

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 9.035
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2021 Issue: 11 Volume: 103

Published: 03.11.2021 <http://T-Science.org>

QR – Issue



QR – Article



Oybek Jumaboevich Khudayberdiev

Navoi State Mining Institute,
Navoi city, Republic of Uzbekistan

khudayberdiyev@mail.ru

INTERVAL VERSION OF MATHEMATICAL MODELING OF THE MELT LEVEL OF A CONTINUOUS CASTING MACHINE

Abstract: In this article, an interval version of mathematical modeling of the melt level of a continuous casting machine has been developed. For optimal control, the constancy of the level of the melt in the intermediate tank and in the crystallizer, the dynamics of this process is considered as a logical-dynamic system (LDS). Because the level of the melt is in a certain interval, then these parameters are considered as interval values. As a result, the process of the melt level of the continuous casting machine is modeled in the context of interval analysis.

Key words: melt level, batcher, stopper, intermediate tank, crystallizer, pulling stands, interval, interval values, real variant, interval variant, logical predicates, logic-dynamic system, differential equation.

Language: Russian

Citation: Khudayberdiev, O. J. (2021). Interval version of mathematical modeling of the melt level of a continuous casting machine. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 11 (103), 163-169.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-11-103-7> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2021.11.103.7>

Scopus ASCC: 2600.

ИНТЕРВАЛЬНЫЙ ВАРИАНТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ РАСПЛАВЫ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Аннотация: В данной статье разработан интервальный вариант математического моделирования уровня расплавы машины непрерывного литья заготовок. Для оптимального управления постоянство уровня расплавы в промежуточной ёмкости и в кристаллизаторе, динамика данного процесса рассматривается как логико-динамическая система (ЛДС). Т.к. уровень расплавы находится в некотором промежутке, то эти параметры рассматриваются как интервальные величины. В итоге, технологический процесс уровня расплавы машины непрерывного литья заготовок моделируется в контексте интервального анализа.

Ключевые слова: уровень расплавы, дозатор, стопор, промежуточная ёмкость, кристаллизатор, тянущие клетки, интервал, интервальные величины, вещественный вариант, интервальный вариант, логические предикаты, логико-динамическая система, дифференциальное уравнение.

Введение

Особенностью математических моделей систем управления является то, что они не только содержат априорную информацию о ее динамических свойствах, необходимую для изучения поведения системы в целом, но также отражают процессы получения и обработки текущей информации о цели системы, состоянии объекта и воздействиях среды для принятия решения по оказанию на объект надлежащего управляющего воздействия. Рассматривается математическая модель систем управления

процесса непрерывной разливки стали. Он состоит в том, что жидкий металл из ковша или через промежуточное разливочное устройство непрерывно заливается в верхнюю часть водоохлаждаемого кристаллизатора. После затвердевания металла у стенок кристаллизатора непрерывный слиток при помощи тянущих механизмов перемещается вниз, увлекая за собой формирующийся слиток. При дальнейшем движении по технологическому тракту заготовка разрезается с помощью режущих аппаратов на заданные мерные длины, которые

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 9.035
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

транспортирующимися механизмами передаются в прокатный цех или на склад готовой продукции.

Машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) отличаются большим разнообразием. Различия МНЛЗ состоят в основном в направлении технологической оси машины, т.е. в расположении слитка в процессе литья: вертикальном, радиальном, горизонтальном или наклонном с движущимся или неподвижным кристаллизатором. Одним из распространённых типов установок являются вертикальные МНЛЗ, который изображен на рисунке 1, заимствованный из [1].

Поступление металла из главного сталеразливочного ковша 1 в промежуточную ёмкость 3 происходит через донный разливочный стакан 2, задресселированный специальным огнеупорным стержнем-стопором 5. Промежуточная ёмкость предотвращает попадание шлака в кристаллизатор 4, обеспечивает подачу спокойной струи жидкой стали и позволяет регулировать поступление

металла в кристаллизатор. Подача металла из промежуточной ёмкости в кристаллизатор осуществляется разливкой через донные стаканы-дозаторы 2' и регулированием стока металла через донный стакан с помощью стопора 5'. Стопор и донный стакан в последнем случае образуют специфический регулирующий орган, так называемую стопорную пару.

Целью разработки модели МНЛЗ, по утверждению авторов [1], является выбор управления, обеспечивающего:

а) постоянство уровня расплава в промежуточной ёмкости h_2 . Это позволяет стабилизировать условия всплывания неметаллических включений, выделения газов, а также стабильность гидростатического напора, определяющего условия истечения струи металла в кристаллизатор;

б) постоянство уровня металла в кристаллизаторе h_3 , что обеспечивает стабильность высоты заполнения кристаллизатора жидким металлом.

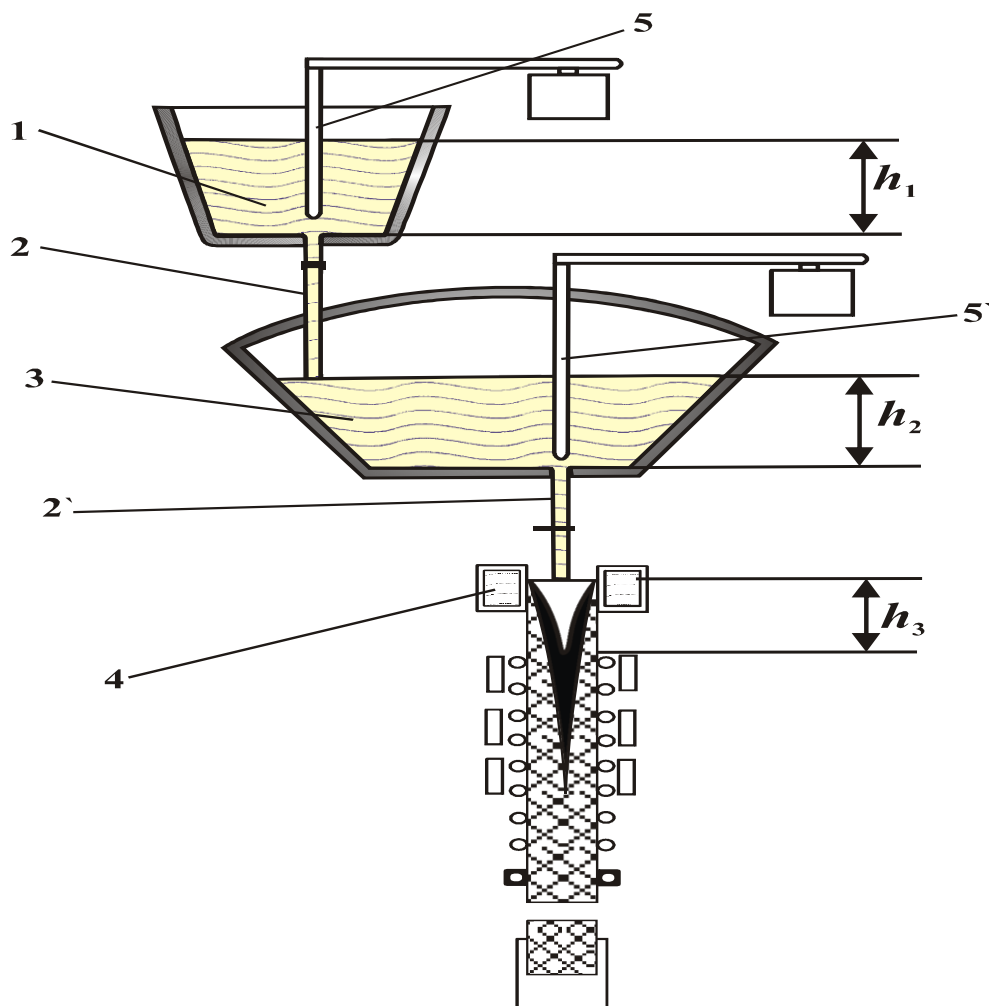


Рис. 1. Схема вертикальной МНЛЗ

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИЦ (Russia) = 3.939
 ESJI (KZ) = 9.035
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

Как показывают авторы [1], выделение входных и выходных параметров модели системы, эта декомпозиция модели на два блока:

«сталеразливочный ковш–промежуточная ёмкость МНЛЗ» S_1 , «промежуточная ёмкость–

кристаллизатор–тянущие клети МНЛЗ» S_2 , связи между этими блоками показаны на рис. 2. Здесь же указаны условные обозначения параметров.

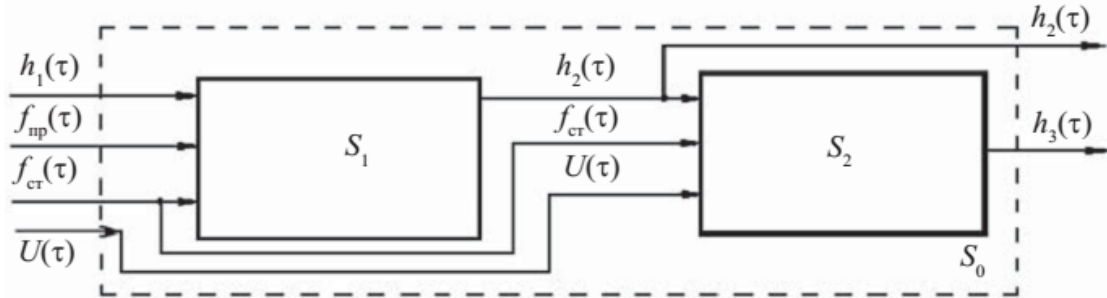


Рис. 2. Декомпозиция модели уровня расплава в МНЛЗ

Для подробного изучения принцип работы МНЛЗ, рассмотрим синтез модели каждого из блоков в отдельности.

§1.1. Динамические свойства подсистемы МНЛЗ

«сталеразливочный ковш–промежуточная ёмкость»

Задачей управления объектом «сталеразливочный ковш–промежуточная ёмкость МНЛЗ» является жёсткая стабилизация уровня металла в промежуточной ёмкости с целью обеспечения стабильных условий всплывания неметаллических включений и выделения газов, а также стабильности статического напора, определяющего условия истечения струи металла из дозатора или стопорного устройства в кристаллизатор.

Ниже приводим вещественный вариант решаемой задачи, т.к. в дальнейшем для описания этой задачи как логико-динамические системы (ЛДС) в интервальном варианте эти данные используются. Дальнейшее изложения рассматривается согласно работам авторов [1].

Динамические свойства подсистемы применительно к сталеразливочным ковшам стопорного типа характеризуются следующим уравнением материального баланса:

$$\rho S_2 dh_2(\tau) = (G_{\text{пр}}(\tau) - G_{\text{ст}}(\tau)) d\tau, \quad (1)$$

где h_2 –текущее значение уровня металла в промежуточной ёмкости; ρ –плотность металла; S_2 –площадь зеркала металла в промежуточной ёмкости; $G_{\text{пр}}$ –приток металла из сталеразливочного ковша; $G_{\text{ст}}$ –сток металла из промежуточной ёмкости. Здесь

$$G_{\text{пр}} = \alpha_{\text{пр}} f_{\text{пр}} \rho \sqrt{h_1}; \quad (2)$$

$$G_{\text{ст}} = \alpha_{\text{ст}} f_{\text{ст}} \rho \sqrt{h}; \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{ст}}$, $\alpha_{\text{пр}}$ –приведённые коэффициенты расхода на сток и приток; $f_{\text{ст}}$, $f_{\text{пр}}$ –проходные сечения в стопорных парах промежуточной ёмкости и сталеразливочного ковша; h_1 –уровень металла в сталеразливочном ковше. Тогда уравнение (1.1) примет вид

$$S_2 \dot{h}_2(\tau) + \alpha_{\text{ст}} f_{\text{ст}} \rho \sqrt{h_2(\tau)} = \alpha_{\text{пр}} f_{\text{пр}} \rho \sqrt{h_1} \quad (4)$$

Следовательно, динамика изменения уровня металла в промежуточной ёмкости МНЛЗ характеризуется нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка.

Используя метод линеаризации, линеаризуем уравнение (4) в окрестностях точек $h_2=h_{20}$, $h_1=h_{10}$, $f_{\text{ст}}(\tau)=f_{\text{ст}0}$, $f_{\text{пр}}(\tau)=f_{\text{пр}0}$, номинальные (средние) значения уровня расплава в промежуточной ёмкости, сталеразливочном ковше, проходные сечения в стопорных парах промежуточной ёмкости и сталеразливочного ковша [1].

Опуская промежуточные выкладки получим:

$$S_2 \Delta \dot{h}_2(\tau) + \frac{\alpha_{\text{ст}} f_{\text{ст}0}}{2\sqrt{h_{20}}} \Delta h_2(\tau) = \alpha_{\text{пр}} f_{\text{пр}0} \rho \sqrt{h_{10}} + \frac{\alpha_{\text{пр}} f_{\text{пр}0}}{2\sqrt{h_{10}(\tau)}} \Delta h_1(\tau) - \alpha_{\text{ст}} \Delta f_{\text{ст}}(\tau) \sqrt{h_{20}}, \quad (5)$$

где $\Delta h_2(\tau)$, $\Delta f_{\text{пр}}(\tau)$, $\Delta f_{\text{ст}}(\tau)$, $\Delta h_1(\tau)$ – приращения соответствующих параметров от их номинальных (равновесных) значений [1].

Осуществив перегруппировку членов уравнения, получим линейное дифференциальное уравнение в отклонениях, которое характеризует динамику изменения уровня в промежуточной ёмкости при различных возмущениях [1]:

$$T_1 \Delta \dot{h}_2(\tau) + \Delta h_2(\tau) = k_1 \Delta f_{\text{пр}}(\tau) + k_2 \Delta f_{\text{ст}}(\tau) + k_3 \Delta h_1(\tau), \quad (6)$$

где

$$T_1 = \frac{2F_2 \sqrt{h_{20}}}{\alpha_{\text{ст}} f_{\text{ст}0}}; k_1 = \frac{2\alpha_{\text{пр}} \sqrt{h_{10} h_{20}}}{\alpha_{\text{ст}} f_{\text{ст}0}}; k_2 = -\frac{2h_{20}}{f_{\text{ст}0}};$$

$$k_2 = \frac{2h_{20}}{f_{ct0}}; k_3 = \frac{\alpha_{np}f_{np0}}{\alpha_{ct}f_{ct0}} \sqrt{\frac{h_{20}}{h_{10}}}. \quad (7)$$

Имея в виду, что

$$f_{ct0} = \frac{SV}{\alpha_{ct}\sqrt{h_{20}}}; f_{np0} = \frac{SV}{\alpha_{np}\sqrt{h_{10}}}, \quad (8)$$

где S –площадь сечения заготовки; V –скорость вытягивания слитка, можно представить коэффициенты выражений (7) в другом виде:

$$T_1 = \frac{2F_2h_{20}}{SV}; k_1 = \frac{2\alpha_{np}\sqrt{h_{10}}}{SV};$$

$$k_2 = -\frac{2\alpha_{ct}h_{20}\sqrt{h_{20}}}{f_{ct0}}; k_3 = \frac{h_{20}}{h_{10}}. \quad (9)$$

Правая часть уравнения (6) показывает, что возмущения в объекте проходят по каналу регулирующего воздействия $\Delta f_{np}(\tau)$ и каналам нерегулируемых входных параметров (возмущений) $\Delta h_1(\tau)$, $\Delta f_{ct}(\tau)$.

Так как модель этой подсистемы описывается линейным уравнением, то для неё справедливы принцип суперпозиции. Считая, что каналы входных параметров автономны, разбиваем его на три уравнения. Левые части этих уравнений одинаковы, а правые отличаются характеристиками входных воздействий:

$$\begin{cases} T_1 \Delta \dot{h}_{2,1}(\tau) + \Delta h_{2,1}(\tau) = k_1 f_{np}(\tau) \\ T_1 \Delta \dot{h}_{2,2}(\tau) + \Delta h_{2,2}(\tau) = k_2 \Delta f_{ct}(\tau) \\ T_1 \Delta \dot{h}_{2,3}(\tau) + \Delta h_{2,3}(\tau) = k_3 \Delta h_1(\tau), \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta h_2(\tau) = \Delta h_{2,1}(\tau) + \Delta h_{2,2}(\tau) + \Delta h_{2,3}(\tau), \quad (11)$$

с начальными условиями:

$$\Delta h_{2,1}(0) = 0; \Delta h_{2,2}(0) = 0; \Delta h_{2,3}(0) = 0. \quad (12)$$

Решение уравнения (10), например, при однократном ступенчатом возмущении Δf_{np} описывается в виде [1]:

$$\Delta h_{2,1}(\tau) = k_1 f_{np}(\tau) (1 - e^{-\tau/T}). \quad (13)$$

По другим каналам это выражение отличается лишь постоянным множителем в правой части уравнения (13). Аналогично определяется и новое установившееся значение уровня металла в промежуточной ёмкости по другим каналам входных воздействий.

Замечание: в дальнейшем будем использовать только линеаризованные уравнения, записанные относительно отклонений от установившихся значений переменных, однако для сокращения записи знак « Δ » будем опускать.

§1.2. Динамические свойства подсистемы МНЛЗ

«промежуточная ёмкость–кристаллизатор–тянущие клети»

Задача управления процессом стабилизации уровня металла в кристаллизаторе h_3 является важнейшей задачей технологии непрерывной разливки стали. Управление уровнем металла в кристаллизаторе должно обеспечить стабилизацию высоты заполнения кристаллизатора жидким металлом в ходе разливки и, таким образом, при прочих равных

условиях обеспечить неизменную толщину стенок слитка при выходе его из кристаллизатора. Управление должно и исключить случаи перелива жидкого металла через кристаллизатор и недопустимого снижения уровня, которые могут привести к ослаблению стенок слитка и прорыву жидкого металла [1].

Возможны два метода стабилизации уровня металла в кристаллизаторе: с помощью изменения притока жидкого металла из промежуточной ёмкости в кристаллизатор при постоянной скорости вытягивания слитка и изменение скорости вытягивания слитка из кристаллизатора при беспрепятственном истечении металла из промежуточной ёмкости.

Динамические свойства этого объекта характеризуются следующим уравнением материального баланса [1]:

$$\rho S dh_3(\tau) = (G_{ct}(\tau) - \rho SV(\tau)) d\tau \quad (14)$$

где S –площадь сечения отливаемой заготовки; V – скорость вытягивания слитка; ρ –плотность металла; $h_3(\tau)$ –текущее значения уровня металла в кристаллизаторе.

Принимая уровень металла в промежуточной ёмкости постоянным в стационарном режиме литья, преобразуем уравнение (14) к виду

$$\dot{h}_3(\tau) = \frac{\alpha_{ct}\sqrt{h_{20}}}{S} f_{ct}(\tau) - V(\tau). \quad (15)$$

На основании известных характеристик электрооборудования МНЛЗ можно считать [2], что связь между скоростью вытягивания клети V непрерывного слитка и управляющим воздействием на привод $\Delta U(\tau)$ описывается дифференциальным уравнением первого порядка с постоянными коэффициентами:

$$T \dot{V}(\tau) + V(\tau) = k_5 U(\tau), \quad (16)$$

где T – постоянная времени электропривода; k_5 – коэффициент передачи по каналу управления скоростью вытягивания слитка.

Отсюда следует, что математическое описание подсистемы «промежуточная ёмкость–кристаллизатор–тянущие клети» сводится к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которые в стационарном состоянии ($h_3=h_{30}=\text{const}$; $V=V_0=\text{const}$) запишутся в виде [1]:

$$\begin{cases} \dot{h}_3(\tau) = k_4 f_{ct}(\tau) - V(\tau) \\ T \dot{V}(\tau) + V(\tau) = k_5 U(\tau), \end{cases} \quad (17)$$

с начальными условиями:

$$h_3(0) = 0; V(0) = 0, \quad (18)$$

где $k_4 = \frac{\alpha_{ct}\sqrt{h_{20}}}{S}$ –коэффициент передачи по каналу изменения площади проходного сечения в промежуточной ёмкости.

Нужно заметить, что при стопорном дозировании металла в рассматриваемой подсистеме управляющим воздействием является площадь проходного сечения $\Delta f_{ct}(\tau)$, а скорость вытягивания слитка следует считать внешним

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИЦ (Russia) = 3.939
 ESJI (KZ) = 9.035
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

воздействием. При дозированной разливке управление производится изменением управляющего в тянущих клетей воздействия $\Delta U(\tau)$ на привод тянущих клетей по каналу изменения скорости вытягивания слитка, а основные внешние воздействия проходят по каналу изменения площади проходного сечения дозаторного стакана $\Delta f_{ct}(\tau)$.

В вещественном варианте, т.е. при условии детерминированности величин, уравнения (6) и (15) как логико-дифференциальные уравнения (ЛДУ), записывается в следующем виде:

$$\dot{h}_2(\tau) = \frac{1}{T_1} [k_1 \sum_i L_i^{fn} f_{np}(\tau) + k_2 \sum_j L_j^{fc} f_{ct}(\tau) + k_3 h_1(\tau) - h_2(\tau)],$$

$$i=1,2; j=1,2; \quad (19)$$

$$\dot{h}_3(\tau) = k_4 L_m^{fc} f_{ct}(\tau) - V(\tau), \quad (20)$$

с начальными условиями

$$h_1(0) = h_{10}, h_2(0) = h_{20}, h_3(0) = h_{30},$$

$$V(0) = V_0, f_{ct}(0) = f_{ct0}, f_{np}(0) = f_{np0}. \quad (21)$$

В уравнениях (19) и (20) логические переменные подчиняются условиям единственности [5]:

$$L_i^{fn} \cap L_j^{fc} = 0, L_m^{fc} \cap L_j^{fc} = 0, L_i^{fn} \cap L_m^{fc} = 0,$$

$$i \neq j, m \neq j, i \neq m, \quad (22)$$

и полноты

$$\cup_i L_i^{fn} = 1, \cup_j L_j^{fc} = 1, \cup_m L_m^{fc} = 1,$$

$$i=1,2; j=1,2; m=1,2. \quad (23)$$

Решение уравнения (19) с учетом начальных условий и использованием логического предиката, при однократном ступенчатом возмущении f_{np} описывается в виде [1]:

$$h_{2,1}(\tau) = k_1 f_{np}(\tau) (1 - e^{-\tau/T_1}), \quad i = 1,2. \quad (24)$$

Аналогично определяется и новое установившееся значение уровня металла в промежуточной ёмкости по другим каналам входных воздействий.

Теперь уравнения (19) и (20) запишем, как логико-динамическую систему (ЛДС) [5, 7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{h}_2(\tau) = \frac{1}{T_1} [k_1 L_i^{fn} f_{np}(\tau) + k_2 L_j^{fc} f_{ct}(\tau) + k_3 \Delta h_1(\tau) - h_2(\tau)], \\ \dot{h}_3(\tau) = k_4 L_m^{fc} f_{ct}(\tau) - V(\tau), \\ L_i^{fn} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = 1 \\ 0, & \text{если } i = 2, \end{cases} \\ L_j^{fc} = \begin{cases} 0, & \text{если } j = 1 \\ 1, & \text{если } j = 2, \end{cases} \\ L_m^{fc} = \begin{cases} 1, & \text{если } m = 1 \\ 0, & \text{если } m = 2. \end{cases} \end{array} \right. \quad (25)$$

с начальными и логическими условиями (22)-(23).

Настоящее время для поиска путей кардинального энергетического совершенствования современных и перспективных технологических процессов, в том числе и с учётом экологических факторов,

требуется перейти на новые идейные и концептуальные основы. Наступило время рассмотрения технических и природных систем в неразрывной динамической взаимосвязи, когда протекающие в них технологические и экологические процессы оказывают непосредственное динамическое влияние друг на друга.

§1.3. Интервальный вариант динамического свойства подсистемы МНЛЗ «промежуточная ёмкость-кристаллизатор-тянущие клетки»

При реализации описываемого метода, а именно, при определении реального решения уравнения вида (19-20) и систему уравнений (25), на ЭВМ возникают также и ошибки округлений, влияние которых в совокупности с другими источниками погрешности может оказаться существенным для определения структурных и локальных состояний. Для одновременного учета всевозможных источников погрешностей при разрешении моделей типа ЛДС, а также из сущности постановки задачи следует, т.е. выбора управления обеспечивающего постоянства уровней расплава в промежуточной ёмкости h_2 и металла в кристаллизаторе h_3 , что величины h_2, h_3 и скорость вытягивания клетки V , могут принимать значения из некоторого промежутка заданном технологическим регламентом. В этой связи, эти величины могут рассмотрены как интервальные переменные и предлагается использовать методы интервального анализа.

Учитывая вышесказанное, изложим интервальный вариант изучаемых задач.

Замечание: для получения интервальных обобщенных и/или естественных расширений той или иной вещественных функций используем определения приведенных в [3, 4].

Отметим, что через $\tau = [\underline{\tau}, \bar{\tau}]$ обозначен интервал, где $\underline{\tau}$ и $\bar{\tau}$ означают нижнюю и верхнюю границу интервала τ , а $H(\tau), f(\tau), V(\tau)$ интервальнозначные функции, h шаг интегрирования.

В интервальном варианте, т.е. при условии недетерминированности величин, уравнения (19) и (20) как логико-дифференциальное уравнение (ЛДУ), записывается в следующем виде:

$$\dot{H}_2(\tau) = \frac{1}{T_1} [k_1 \sum_i L_i^{fn} f_{np}(\tau) + k_2 \sum_j L_j^{fc} f_{ct}(\tau) + k_3 H_1(\tau) - H_2(\tau)],$$

$$i=1,2; j=1,2; \quad (26)$$

$$\dot{H}_3(\tau) = k_4 L_m^{fc} f_{ct}(\tau) - V(\tau), \quad (27)$$

с начальными условиями

$$h_{10} \in H_{10}, h_{20} \in H_{20}, h_{30} \in H_{30}, V_0 \in V_0, f_{ct0} \in f_{ct0},$$

$$f_{np0} \in f_{np0}, \quad (28)$$

здесь $\tau \in \tau = [\underline{\tau}, \bar{\tau}]$.

Для решения интервальной задачи Коши

$$\dot{H}_3(\tau) = k_4 f_{ct}(\tau) - V(\tau), \quad (29)$$

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 9.035
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

$$h_3(\tau_0) \in H_0, \quad (30)$$

где H_0 – некий замкнутый интервал, содержащий неточно заданное начальное значение, можно применить метод s -го порядка из [4], который является интервальным аналогом явного метода Рунге-Кутты. Однако, при решении систем уравнений, как известно [4] явные методы Рунге-Кутты, подвержены “эффекту раскрутки” и обычно при большом числе переменных исключаются из рассмотрения, поскольку с увеличением порядка метода, быстро растут вычислительные затраты, а область устойчивости является ограниченной. В нашем случае, число аргументов моделирующей функции равно двум:

- постоянство уровня расплава в промежуточной ёмкости h_2 . Это позволяет стабилизировать условия всплывания неметаллических включений, выделения газов, а также стабильность гидростатического напора, определяющего условия истечения струи металла в кристаллизатор;

- постоянство уровня металла в кристаллизаторе h_3 , что обеспечивает стабильность высоты заполнения кристаллизатора жидким металлом и таким образом при прочих равных условиях обеспечит неизменную толщину стенок слитка при выходе из кристаллизатора. Управление должно исключить случаи прорыва жидкого металла через кристаллизатор и перелив жидкого металла через горловину кристаллизатора.

Пусть при любом $H(\tau_0)$ из H_0 задача (26)–(27) имеет единственное решение [4]. Тогда для определения на $\Delta_\tau = [\tau_0, c]$ интервалов $H(\tau_j) \in H_j$ таких, что

$$H(\tau_j) \in H, \tau_j = \tau_0 + jh \in \tau, h = \frac{(c - \tau_0)}{n}, \quad (j = \overline{1, n}), \quad (31)$$

можно использовать полуявные формулы Рунге-Кутты [3,4].

Заметим, что вещественные и интервальные методы решения задачи Коши, минимизирующие невязку путём аппроксимации её значения многочленами, относятся к классу конечно-разностных методов. Имеет место следующая:

Теорема. Для интервалов H_j , вычисленных по одному из интервальных аналогов конечно-разностных методов, справедливы включения

$$H(\tau_j) \in H_j, \tau_j = \tau_0 + jh \in \tau, h = \frac{(c - \tau_0)}{n}, \quad (j = \overline{1, n}) \quad (33)$$

и оценка ширины интервального решения

$$\omega(H_j) \leq a\omega(H_0) + bh^s, \quad (34)$$

где константы a и b не зависят от шага интегрирования h , а $h(\tau_0)$ принадлежит интервалу H_0 из $\Delta_\tau = [\tau_0, c]$.

Доказательство.

Доказательство включений (33) проводится аналогично доказательству соответствующей теоремы включения для случая явного интервального метода Рунге-Кутты из [4] с использованием основной теоремы интервальной арифметики [3]. Оно здесь опускается из соображений краткости.

Вывод

В этой статье построена и исследована интервальная модель процесса машин непрерывного литья заготовок. Приведен метод решения этой задачи и получена оценка ширины интервального решения. Так как по реальному объекту на практике расчеты проводятся с учетом всех источников погрешностей в рамках интервальной арифметики, то полученные по данной модели результаты будут давать гарантированные двусторонние приближения на прогнозируемые показатели процесса литья заготовки.

References:

1. Spirin, N.A., et al. (2014). *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh processov v ASU TP.* (p.558). Ekaterinburg: OOO «UIPC».
2. Borisov, B.M., Bol'shakov, V.E., Malarjov, V.I., & Proskurjakov, R.M. (2002). *Matematicheskoe modelirovanie i raschet sistem upravlenija tehniceskimi ob#ektami.* Uchebnoe posobie. (p.630). SPb.
3. Borisov, B.M. (1999). *Matematicheskie modeli i raschet sistem upravlenija tehniceskimi ob#ektami:* Uchebnoe posobie. (p.45). SPb.
4. Sharyj, S.P. (2019). *Konechnomernyj interval'nyj analiz.* (p.630). Novosibirsk: Izdatel'stvo «XYZ».
5. Kalmykov, S.A., Shokin, Jy.I., & Jyldashev, Z.H. (1986). *Metody interval'nogo analiza.* (p.224). Novosibirsk: Nauka.

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
PIHII (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 9.035
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

6. Zhuk, K.D., Timchenko, A.A., & Dolenko, T.I. (1975). *Issledovanie struktur i modelirovanija logiko-dinamicheskikh sistem.* (p.197). Kiev: Naukova dumka.
7. Khudayberdiyev, O. (2020). Generalized Equation of a Straight Line in the Interval Version. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, Vol 23, No 2, pp. 537-544.
8. Abdukadyrov, A.A., Hudajberdiyev, O.Zh., & Jyldashev, Z.H. (1996). *Logiko-dinamicheskie modeli i interval'nye metody issledovanija mnogorezhimnyh ob#ektov.* (p.17). Tashkent: Dep. v GFNTI GKNT RUZ. ot 14.06.96, №2560.
9. Abdukadyrov, A.A., Hudajberdiyev, O.Zh., & Jyldashev, Z.H. (2002). O bezopasnosti funkcionirovanija mnogorezhimnyh sistem. *Vychislitel'nye tehnologii (sovmestnyj vypusk) Vestnik KazNU*, T.4, №7, pp.197-203.
10. Rogalev, A.N. (1995). Nahozhdenie optimal'nyh garantirovannyh ocenok mnozhestv reshenij sistem ODU s interval'nymi dannymi. *Vych. tehnol.*, Novosibirsk, T. 4, №13, pp.58-64.
11. Hudajberdiyev, O.Zh. (2005). Ob interval'nom modelirovanii i reshenii logiko-dinamicheskikh sistem. *Gornyj vestnik Uzbekistana. Nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal*, №1, pp.61-63.
12. Jysupbekv, N.R., Jyldashev, Z.H., Abdukadyrov, A.A., & Hudajberdiyev, O.Zh. (2007). *Avtomatizirovannaja sistema prinjatija upravlencheskih reshenij mnogorezhimnymi tehnologicheskimi ob#ektami.* Materialy Respublikanskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «ISTIQLOL» (s mezhdunarodnym uchastiem) «Geotehnologija: innovacionnye metody nedropol'zovanija v XXI veke». (pp.387-388). Moskva-Navoij.