

УДК 621.746

Эмулятор системы диагностики теплового состояния кристаллизатора МНЛЗ в среде LabVIEW.

А.Ю. Харитонов, А.Б. Бирюков, А.В. Алиференко, А.В. Сныткина

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

кафедра компьютерного моделирования и дизайна

ant.kharytonov@gmail.com

Харитонов А.Ю., Бирюков А.Б., Алиференко А.В., Сныткина А.В. Эмулятор системы диагностики теплового состояния кристаллизатора МНЛЗ в среде LabVIEW. В данной статье исследована проблема диагностики и мониторинга тепловых процессов в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок. Создана модель системы диагностики теплотехнических процессов в кристаллизаторе в среде LabVIEW.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, тепловые процессы, кристаллизатор, LabVIEW.

Введение

В настоящее время вопросы тепловой работы кристаллизаторов МНЛЗ остаются актуальными. Одним из способов решения проблемы являются диагностика и мониторинг. Целью статьи является создание программы для диагностики и мониторинга тепловых процессов в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок.

Постановка и реализация задачи

Одним из важнейших элементов, определяющих рациональную работу сталеразливочного комплекса и качество непрерывнолитой заготовки, является кристаллизатор. Применяются кристаллизаторы различного типа для сортовых и слябовых МНЛЗ, однако общая идея работы этого узла состоит в том, что во внутреннюю полость заливается жидкий металл из промежуточного ковша, а теплота, которая выделяется при охлаждении расплава отводится через металлическую стенку [1, 2]. Для сортовых МНЛЗ применяют гильзовые кристаллизаторы, основным элементом которых является медная гильза (рис. 1) [3].

В рамках концепции эффективной толщины газового зазора качестве ключевых величин целесообразно использовать среднюю плотность теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе ($\bar{q}$), среднее значение коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе ($\bar{k}$), средний коэффициент теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора ($\bar{\alpha}$), эффективную толщину газового зазора ($\delta_{эф}$).

Ниже приведен пример расчетного определения усредненных значений названных величин для исходных данных. Сечение разливаемой заготовки составляет 120x120 мм, а длина кристаллизатора – 750 мм [4].

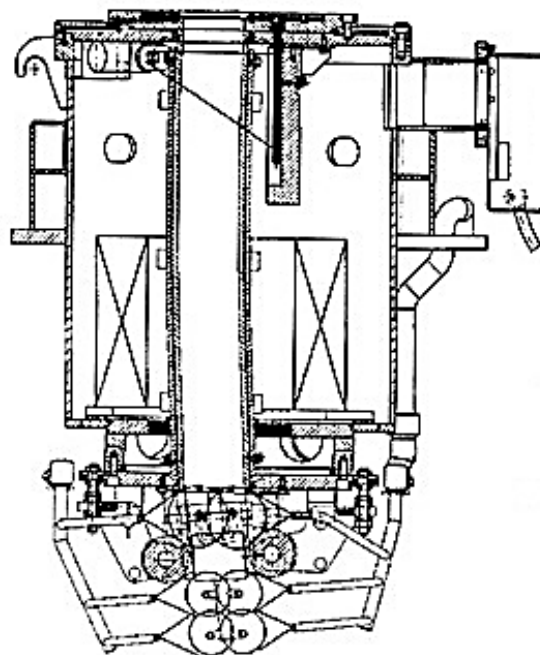


Рисунок 1 – Чертеж кристаллизатора сортовой МНЛЗ

Значение средней плотности теплового потока может быть определено из уравнения усредненного теплового баланса кристаллизатора:

$$G \cdot c \cdot \Delta t = \bar{q} \cdot F, \quad (1)$$

где G - массовый расход воды через кристаллизатор, кг/с;
 c - теплоемкость воды, кДж/(кг·К);
 Δt - перепад температур охлаждающей воды в кристаллизаторе, °С;
 F - поверхность контакта заготовки и кристаллизатора, м².

$$\bar{q} = \frac{G \cdot c \cdot \Delta t}{F} = \frac{1700}{60} \cdot 4,2 \cdot 10^3 \cdot 6,325 = 2007133 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

С точки зрения закона теплопередачи средняя плотность теплового потока может быть выражена как

$$\bar{q} = \bar{k} \cdot (t_s - t_w^{av}), \quad (2)$$

где t_s - температура солидуса для разливаемой марки стали, °С;
 t_w^{av} - средняя температура охлаждающей воды в кристаллизаторе, °С.

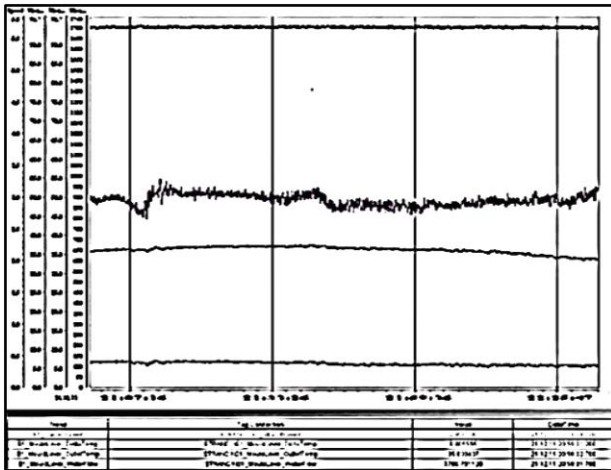


Рисунок 2 – Изменение во времени величин, характеризующих тепловую работу кристаллизатора

Поскольку в качестве движущей силы теплопередачи в выражении (2) взята разница температур от солидуса до средней температуры охлаждающей воды, значение $\bar{k}$ представляет собой «проводимость» тепловой цепи, включающей в себя термические сопротивления передаче тепла через твердую корку, через газовый зазор, через стенку гильзы кристаллизатора и от ее наружной поверхности к охлаждающей воде.

Определив среднюю плотность теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе из уравнения теплового баланса (1), среднее значение коэффициента

теплопередачи в кристаллизаторе рассчитывается:

$$\bar{k} = \frac{\bar{q}}{(t_s - t_w^{av})} = \frac{2007133}{(1480 - 33)} = 1387,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Используя с некоторым допущением зависимости, справедливые для стационарного теплообмена, можно записать зависимость среднего коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе от всех термических сопротивлений

$$\bar{k} = \frac{\bar{q}}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\bar{\alpha}} + \frac{\delta_k}{\lambda_k}}, \quad (3)$$

где α_w - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности гильзы кристаллизатора к воде, Вт/(м²·К);

δ_m - толщина стенки гильзы кристаллизатора, м;

λ_m - коэффициент теплопроводности материала гильзы кристаллизатора, Вт/(м·К);

δ_k - средняя толщина корки металла в кристаллизаторе, м;

λ_k - коэффициент теплопроводности корки заготовки при ее средней температуре, Вт/(м·К).

При помощи уравнения (3) определяется средний коэффициент теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{k}} - \frac{1}{\alpha_w} - \frac{\delta_m}{\lambda_m} - \frac{\delta_k}{\lambda_k}}, \quad (4)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{1387,1} - \frac{1}{5000} - \frac{0,01}{360} - \frac{0,007}{34}} = 3487,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Эта величина несет интегральную информацию о тепломеханических процессах, протекающих в кристаллизаторе. Анализ ее значений для кристаллизаторов различной конусности позволит уточнить представления о механизме теплообмена в полости кристаллизатора. Так, зная величину $\bar{\alpha}$, можно определить значение эффективной толщины газового зазора между коркой заготовки и внутренней поверхностью гильзы кристаллизатора ($\delta_{эф}$). Поскольку при использовании величины эффективной толщины газового зазора для изучения теплообмена в кристаллизаторе предполагается, что тепловой поток от поверхности заготовки формируется

только по двум механизмам: излучением и теплопроводностью через газовый зазор, будет получено следующее выражение для определения $\delta_{эф}$:

$$\delta_{эф} = \frac{\lambda_3}{(\bar{\alpha} - \alpha_l)}, \quad (5)$$

где λ_3 – теплопроводность газовой прослойки, Вт/(м·К);

α_l – коэффициент лучистой теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора, Вт/(м²·К).

Величина α_l определяется на основании известной зависимости, описывающей лучистый теплообмен:

$$\alpha_l = \frac{C_{пр} \cdot \left[\left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right]}{T_{п} - T_{ст}}, \quad (6)$$

где $T_{п}$ – температура поверхности заготовки, К;

$T_{ст}$ – температура внутренней поверхности гильзы кристаллизатора, К;

$C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения при лучистом теплообмене между поверхностью заготовки и внутренней поверхностью гильзы кристаллизатора.

Значения $T_{п}$ и $T_{ст}$ могут быть с достаточно небольшой погрешностью определены на основании зависимостей, справедливых для стационарной теплопередачи через ряд последовательно включенных термических сопротивлений:

$$T_{п} = t_w^{av} + \bar{q} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\bar{\alpha}} \right) + 237, \quad (7)$$

$$T_{ст} = t_w^{av} + \bar{q} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} \right) + 237.$$

$$T_{п} = 33 + 2007133 \cdot \left(\frac{1}{5000} + \frac{0,01}{360} + \frac{1}{3487,1} \right) + 237 = 1340 \text{ К}$$

$$T_{ст} = 33 + 2007133 \cdot \left(\frac{1}{5000} + \frac{0,01}{360} \right) + 237 = 763 \text{ К}$$

$$\alpha_l = \frac{5,6 \cdot 0,62 \cdot \left[\left(\frac{1340}{100} \right)^4 - \left(\frac{763}{100} \right)^4 \right]}{1340 - 763} = 173,59 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\delta_{эф} = \frac{0,09}{(3487,1 - 173,59)} = 2,72 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Так, численно показано, что с помощью предложенных зависимостей (1-7) в рамках системы АСУ ТП в режиме реального времени можно определять изменение значений всех заявленных величин ($\bar{q}$, $\bar{k}$, $\bar{\alpha}$, $\delta_{эф}$) в зависимости

от таких аргументов как перепад температуры охлаждающей воды в кристаллизаторе, расход первичной воды, теплофизические характеристики разливаемой стали, геометрические параметры гильзы кристаллизатора (рис. 3) [4].

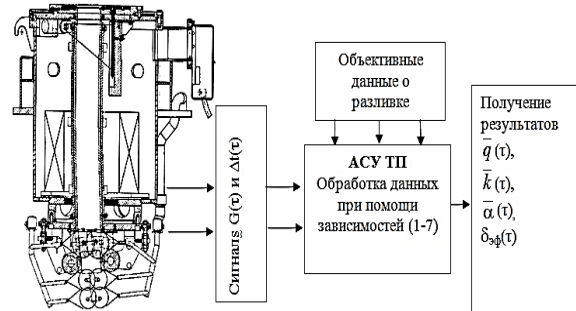


Рисунок 3 – Схема получения информации об изменении величин, дающих углубленное представление о тепловых процессах, которые протекают в кристаллизаторе, в режиме реального времени

Разработка программного продукта

LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) — это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments (США) [5].

Благодаря мощной системе проектирования LabVIEW появляется возможность построить любую измерительную или управляющую систему за кратчайшее время. В отличие от универсальных инструментов, LabVIEW тесно интегрирует любое оборудование с обширным анализом и библиотеками обработки сигналов, предлагает пользовательские графические пользовательские интерфейсы и позволяет развертывать эти системы на платформе, которая использует новейшие и самые передовые технологии [6].

Программное обеспечение для проектирования систем LabVIEW интегрируется практически с любым оборудованием любого поставщика в одной среде и помогает экономить время разработки благодаря удобству функций и согласованной структуре программирования на всех аппаратных средствах [7].

В LabVIEW возможно использование всех измерительных и управляющих аппаратных средств в одной среде разработки. LabVIEW позволяет интегрирование с различными типами приборов, шин и датчиков. Например, LabVIEW интегрируется с различными устройствами сбора

данных, настольными приборами, модульными приборами и FPGA [8].

С помощью программного обеспечения для проектирования систем LabVIEW имеется возможность быстро разработать пользовательские интерфейсы для визуализации данных и ввода оператора.

Можно интегрировать графические, текстовые и другие подходы к программированию в единой среде, чтобы эффективно создавать собственные программные решения. LabVIEW взаимодействует с Python, ANSI C, .NET и др.

Программа LabVIEW называется виртуальным прибором и состоит из двух частей: блок-диаграммы, описывающей логику работы виртуального прибора и лицевой панели, описывающей внешний интерфейс виртуального прибора. Виртуальные приборы могут использоваться в качестве составных частей для построения других виртуальных приборов [9].

Лицевая панель виртуального прибора содержит средства ввода-вывода, кнопки, переключатели, светодиоды, шкалы и т.п. Они служат для управления виртуальным прибором.

Блок-диаграмма содержит функциональные узлы, являющиеся источниками и средствами обработки данных. Также компонентами блок-диаграммы являются терминалы и управляющие структуры. Функциональные узлы и терминалы объединены в единую схему линиями связей.

Код, написанный на LabVIEW, автоматически масштабируется для работы с несколькими ядрами при перемещении в многоядерный CPU без внесения каких-либо изменений в код и без ручного распределения потоков [10].

Особенностью LabVIEW является создание дистрибутива, в который включено программное обеспечение для корректной работы программы.

В данной среде была разработана программа «Krystallizator», в которой эмулируются сигналы расхода охлаждающей воды в кристаллизаторе (G) и перепада температур на входе и на выходе из кристаллизатора (Δt), а также на основании заданных параметров объекта (рис. 4) рассчитываются средняя плотность теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе ($\bar{q}$), среднее значение коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе ($\bar{K}$), средний коэффициент теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора ($\bar{\alpha}$), эффективная толщина газового зазора ($\bar{\delta}_{эф}$) (рис. 5).

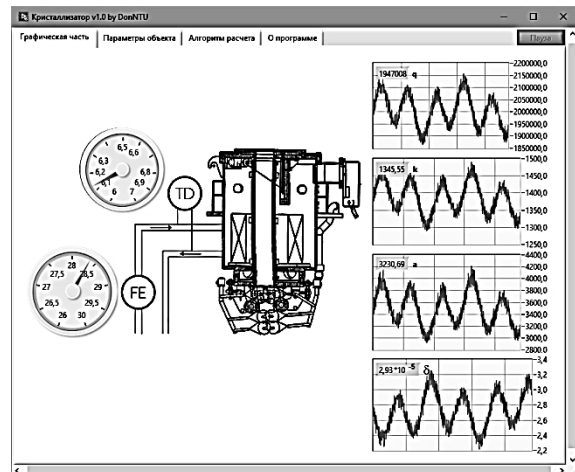


Рисунок 4 – Вкладка «Параметры объекта» на фронтальной панели программы «Krystallizator»

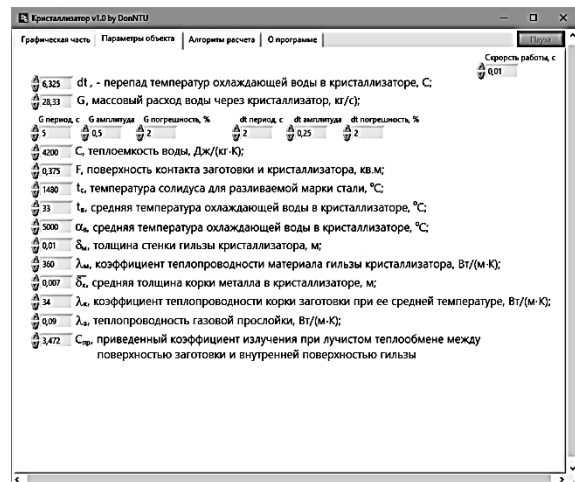


Рисунок 5 – Вкладка «Графическая часть» на фронтальной панели программы «Krystallizator»

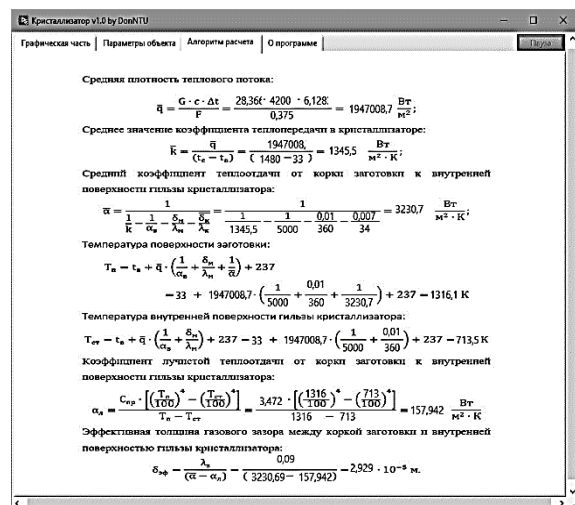


Рисунок 6 – Вкладка «Алгоритмы расчета» на фронтальной панели программы «Krystallizator»

Также на вкладке «Алгоритмы расчета» можно увидеть расчет данных параметров, а также расчет температуры поверхности заготовки (T_n), температуры внутренней поверхности гильзы кристаллизатора ($T_{ст}$), коэффициента лучистой теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора (α_n) (рис. 6). На блок-диаграмме данной программы используются управляющие структуры такие, как условный оператор «Case Structure», оператор цикла «While loop».

Оператор цикла «While Loop» используется для того, чтобы полученный программный продукт не переставал производить вычисления и работал в режиме реального времени. Для эмуляции сигналов расхода охлаждающей воды в кристаллизаторе (G) и перепада температур на входе и на выходе (Δt) используется функция «Basic Function Generator». Для отображения на фронтальной панели нескольких вкладок используется «Tab Control». Управляющие элементы, в которые заносятся исходные данные, называются «Numeric Control». На блок-диаграмме они расположены в левом верхнем углу. Получаемые значения, которые отображаются на вкладке «Алгоритмы расчета» на фронтальной панели сохраняются в «Numeric Indicator». Блок-диаграмма программы представлена на рис. 7.

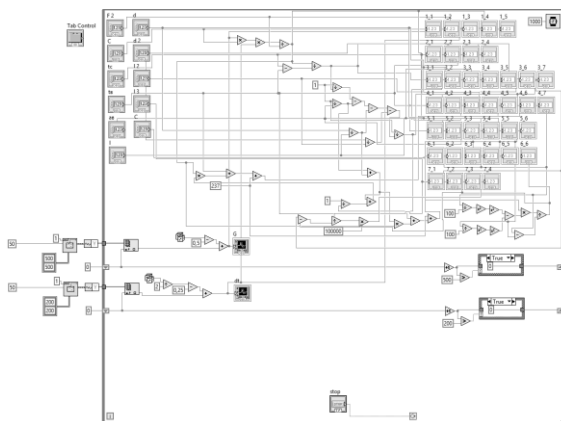


Рисунок 7 – Блок-диаграмма программы «Krystallizator»

Выводы

Проанализированы подходы к диагностике тепловых процессов в кристаллизаторе. В качестве величин, на основании которых ведется диагностика предложено выделить: среднюю плотность теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе, среднее значение коэффициента теплоотдачи в кристаллизаторе, средний коэффициент теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы

кристаллизатора и эффективную толщину газового зазора.

Создан эмулятор системы диагностики теплотехнических процессов в кристаллизаторе при помощи программного обеспечения LabVIEW.

Список литературы

1. Васильева А.В. Совершенствование подходов к диагностике тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ / А.В. Васильева // Техника и технологии машиностроения : материалы V Междунар. студ. науч.-практ. конф. (Омск, 4–10 апреля 2016 г.) / Минобрнауки России, ОмГТУ ; [редкол.: Е. Н. Еремин (отв. ред.) и др.]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. – 441 с.
2. Васильева А.В. Совершенствование подходов к диагностике тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ / А.В. Васильева, А.Б. Бирюков // Металлургия XXI столетия глазами молодых / Материалы II Международной научно-практической конференции студентов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 306 с.
3. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали: Учебник / Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
4. Васильева А.В. Совершенствование подходов к диагностике тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ / А.В. Васильева, А.Б. Бирюков // Межвузовский сборник научных работ студентов. Тепломассообмен – Луганск: Издательство Луганского национального университета имени Владимира Даля, 2016. – 76 с.
5. Джеффри Т. LabVIEW для всех, с программой LabVIEW 7 Express. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 350 с.
6. Суранов А.Я. LabVIEW 7: справочник по функциям. – М.: ДМК, 2005. – 376 с.
7. Пейч Л.И., Точилин Д.А., Поллак Б.П. LabVIEW для новичков и специалистов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 384 с.
8. Барри Патон. LabVIEW: Основы Аналоговой Электроники. //Перевод В.В. Шаркова. – СПб.: БХВ, 2004. – 340 с.
9. Барри Патон. LabVIEW: Основы Цифровой Электроники. //Перевод В.В. Шаркова. – СПб.: БХВ, 2004. – 262 с.
10. Загидуллин Р.Ш. LabVIEW в исследованиях и разработках. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 420с.

A.Y. Kharitonov, A.B. Birukov, A.V. Aliferenko, A.V. Vasileva. Emulator of diagnostical system of thermal condition of CCM crystallizer in LabVIEW environment. In this article, the problem of diagnosing and monitoring of thermal conditions in the crystallizer of continuous casting machine is investigated. A model of diagnostic system of thermal engineering processes in a crystallizer, emulated in LabVIEW environment, is created.

Keywords: continuous casting machine, thermal processes, crystallizer, LabVIEW.

Харитонов А.Ю., Бирюков А.Б., Алиференко А.В., Сныткина А.В. Эмулятор системы диагностики теплового состояния кристаллизатора МНЛЗ в среде LabVIEW. В данной статье исследована проблема диагностики и мониторинга тепловых процессов в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок. Создана модель системы диагностики теплотехнических процессов в кристаллизаторе в среде LabVIEW.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, тепловые процессы, кристаллизатор, LabVIEW

Статья поступила в редакцию 10.09.2017
Рекомендована к публикации доктором технических наук В.Н. Павлышом