подробно:

1. Предначальный период – от начала перемещения контейнера до начала кристаллизации расплава в носике контейнера. В контейнере расплав и исходный материал.

2. Первый период – от начала кристаллизации расплава в носике контейнера до окончания рас-

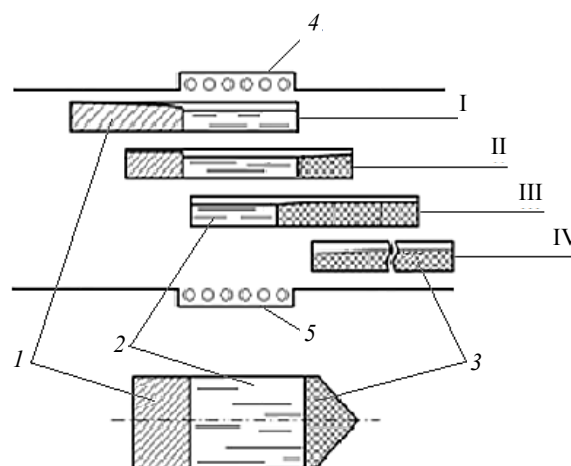


Рис. 1. Циклы роста монокристалла по методу ГНК:
I – предначальный период; II – первый период;
III – второй период; IV – третий период; 1 – шихта;
2 – расплав; 3 – кристалл; 4 – верхний нагреватель;
5 – нижний нагреватель

Fig. 1. Cycles of crystal growth by HDC method:
I – pre-initial period; II – first period; III – second period;
IV – third period; 1 – the charge; 2 – the melt;
3 – the crystal; 4 – the top heater; 5 – the bottom heater

плавания всего исходного материала. В контейнере – кристалл, расплав и исходный материал, между ними две границы фазовых переходов.

3. Второй период – от окончания плавления исходного материала до окончания кристаллизации всего расплава. В контейнере – кристалл и расплав, между ними – фронт кристаллизации.

4. Третий период – от окончания кристаллизации расплава до охлаждения кристалла. В контейнере только кристалл.

Математическое моделирование целесообразно осуществлять от предначального до второго периода, так как на этих этапах происходит формирование температурного поля кристалла и осуществляется управление температурой на нагревателях. Фазовые переходы в системе «шихта–расплав–кристалл» происходят при достижении температуры плавления $T = 2300$ К, при этом, в соответствии с экспериментальными исследованиями [12], температура перегрева материала в зоне расплава должна составлять 300 К.

В ходе осуществления цикла кристаллизации происходят не только фазовые изменения структуры исходного материала, но и изменение высоты расплава: по мере продвижения контейнера высота расплава убывает, что объясняется изменением плотности расплава. В [13] уточняется, что выравнивание высоты расплава возможно с помощью добавления шихты на втором этапе цикла кристаллизации. В качестве допущения

в данной работе параметры, описывающие физические свойства исследуемых материалов, принимаются постоянными, вследствие чего изменение высоты расплава не учитывается.

В методе ГНК поддоны с шихтой двигаются относительно системы секционных нагревателей (число секций верхнего и нижнего нагревателей равно 20) со скоростью 6 мм/ч, поэтому можно говорить о квазистационарном состоянии процесса. Поскольку процесс проходит в вакууме (10^{-2} Па), тепло между свободными поверхностями передается излучением [13], при этом переотражение излучения в данной статье не учитывается.

Конструкция установки теплового узла с указанием его геометрических размеров (в миллиметрах), необходимых для осуществления математического моделирования, представлена на рис. 2.

Для исследования распределения температуры в процессе роста кристалла теплообмен рассчитывается с учетом геометрических параметров кристалла, для расчетов введем следующее допущение: геометрические параметры кристалла эквивалентны геометрическим параметрам тигля, размеры которого приведены в табл. 1.

Табл. 1. Геометрические параметры тигля
Tab. 1. Geometric parameters of the melting pot

Параметр	Значение, м
Длина контейнера, L_x	0.35
Ширина контейнера, L_y	0.15
Высота контейнера, L_z	0.045
Толщина стенки контейнера	0.009

При разработке математической модели выращивания кристаллов по методу ГНК задача нахождения распределения температуры в системе «шихта–расплав–кристалл–тигель» первостепенна и сводится к решению уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} a_i \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial y} a_i \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial z} a_i \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} - W \frac{\partial}{\partial x} a_i \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x},$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \tau > 0,$$

где T_i – температура в различных точках; $i = 1, 2, 3, 4$ – соответственно шихта, расплав, кристалл, поддон; x, y, z – координаты; $\partial x, \partial y, \partial z$ шаги дис-

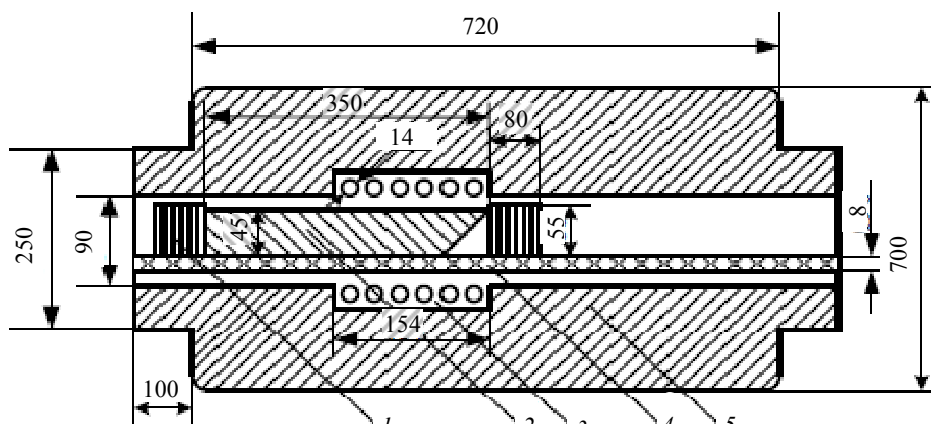


Рис. 2. Эскиз конструкции установки теплового узла СЗВН 155.320:
1 – теплоизоляционные экраны; 2 – тигель; 3 – вольфрамовый нагреватель;
4 – механизм горизонтального перемещения; 5 – тепловой узел
Fig. 2. The design of the thermal node installation SZVN 155.320:
1 – the heat protection shields; 2 – the melting pot; 3 – the tungsten heater;
4 – the mechanism of the horizontal movement; 5 – the thermal node

Табл. 2. Параметры исследуемых материалов
Tab. 2. Parameters of the investigated materials

Параметр	Материал			
	Шихта	Расплав	Кристалл	Молибден
Плотность, кг/м ³	2800	3000	4000	11 000
Удельная теплоемкость, Дж/кг · К	1620	1260	1430	430
Коэффициент теплопроводности, Вт/м · К	2	3	5	69
Коэффициент излучения	–	–	–	0.31

кретизации по координатам; τ – время; $\partial\tau$ – шаг дискретизации по времени; a_i – коэффициент теплопроводности ($a_i = \lambda_i / \rho_i C_i$, где λ_i – коэффициент теплопроводности; ρ_i – плотность материала; C_i – удельная теплоемкость); W – скорость движения контейнера.

В табл. 2 приведены параметры материалов, значения которых были использованы при численном решении уравнения теплопроводности для нахождения распределения температуры в системе «шихта–расплав–кристалл».

Для решения уравнения теплопроводности были заданы начальные и граничные условия, а также описаны условия для границ раздела сред.

При задании начальных условий было введено следующее допущение: при начале технологического процесса температура шихты равна 0, т. е. начальные условия имеют вид

$$T_{1,2}(x, y, z, 0) = 0, \\ 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z.$$

Границы раздела фазовых переменных, отражающие неразрывность тепловых полей на межфазных границах, описываются следующими соотношениями:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x_{Г1}, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x_{Г1}, y, z, \tau)}{\partial x}, \\ T_1(x_{Г1}, y, z, \tau) = T_2(x_{Г1}, y, z, \tau), \quad (1) \\ 0 < y < L_y, z_{Г1} < z < L_z, \tau > 0;$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x_{Г2}, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(x_{Г2}, y, z, \tau)}{\partial x}, \\ T_2(x_{Г2}, y, z, \tau) = T_3(x_{Г2}, y, z, \tau), \quad (2) \\ 0 < y < L_y, z_{Г2} < z < L_z, \tau > 0;$$

$$\lambda_{1,2,3} \frac{\partial T_{1,2,3}(x, y, z_{Г}, \tau)}{\partial z} = \lambda_4 \frac{\partial T_4(x, y, z_{Г}, \tau)}{\partial z}, \\ T_{1,2,3}(x, y, z_{Г}, \tau) = T_4(x, y, z_{Г}, \tau), \quad (3) \\ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, \tau > 0.$$

Уравнение (1) описывает границу раздела «шихта–расплав», (2) – границу раздела «расплав–кристалл», (3) – «материал–поддон».

Поскольку в тепловом узле поддерживается вакуум, тепло по бокам контейнера не отводится, а между свободными поверхностями тепло передается излучением, граничные условия, соответственно, примет вид

$$q_{Гр} = 0; \quad (4) \\ q_{S2}(x, \tau) = \sigma\beta(T_{ПОВ}^4 - T_{НАГ}^4), \quad (5)$$

где $q_{Гр}$ – тепловой поток на свободных гранях объекта; q_{S2} – тепловые потоки на верхней и нижней границах площади поверхности расплава; σ – постоянная Стефана–Больцмана $\sigma = 5.7 \times 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴); β – коэффициент излучения; $T_{ПОВ}$ – температура; $T_{НАГ}$ – температуры на нагревателях.

Исходя из соотношений (4), (5), запишем граничные условия и получим следующее.

Для нижней грани:

$$\frac{\partial T_4(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0, 0 \leq x \leq \Delta x, 0 \leq y \leq L_y, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_4(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = -\frac{\Delta z}{\lambda_4} q_{S4}(\tau) + T(x, y, 0 + \Delta z, \tau), \\ \Delta x \leq x \leq \Delta x + L_{НАГР}, 0 \leq y \leq L_y, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_4(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0, \Delta x + L_{НАГР} \leq x \leq L_x, \\ 0 \leq y \leq L_y, \tau > 0.$$

Для верхней грани:

$$\frac{\partial T_1(x, y, L_z, \tau)}{\partial z} = 0, 0 \leq x \leq \Delta x, \\ 0 \leq y \leq L_y, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_2(x, y, L_z, \tau)}{\partial z} = -\frac{\Delta z}{\lambda_2} q_{S2}(\tau) + \\ + T(x, y, L_z - \Delta z, \tau), \\ \Delta x \leq x \leq \Delta x + L_{НАГР}, 0 \leq y \leq L_y, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_3(x, y, L_z, \tau)}{\partial z} = 0, \Delta x + L_{НАГР} \leq x \leq L_x, \\ 0 \leq y \leq L_y, \tau > 0,$$

где Δx – длина нагревателя.

Для боковых граней:

$$\frac{\partial T_{1,2}(0, y, z, \tau)}{\partial x} = 0, 0 \leq y \leq L_y, z_{Г} \leq z \leq L_z, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_4(0, y, z, \tau)}{\partial x} = 0, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq z_{Г}, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_1(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0, 0 \leq x \leq x_{Г1}, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_2(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0, x_{Г1} \leq x \leq x_{Г2}, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_3(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0, x_{Г2} \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_4(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0, 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0; \\ \frac{\partial T_{2,3}(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0, 0 \leq y \leq L_y, z_{Г} \leq z \leq L_z, \tau > 0;$$

$$\frac{\partial T_4(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0;$$

$$\frac{\partial T_1(x, L_y, z, \tau)}{\partial y} = 0, 0 \leq x \leq x_{\Gamma 1}, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0;$$

$$\frac{\partial T_2(x, L_y, z, \tau)}{\partial y} = 0, x_{\Gamma 1} \leq x \leq x_{\Gamma 2}, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0;$$

$$\frac{\partial T_3(x, L_y, z, \tau)}{\partial y} = 0, x_{\Gamma 2} \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0;$$

$$\frac{\partial T_4(x, L_y, z, \tau)}{\partial y} = 0, 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0.$$

Анализ технологического процесса выращивания кристалла по методу ГНК позволил выделить основные этапы цикла кристаллизации, условия фазовых переходов и исходные данные для моделирования. Разработанная математическая модель отражает процесс распределения температуры в системе «тигель–шихта–расплава–кристалл» и включает в себя уравнение теплопроводности, начальные и граничные условия, а также границы раздела фазовых переменных.

Для решения задачи расчета приращения температуры с учетом геометрических и теплофизических параметров объекта, а также для исследования реакции объекта на различные управляющие воздействия был использован метод компьютерного моделирования. Далее предлагается перейти к анализу численного решения системы дифференциальных уравнений.

Анализ объекта управления. Разработанная программная реализация математической модели позволяет проанализировать динамические характеристики объекта управления и оценить степень переохлаждения расплава при кристаллизации ча-

сти исходного материала. Трехмерный график распределения температуры позволяет оценить положение границ раздела фазовых сред, а также равномерность распределения тепла в кристалле.

В качестве входного воздействия были поданы постоянные температуры на верхний и нижний нагреватели, численные значения которых равны $T_{\text{верх}} = 2750 \text{ К}$, $T_{\text{ниж}} = 2650 \text{ К}$. Выбор большего значения температуры на верхнем нагревателе обусловлен тем, что значения коэффициента теплопроводности шихты меньше, чем молибдена, – следовательно, требуется увеличение мощности теплового потока, воздействующего на верхнюю грань объекта, для обеспечения равномерного нагрева кристалла.

Дальнейшее повышение температуры верхнего нагревателя не приводит к более равномерному распределению теплового потока, воздействующего на свободную поверхность кристалла, при этом нагрев шихты через тигель обеспечивает более равномерное распределение температуры. Тем не менее, выбранные значения температур позволяют добиться равномерного распределения температуры по высоте объекта в крайней его части – той части расплава, которая при достижении условий перехода на следующий этап технологического процесса подлежит кристаллизации (рис. 3).

Графики переходных процессов при осуществлении предначального этапа технологического процесса представлены на рис. 4.

Из полученных графиков видно, что распределение температуры по высоте компоновки можно считать равномерным, так как разность значений на верхней и нижней плоскостях объекта незначительна.

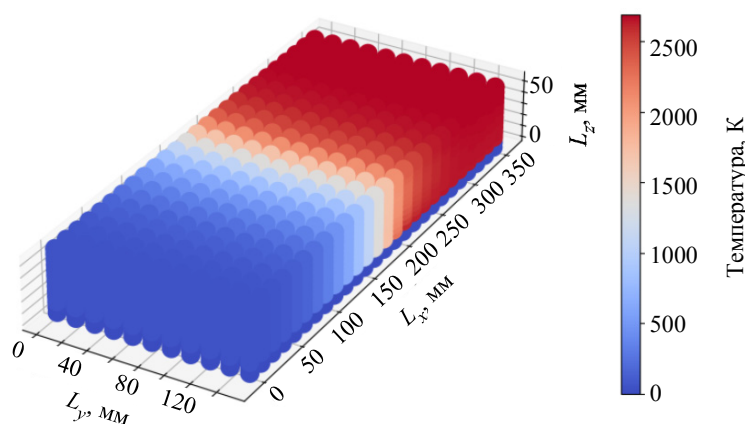


Рис. 3. Распределение температуры в объекте на предначальном этапе технологического процесса

Fig. 3. Temperature distribution in the object at the pre-initial period of the technological process

Температура, К

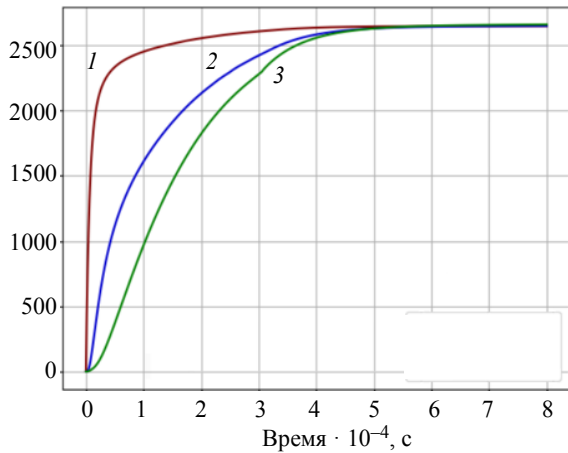


Рис. 4. Графики переходного процесса на предначальном этапе технологического процесса при $T(20.5, z)$:

$$1 - z = 2; 2 - z = 7; 3 - z = 11$$

Fig. 4. Graphs of the transient process at the pre-initial period of the technological process at $T(20.5, z)$:

$$1 - z = 2; 2 - z = 7; 3 - z = 11$$

Перейдем к анализу процесса формирования температурного поля на первом этапе технологического процесса, при котором осуществляется движение компоновки и охлаждение части расплава. Для этого была построена трехмерная модель распределения температуры, график которой представлен на рис. 5.

Из построенного графика видно, что охлаждение расплава после выхода из зоны нагрева значительно влияет на изменение температурных условий фронта кристаллизации (плоскости $(L_{\text{нагр}}, y, z)$). Для определения описанного влияния был построен график переходного процесса в точке, принадлежащей плоскости фронта кристаллизации ($L_{\text{нагр}}$) при скорости движения лодочки (u), равной нулю и отличной от нуля (рис. 6).

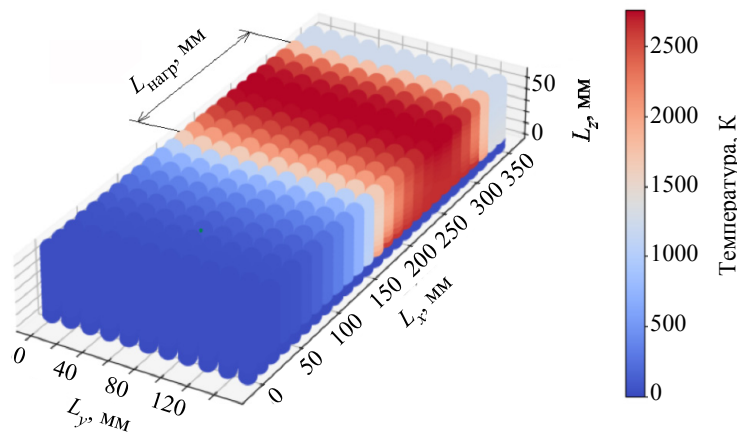


Рис. 5. Распределение температуры в объекте на первом этапе технологического процесса

Fig. 5. Temperature distribution in the object at the first period of the technological process

Из построенного графика (рис. 6) переходного процесса видно, что часть объекта после выхода из зоны нагрева влияет на фронт кристаллизации таким образом, что его температура становится меньше температуры плавления, – это говорит о начале кристаллизации вещества. Следовательно, подаваемой на нагреватели постоянной температуры недостаточно для компенсации влияния охлаждения расплава и соблюдения условий технологического процесса, необходимых для выращивания кристалла.

Численное решение системы дифференциальных уравнений показало необходимость синтеза системы управления температурным полем с целью поддержания заданных условий на фронте кристаллизации.

Температура, К

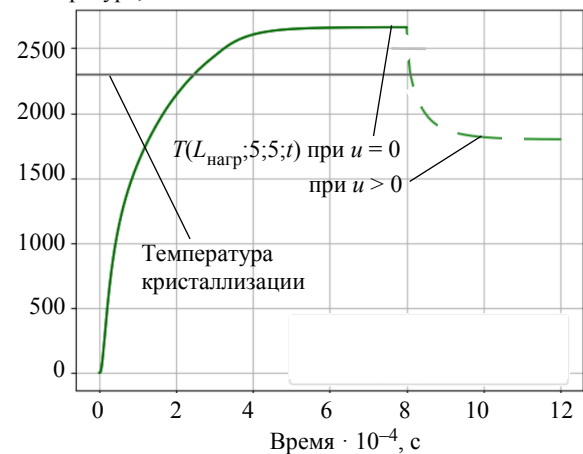


Рис. 6. Графики переходного процесса в точке, принадлежащей фронту кристаллизации

Fig. 6. Graphs of the transient process at a point belonging to the crystallization front

Синтез системы управления температурным полем углеродного теплового узла. Анализ результатов компьютерного моделирования процесса роста кристалла показал, что система управления температурным полем УГТУ должна обеспечивать компенсацию изменения температуры на фронте кристаллизации вследствие перераспределения тепла на первом этапе технологического процесса, что позволит обеспечить необходимые температурные условия для выращивания качественных кристаллов. Для решения поставленной задачи был выбран принцип управления с отрицательной обратной связью. Структурная схема системы управления представлена на рис. 7, где $W_{\text{пер}}(x, y, s)$ – передаточная функция корректирующего устройства; $W_{\text{об}}(x, y, s)$ – передаточная функция объекта управления; $f(x, y, s)$ – входное воздействие; $F(x, y, s)$ – функция выхода.

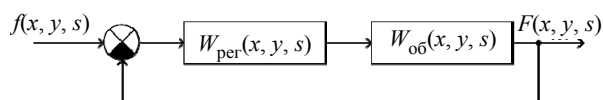


Рис. 7. Структурная схема системы управления
Fig. 7. Structure diagram of the control system

При этом в ходе анализа результатов моделирования исследуемой системы была определена необходимость управления температурой не только по времени, но и по пространственным координатам. В производственной практике для аналогичных задач управления находит широкое применение распределенный высокоточный регулятор (РВР) [14], [15].

Передаточная функция РВР состоит из распределенного усилительного, дифференцирующего, интегрирующего звеньев и имеет вид

$$W(x, y, s) = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right) + E_4 \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right) + E_2 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right), \quad (6)$$

где $E_{1,2,3}$ – заданные числа; $n_{1,2,3}$ – весовые коэффициенты; ∇ – лапласиан; s – оператор Лапласа.

После определения принципа управления и вида передаточной функции корректирующего устройства, необходимых для реализации поставленных задач управления, предлагается перейти к идентификации объекта управления для последующего расчета настроек регулятора.

Идентификация объекта управления. Для нахождения параметров передаточной функции распределенного высокоточного регулятора необходимо исследовать реакцию системы на распределенное входное воздействие, которое имеет вид

$$u_{\eta,\gamma}(i, j, \tau) = A + AU \cos \left(n dx \frac{\pi\eta}{L_{\text{нагр}}} \right) \cos \left(k dy \frac{\pi\gamma}{L_{\text{нагр}}} \right), \quad (7)$$

где A – температура нагревателя; $U = 0.1$ – амплитуда; $\eta, \gamma = 1.3$ – номер пространственных мод; n, k – точки дискретизации по пространственным координатам; dx, dy – шаг дискретизации.

Распределенное входное воздействие формируется только на нижнем нагревателе и воздействует на тигель, конструкция которого предполагает наличие тепловых экранов [11], что эквивалентно граничным условиям II рода и определяет вид собственной вектор-функции оператора объекта.

Так как объект принадлежит к классу пространственно-инвариантных, для идентификации объекта управления была выбрана точка с координатами (0.28; 0.075; 0.0315), для которой были получены переходные характеристики, при этом управляющее воздействие на нижнем нагревателе было задано в виде (7), на верхнем нагревателе – скалярной величиной. Полученные графики переходного процесса были аппроксимированы с помощью передаточной функции аperiodического звена с чистым запаздыванием, имеющей вид

$$W(G_{\eta,\gamma}, s) = \frac{K(G_{\eta,\gamma})}{T(G_{\eta,\gamma})s + 1} e^{-\tau(G_{\eta,\gamma})s}, \quad (8)$$

где $K(G_{\eta,\gamma})$ – коэффициент усиления; $T(G_{\eta,\gamma})$ – постоянная времени; $\tau(G_{\eta,\gamma})$ – время запаздывания, $G_{\eta,\gamma}$ – обобщенная координата.

Коэффициенты передаточной функции были определены графически, для этого были проведены касательная к переходной характеристике через точку перегиба функции и прямая $y = T_{\text{уст}}$. Абсцисса точки пересечения касательной с прямой $y = 0$ – это время запаздывания. Далее была определена точка пересечения касательной и прямой $y = T_{\text{уст}}$, разность между которой и значением времени запаздывания есть постоянная времени. Полученные значения коэффициентов запаздывания и постоянной времени были умножены на шаг дискретизации по времени для перевода значений в секунды. Коэффициент усиления находился как отношение ординаты значения $T_{\text{уст}}$ ко входному воздействию.

Описанные построения были проведены для переходных характеристик в точке $T[20][7][7][t]$ для пространственных мод $\eta, \gamma = 1; \eta, \gamma = 3$. Вычислены следующие значения:

$$K(G_1) = 0.502; T(G_1) = 1728.203; \tau(G_1) = 145.099; \\ K(G_3) = 0.511; T(G_3) = 1525.051; \tau(G_3) = 128.657.$$

Аппроксимация переходной характеристики и определение коэффициентов передаточной функции объекта управления при выбранных пространственных модах позволяют перейти к расчету настроек корректирующего устройства.

Расчет настроек распределенного высокоточного регулятора. Постановка задачи: для системы управления объектом, передаточные функции которого заданы в виде (8) по выбранным пространственным модам, синтезировать распределенный высокоточный регулятор со следующими показателями: запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi \geq \pi/6$, запас устойчивости по модулю $\Delta L = 5$ дБ; $\Delta = 0.45$.

Синтез регулятора осуществлялся в соответствии с методикой, описанной в [16], которая предполагает определение модуля и передаточной функции объекта с помощью построения логарифмической амплитудной частотной характеристики (ЛАЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ). Для построения основных частотных характеристик объекта, описываемого уравнением (8), оператор Лапласа представляется как $s = j\omega$, где ω – круговая частота, s^{-1} .

Для определения желаемых частот среза модуля положим, что фазовый сдвиг, вносимый в систему, равен нулю, тогда получим уравнение

$$-\pi + \Delta\varphi = -\omega\tau_{\eta,\gamma} - \arctg(T_{\eta,\gamma}\omega). \quad (9)$$

Уравнение (9) было решено графически с помощью построения ФЧХ объектов управления $W(G_1, j\omega)$ и $W(G_3, j\omega)$, вычисленные значения: $j_1(\omega_1) = 1.0093; j_3(\omega_3) = 1.1912$.

Модули объекта управления в точках среза для двух пространственных мод были определены с помощью построения ЛАЧХ, которая задается функцией

$$M_{\eta,\gamma}(\omega) = \frac{K_{\eta,\gamma}}{\sqrt{(T_{\eta,\gamma}\omega)^2 + 1}}.$$

Значения модулей передаточных функций численно равны: $M(\omega_{cp1}) = -70.738; M(\omega_{cp3}) = -71.008$.

Поскольку $\omega_{cp1}, \omega_{cp3}$ – частоты среза разомкнутой системы, коэффициенты усиления регулятора в точках могут быть найдены как

$$\overline{M}_1 = M(G_1)^{-1}, \overline{M}_3 = M(G_3)^{-1}.$$

Определение параметров пространственно-усилительного звена n_1 и E_1 было осуществлено исходя из условий

$$\overline{M}_1 = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{G_1}{n_1} \right); \quad (10)$$

$$\overline{M}_3 = E_3 \left(\frac{n_3 - 1}{n_3} - \frac{G_3}{n_3} \right), \quad (11)$$

где

$$G_1 = (\pi \cdot 1 / L_{\text{нагр}})^2 + (\pi \cdot 1 / L_y)^2 = \\ = (\pi \cdot 1 / 0.154)^2 + (\pi \cdot 1 / 0.15)^2 = 854.807;$$

$$G_3 = (\pi \cdot 3 / L_{\text{нагр}})^2 + (\pi \cdot 3 / L_y)^2 = \\ = (\pi \cdot 3 / 0.154)^2 + (\pi \cdot 3 / 0.15)^2 = 7693.0.$$

Найдя отношение параметра (11) к (10) и выразив значение параметра n_1 , получим

$$n_1 = \frac{-1 \cdot \Delta M - \Delta M G_1 + G_1}{\Delta M - 1}, \quad (12)$$

где $\Delta M = \overline{M}_3 / \overline{M}_1$.

Значение коэффициента усиления E_1 было найдено из соотношения (10) и определено как

$$E_1 = \frac{\overline{M}_1}{n_1 - 1/n_1 - G_1/n_1}. \quad (13)$$

Определение параметров пространственно-интегрирующего и пространственно-дифференцирующих звеньев было осуществлено исходя из условий принадлежности $\omega_{cp1}, \omega_{cp3}$ линии перегиба. Тогда, подставляя значения частот среза в уравнение линии перегиба, получим систему уравнений

$$\lg \omega_{cp1} = 0.5 \cdot \lg \left[E_4 \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{G_1}{n_4} \right) \right] - \\ - 0.5 \cdot \lg \left[E_2 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{G_1}{n_2} \right) \right]; \quad (14)$$

$$\lg \omega_{cp3} = 0.5 \cdot \lg \left[E_4 \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{G_3}{n_4} \right) \right] - \\ - 0.5 \cdot \lg \left[E_2 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{G_3}{n_2} \right) \right]. \quad (15)$$

Вычитая (14) из (15), получим следующий результат:

$$\lg \Delta \omega^2 = \lg \left(\frac{n_4 - 1 - G_3}{n_4 - 1 - G_1} \right) - \lg \left(\frac{n_2 - 1 - G_3}{n_2 - 1 - G_1} \right), \quad (16)$$

где $\Delta \omega^2 = \omega_{\text{cp3}}^2 / \omega_{\text{cp1}}^2 = 1.416$.

Поскольку $\Delta \omega^2 > 1$, положим $n_2 = \infty$. Тогда, выразив коэффициент n_4 из соотношения (16), получим

$$n_4 = \frac{\Delta \omega - 1 + \Delta G_3 - \Delta \omega G_1}{\Delta \omega - 1}. \quad (17)$$

Связь параметра Δ , значение которого определяет возможность объекта компенсировать параметрические возмущения, с коэффициентами передаточной функции регулятора, описывается отношением

$$\Delta = \lg \left(\frac{1}{K_2(G_1)} \right) - \lg K_2(G_1), \quad (18)$$

где $K_{2,4} = E_{2,4} \left(\frac{n_{2,4} - 1}{n_{2,4}} - \frac{G_1}{n_{2,4}} \right)$.

Для определения параметра E_2 преобразуем выражение (18) и получим

$$E_2 = \frac{1}{10^\Delta K_2}. \quad (19)$$

Для определения параметра E_4 подставим (19) в (14) и после преобразований получим:

$$E_4 = \sqrt{\frac{\omega_1^2}{10^\Delta \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{G_1}{n_4} \right)^2}}. \quad (20)$$

После подстановки численных значений в соотношения (12), (13), (17), (19), (20) получим следующие усилительные и весовые коэффициенты регулятора:

$$\begin{aligned} n_1 &= 2.157 \cdot 10^5; E_1 = 3.429 \cdot 10^3; \\ n_4 &= 1.558 \cdot 10^4; E_4 = 0.565; \\ n_2 &= \infty; E_2 = 0.596. \end{aligned}$$

Поскольку значение n_1 велико, множитель пространственно-усилительного звена будет стремиться к единице и им можно пренебречь. Тогда соотношение (6) представим в виде

$$W(x, y, s) = 3.429 \cdot 10^3 + 0.565 \times \left(\frac{1.588 \cdot 10^4 - 1}{1.588 \cdot 10^4} - \frac{1}{1.588 \cdot 10^4} \nabla^2 \right) \frac{1}{s} + 0.596s. \quad (21)$$

При постановке задачи синтеза регулятора были предъявлены требования к запасу устойчивости по фазе и по модулю разомкнутой системы – оценим соответствие полученных результатов описанным ранее условиям.

Разомкнутая система состоит из распределенного высокоточного регулятора, передаточная функция которого описывается (21), и объекта управления, который описывается передаточной функцией (8), модуль и фаза данной системы определяются следующими отношениями [14]:

$$\begin{aligned} M_p(G_{1,3}, \omega) &= \\ &= \sqrt{\left(\frac{K_2(G_{1,3})\omega^2 - K_4(G_{1,3})}{\omega} \right)^2 + (K_1(G_{1,3}))^2} \times \\ &\quad \times \frac{K_{\eta,\gamma}(G_{1,3})}{\sqrt{(T_{\eta,\gamma}(G_{1,3})\omega)^2 + 1}}, \quad (22) \\ \varphi_p(G_{1,3}, \omega) &= \arctg \frac{K_2(G_{1,3})\omega^2 - K_4(G_{1,3})}{\omega K_1(G_{1,3})} - \\ &\quad - \omega \tau_{\eta,\gamma}(G_{1,3}) - \arctg(\tau_{\eta,\gamma}(G_{1,3})\omega). \quad (23) \end{aligned}$$

Для определения запаса устойчивости по фазе положим $M_p(G_{1,3}, \omega^*) = 1$, где ω^* – частота среза модуля, тогда запас устойчивости по фазе может быть найден графически, исходя из соотношения $\Delta \varphi(G_{1,3}) = \pi + \Delta \varphi_p(G_{1,3}, \omega^*)$. Запас устойчивости по модулю определим в соответствии с отношением $\Delta L(G_{1,3}) = -20 \lg M_p(G_{1,3}, \omega^{**})$, где ω^{**} – частота среза фазы при $\varphi_p(G_{1,3}, \omega^{**}) = -\pi$.

После построения ЛАФЧ и ФЧХ в соответствии с функциями (22), (23) и определения значений частот среза модуля и фазы, значения запасов устойчивости для первой и третьей пространственных мод равны

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_1 &= 49.119, \quad \Delta L_1 = 6.965; \\ \Delta \varphi_3 &= 41.976, \quad \Delta L_3 = 6.046. \end{aligned}$$

Полученные значения запасов устойчивости по модулю и по фазе соответствуют требуемым условиям. Расчет параметров передаточной функции регулятора позволяет перейти к анализу замкнутой системы управления.

Обсуждение результатов. Результаты работы замкнутой системы автоматического управления анализировались на основе компьютерного моделирования, с помощью которого были получены графики переходных процессов на предначальном и первом этапах технологического процесса,

а также график распределения температуры в кристалле после включения в систему корректирующего устройства.

График переходного процесса на этапе плавления шихты представлен на рис. 8.

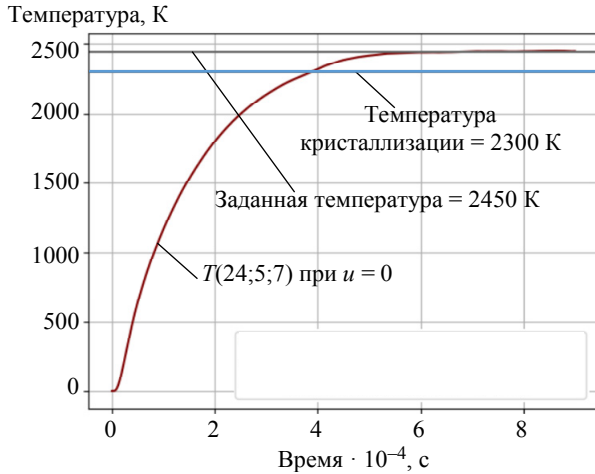


Рис. 8. Графики переходного процесса на предначальном этапе технологического процесса
Fig. 8. Graphs of the transient process at the pre-initial period of the technological process

На основании построенной переходной характеристики, были определены прямые показатели качества процесса регулирования: время регулирования $t = 5000$ с; перерегулирование системы $\sigma \rightarrow 0$; ошибка регулирования $e(t) \rightarrow 0$. Отметим, что при включении в обратную связь РВР можно снизить заданную температуру верхнего нагревателя на 11 %, нижнего нагревателя на 8 %, что в условиях длительности технологического процесса позволит значительно сократить затраты на электроэнергию.

Так как цель управления заключается в поддержании температурных условий $T > 2300$ К на фронте кристаллизации, для оценки качества разработанной системы управления был построен график переходного процесса в точке, принадлежащей фронту кристаллизации (рис. 9).

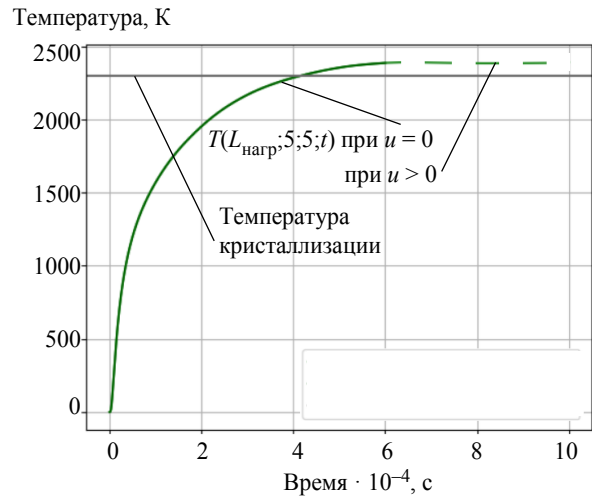


Рис. 9. Графики переходного процесса на первом этапе технологического процесса
Fig. 9. Graphs of the transient process at the first period of the technological process

Из построенного графика переходного процесса видно, что настройки РВР обеспечивают компенсацию влияния охлаждения расплава. Для анализа распределения температуры в компоненте был построен график распределения температуры в кристалле после начала кристаллизации части вещества (рис. 10).

График иллюстрирует распределение температуры в процессе выращивания кристалла, при этом в контейнере находятся шихта и расплав. Из

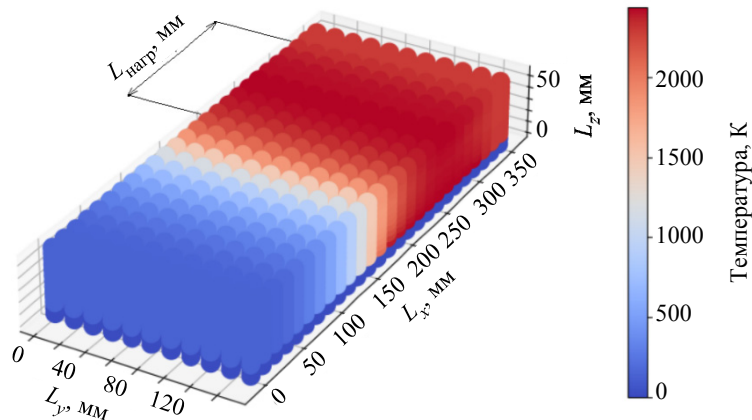


Рис. 10. Распределение температуры в кристалле на первом этапе технологического процесса
Fig. 10. Temperature distribution in the object at the first period of the technological process

графика видно, что полученное распределение температуры на фронте кристаллизации равномерно, из чего можно сделать следующий вывод: синтез регулятора только для секций нижнего нагревателя достаточен и позволяет достичь поставленной цели управления.

Анализ программной реализации модели замкнутой системы управления показал, что рассчитанные настройки распределенного высокоточного регулятора позволяют достичь цели управления: обеспечение требуемых условий на фронте кристаллизации и позволяют сформировать условия, необходимые для осуществления технологического процесса выращивания кристаллов.

Выводы. В данной статье представлены результаты разработки модели системы управления

температурным полем углеграфитового теплового узла при выращивании кристаллов лейкосапфира по методу горизонтальной направленной кристаллизации. Анализ работы замкнутой системы управления показал, что синтез распределенного высокоточного регулятора для секций нижнего нагревателя позволяет обеспечить заданные температурные условия на фронте кристаллизации и достаточен для формирования теплового поля, необходимого для реализации технологического процесса. Однако следует отметить, что управление секциями верхнего нагревателя в рамках данной работы не рассматривалось и стало предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Малюков С. П., Клунникова Ю. В. Оптимизация производства отечественного сапфира // *Современные технологии*. 2015. № 6. С. 24–31.
2. Пат. 187518 U1 (RU) / В. А. Юсим, В. В. Рябченков, С. Э. Саркисов. Узел подачи газа установки для выращивания кристаллов фторидов методом горизонтально направленной кристаллизации. Заявл. 12.14.2018; опубл. 03.11.2019. 8 с.
3. Gurov V. V., Kirdyashkin A. G. Influence of thermal boundary conditions on heat and mass transfer during horizontal directional crystallization // *J. of Crystal Growth*. 2020. Vol. 547. P. 1–6. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2020.125797.
4. Winkler J., Neubert M. Automation of Crystal Growth from Melt. *Handbook of Crystal Growth*, 2015. P. 1143–1184. doi: 10.1016/b978-0-444-63303-3.00028-6. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/B978-0-444-63303-3.00028-6?ysclid=lqcvgjbjr798047704> (дата обращения 21.08.2023).
5. Хачатрян В. А. Исследование и разработка новой теории роста монокристаллов при росте оксидных монокристаллов [лейкосапфира] из высокотемпературного расплава. Ереван: Арарта Лайт, 2011. 314 с.
6. Стефонович В. А. Разработка и исследование технологии получения изделий лейкосапфира для электронной техники: дис. ... канд. техн. наук. Таганрог, Технологический ин-т Южного фед. ун-та, 2009. 20 с.
7. Ильюшин Ю. В., Першин И. М. Метод управления температурным полем на основе функции Грина // *Записки Горного ин-та*. 2015. Т. 214. С. 57–70.
8. Ильюшин Ю. В., Кравцова А. Л., Мардоян М. М. Устойчивость температурного поля распределенной системы управления // *Науч. обозрение*. 2012. № 2. С. 189–197.
9. Ilyushin Y., Mokeev A. Technical realization of the task of controlling the temperature field of a tunnel furnace of a conveyor type // *Intern. J. of Appl. Engin. Research*. 2017. Vol. 12, no. 8. P. 1500–1510.
10. Исследование устойчивости теплового поля туннельной печи конвейерного типа / Ю. В. Ильюшин, А. Л. Кравцова, М. М. Мардоян, А. В. Санкин // *Научное обозрение*. 2012. № 4. С. 114–120.
11. Багдасаров Х. С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит, 2004. 160 с.
12. Малюков С. П., Клунникова Ю. В. Моделирование распределения температуры в процессе роста монокристаллов сапфира методом горизонтальной направленной кристаллизации в трехмерных координатах // *Изв. Южного фед. ун-та. Технические науки*. 2011. № 4. С. 86–94.
13. Багдасаров Х. С., Горяинов Л. А. Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией. М.: Физматлит, 2007. 224 с.
14. Температурная стабильность редкоземельных магнитов, поддерживаемая с помощью магнитокалорического эффекта / Р. Б. Моргунов, В. П. Пискарский, Р. А. Валеев, Д. В. Королев // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. Т. 54, № 1. С. 88–94. doi: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
15. Improving energy efficiency of tunnel furnaces of the pipeline type—the solution of the problem / Y. V. Ilyushin, D. A. Pervukhin, O. V. Afanasyeva, S. V. Kolesnichenko, M. P. Afanasyev // *ARN J. of Engin. and Appl. Sci*. 2017. Vol. 12, no. 6. P. 1801–1812.
16. Ильюшин Ю. В., Кучеренко И. А. Моделирование температурного поля восходящего для процесса бурения нагнетательных скважин добычи полезных ископаемых // *Науч. обозрение*. 2013. № 4. С. 98–101.

Информация об авторах

Фетисов Вадим Георгиевич – канд. техн. наук, ассистент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, ВО, Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: fetisovvg@spmi.ru

Яромич Елизавета Андреевна – студентка гр. АСТМ-23, Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, ВО, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: lizavetayaromich@ya.ru

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

References

1. Maljukov S. P., Klunnikova Ju. V. Optimizacija proizvodstva otechestvennogo safira // *Sovremennye tehnologii*. 2015. № 6. S. 24–31. (In Russ.).
2. Pat. 187518 U1 (RU) / V. A. Jusim, V. V. Rjabchenkov, S. Je. Sarkisov. Uzel podachi gaza ustanovki dlja vyrashhivaniya kristallov ftoridov metodom gorizontaľno napravlennoj kristallizacii. Zajavl. 12.14.2018; opubl. 03.11.2019. 8 s. (In Russ.).
3. Gurov V. V., Kirdyashkin A. G. Influence of thermal boundary conditions on heat and mass transfer during horizontal directional crystallization // *J. of Crystal Growth*. 2020. Vol. 547. P. 1–6. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2020.125797.
4. Winkler J., Neubert M. Automation of Crystal Growth from Melt. *Handbook of Crystal Growth*, 2015. P. 1143–1184. doi: 10.1016/b978-0-444-63303-3.00028-6. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/B978-0-444-63303-3.00028-6?ysclid=lqcvvgbjr798047704> (data obraschenija 21.08.2023).
5. Hachatrjan V. A. Issledovanie i razrabotka novoj teorii rosta monokristallov pri roste oksidnyh monokristallov [lejkosafira] iz vysokotemperaturnogo rasplava. Erevan: Ararta Lajt, 2011. 314 s. (In Russ.).
6. Stefonovich V. A. Razrabotka i issledovanie tehnologii poluchenija izdelij lejkosafira dlja jelektronnoj tehniki: dis. ... kand. tehn. nauk. Taganrog, Tehnologicheskij in-t Juzhnogo fed. un-ta, 2009. 20 s. (In Russ.).
7. Il'jushin Ju. V., Pershin I. M. Metod upravlenija temperaturnym polem na osnove funkcii Grina // *Zapiski Gornogo in-ta*. 2015. T. 214, S. 57–70. (In Russ.).
8. Il'jushin Ju. V., Kravcova A. L., Mardojan M. M. Ustojchivost' temperaturnogo polja raspredelennoj sistemy upravlenija // *Nauch. obozrenie*. 2012. № 2. S. 189–197. (In Russ.).
9. Ilyushin Y., Mokeev A. Technical realization of the task of controlling the temperature field of a tunnel furnace of a conveyor type // *Intern. J. of Appl. Engin. Research*. 2017. Vol. 12, no. 8. P. 1500–1510.
10. Issledovanie ustojchivosti teplovogo polja tunnel'noj pechi konvejernogo tipa / Ju. V. Il'jushin, A. L. Kravcova, M. M. Mardojan, A. V. Sankin // *Nauchnoe obozrenie*. 2012. № 4. S. 114–120. (In Russ.).
11. Bagdasarov H. S. Vysokotemperaturnaja kristallizacija iz rasplava. M.: Fizmatlit, 2004. 160 s. (In Russ.).
12. Maljukov S. P., Klunnikova Ju. V. Modelirovanie raspredelenija temperatury v processe rosta monokristallov safira metod gorizontaľnoj napravlennoj kristallizacii v trehmernyh koordinatah // *Izv. Juzhnogo fed. un-ta. Tehniceskie nauki*. 2011. № 4. S. 86–94. (In Russ.).
13. Bagdasarov H. S., Gorjainov L. A. Teplo- i mas-soperenos pri vyrashhivanii monokristallov napravlennoj kristallizaciej. M.: Fizmatlit, 2007. 224 s. (In Russ.).
14. Temperaturnaja stabil'nost' redkozemel'nyh magnitov, podderzhivaemaja s pomoshh'ju magnitokaloricheskogo jeffekta / R. B. Morgunov, V. P. Piskarskij, R. A. Valeev, D. V. Korolev // *Aviacionnye materialy i tehnologii*. 2019. T. 54, № 1. S. 88–94. doi: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94. (In Russ.).
15. Improving energy efficiency of tunnel furnaces of the pipeline type-the solution of the problem / Y. V. Ilyushin, D. A. Pervukhin, O. V. Afanasyeva, S. V. Kolesnichenko, M. P. Afanasyev // *ARPN J. of Engin. and Appl. Sci*. 2017. Vol. 12, no. 6. P. 1801–1812.
16. Il'jushin Ju. V., Kucherenko I. A. Modelirovanie temperaturnogo polja voshodjashhego dlja processa burenija nagnetatel'nyh skvazhin dobychi poleznyh iskopaemyh // *Nauch. obozrenie*. 2013. № 4. S. 98–101. (In Russ.).

Information about the authors

Vadim G. Fetisov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant at the Department of System Analysis and Management of Saint Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: fetisovvg@spmi.ru

Elizaveta A. Yaromich – student gr. АСТМ-23, Saint Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: lizavetayaromich@ya.ru

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Статья поступила в редакцию 20.10.2023; принята к публикации после рецензирования 10.11.2023; опубликована онлайн 26.02.2024.

Submitted 20.10.2023; accepted 10.11.2023; published online 26.02.2024.
