

А.В. Васильева, А.Б. Бирюков /д.т.н./
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЕЛИЧИН, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ТЕПЛОВУЮ РАБОТУ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

Исследованы погрешности определения при помощи методики диагностики тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ величин, характеризующих тепловую работу кристаллизатора, в зависимости от погрешности определения текущих значений расхода охлаждающей воды в кристаллизаторе и перепада ее температуры.

Ключевые слова: диагностика, теплоотвод, кристаллизатор, сортовая МНЛЗ.

Постановка проблемы

Для повышения производительности МНЛЗ, снижения вероятности появления аварийных ситуаций и повышения качества заготовки важной задачей является проведение оперативной диагностики теплотехнических процессов, протекающих в кристаллизаторе. В настоящее время системы АСУ ТП практически всех МНЛЗ измеряют и регистрируют перепад температуры охлаждающей воды в кристаллизаторе. Результат этого измерения является в большинстве случаев единственным источником информации о текущем тепловом состоянии кристаллизатора и заготовки, формирующейся в нем [1].

Анализ последних исследований и публикаций

Общепризнанным является факт прямой зависимости качества заготовок и стабильности процесса разлива от правильности протекания процессов, прежде всего тепловых, в кристаллизаторе МНЛЗ [1]. Так, одним из необходимых условий, которое должно быть выполнено при работе кристаллизатора, является получение заданной толщины корки под кристаллизатором. Кроме того, температурное состояние корочки, формируемое в результате протекания тепловых процессов в кристаллизаторе, определяет силовые параметры механического взаимодействия корки заготовки и внутренней поверхности кристаллизатора и таким образом влияет на срок службы кристаллизаторов [2].

Сегодня, большинство МНЛЗ снабжено системой контроля такой величины, как перепад температуры охлаждающей воды в кристаллизаторе [1,3,4]. Она несет косвенную информацию о количестве тепла, переданного в кристаллизаторе, что, в свою очередь, характеризует теплообмен между корочкой заготовки и внутренней

поверхностью кристаллизатора. Так, увеличение перепада температур охлаждающей воды в кристаллизаторе свидетельствует об увеличении количества тепла, отводимого от поверхности заготовки, и наоборот [4].

Изменение во времени величин, характеризующих тепловую работу кристаллизатора (для условий одного из металлургических предприятий Донбасса), показано на рис. 1. Однако различия перепада температур во времени могут быть вызваны изменением расхода охлаждающей воды в кристаллизаторе. В работах [5,6] для анализа тепловой работы кристаллизатора предложено учитывать величины более информативные, чем перепад температуры охлаждающей воды. В качестве таких 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 ($\delta_{эф}$). Методология определения этих величин, предложенная в работе [5], может быть адаптирована в реальных условиях. В работе [6] описан пример расчетного определения усредненных значений названных величин для исходных данных, приведенных на рис. 1. Сечение разливаемой заготовки составляет 120×120 мм, а длина кристаллизатора – 750 мм.

Так, численно показано, что с помощью предложенных зависимостей 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 первич-

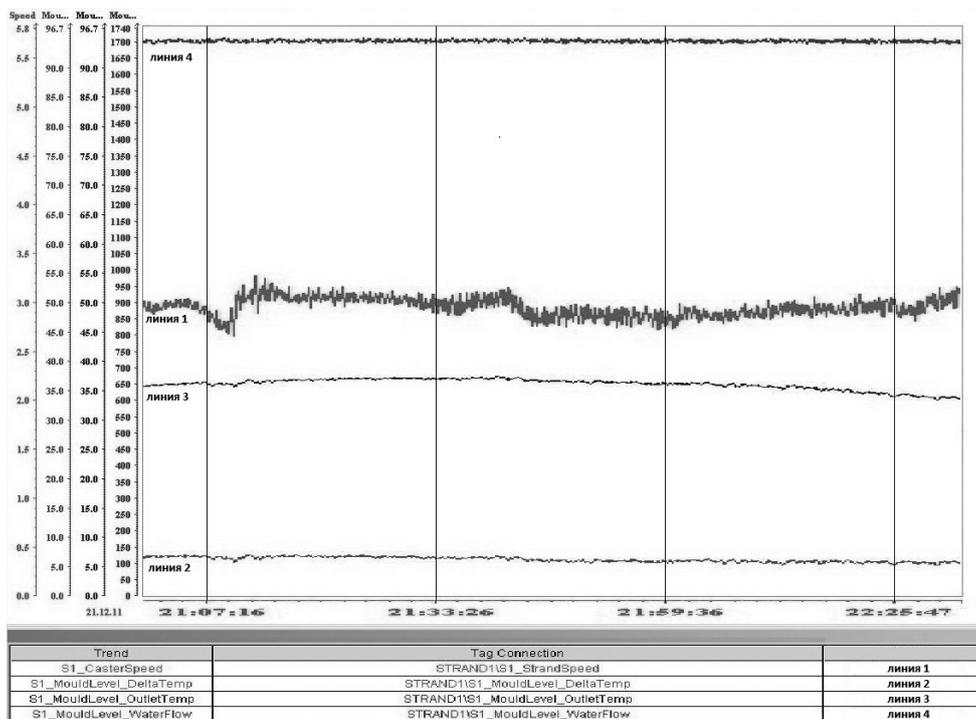


Рис. 1. Изменение во времени величин, характеризующих тепловую работу кристаллизатора

ной воды, теплофизические характеристики разливаемой стали, геометрические параметры гильзы кристаллизатора (рис. 2) [6].

Однако перед переходом к непосредственному использованию данного комплекса диагностики тепловых процессов в кристаллизаторе необходима оценка погрешностей, возникающих по причине неточности измерения величин-аргументов.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является оценка погрешностей системы мониторинга теплотехнических параметров кристаллизаторов сортовых МНЛЗ при определении средней плотности теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе, среднего значения коэффициента теплопередачи через стенки кристаллизатора, среднего коэффициента теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора, эффективной толщины газового зазора, вызванных погрешностями измерения входящих величин расхода охлаждающей воды в кристаллизаторе G и перепада ее температур на входе и на выходе из кристаллизатора Δt .

Основной материал исследования

Рассматриваемая в данной работе система диагностики базируется на следующих зависимостях:

$$\bar{q} = \frac{Gc\Delta t}{F}, \tag{1}$$

где c – теплоемкость воды, кДж/(кг·К); F – поверхность контакта заготовки и кристаллизатора, м²;

$$\bar{k} = \frac{\bar{q}}{(t_c - t_g)}, \tag{2}$$

где t_c – температура солидуса для разливаемой марки стали, °С; t_g – средняя температура охлаждающей воды в кристаллизаторе, °С;

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha_g} - \frac{\delta_m}{\lambda_m} - \frac{\delta_k}{\lambda_k}}, \tag{3}$$

где α_g – 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); $\bar{\delta}_k$ – средняя толщина корки металла в кристаллизаторе, м; λ_k – коэффициент теплопроводности корки заготовки при ее средней температуре, Вт/(м·К);

$$\delta_{эф} = \frac{\lambda_3}{(\alpha - \alpha_l)}, \tag{4}$$

где λ_3 – теплопроводность газовой прослойки, Вт/(м·К); α_l – коэффициент лучистой теплоотда-

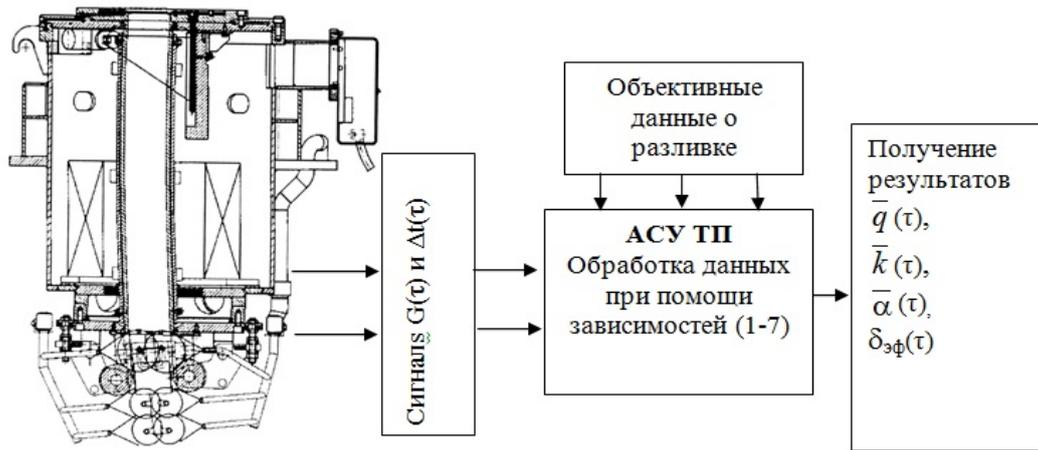


Рис. 2. Схема получения в режиме реального времени информации об изменении параметров, дающих углубленное представление о тепловых процессах, которые протекают в кристаллизаторе

чи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора, Вт/(м²·К) [7].

Данный набор зависимостей представляет процедуру косвенного определения величин (\bar{q} , \bar{k} , $\bar{\alpha}$, $\delta_{эф}$) в зависимости от результатов измерения аргументов G и Δt . Таким образом, актуальной является задача оценки погрешности косвенных измерений искомых величин.

Для расходомеров и дифференциальных термомпар, используемых на реальных МНЛЗ при измерении G и Δt , относительная погрешность измерений, как правило, не превышает 2%. В данной работе выполнены оценки погрешности косвенных измерений для наихудшего случая, когда погрешность измерения величин аргументов составляет 2%.

Из анализа выражений (1)-(2) видно, что погрешность косвенного определения \bar{q} и \bar{k} не зависит от базовых значений величин G и Δt . Поэтому для этих величин условно выбран базовый уровень $G=1700$ л/мин и $\Delta t=6,325$ и при помощи зависимостей (1)-(2) для девяти наборов аргументов рассчитаны значения \bar{q} и \bar{k} : 1) $0,98 G, 0,98 \Delta t$; 2) $0,98 G, \Delta t$; 3) $G, 0,98 \Delta t$; 4) $0,98 G, 1,02 \Delta t$; 5) $1,02 G, 0,98 \Delta t$; 6) $G, \Delta t$; 7) $G, 1,02 \Delta t$; 8) $1,02 G, 1 \Delta t$; 9) $1,02 G, 1,02 \Delta t$.

Значения относительных погрешностей относительно базовой точки б представлены на рис. 3.

Таким образом, при погрешностях определения G и Δt по 2% максимально возможная относительная погрешность \bar{q} и \bar{k} составляет порядка 4%.

Из анализа выражений (3)-(4) для определения величин $\bar{\alpha}$ и $\delta_{эф}$ видно, что относительно величин G и Δt зависимости не являются линейными, а соответственно, погрешность косвенно-

го определения искомых величин будет зависеть от базовых значений величин G и Δt .

Для оценки погрешности расчета данных величин проведено исследование по следующей схеме:

- в инженерном вычислительном пакете сформированы функции, описывающие «истинные» значения $\bar{\alpha}(G, \Delta t)$ и $\delta_{эф}(G, \Delta t)$ и функции, имитирующие погрешности, соответствующие двухпроцентным ошибкам в измерении перепада температур и расхода: $\bar{\alpha}_1(G, 1,02\Delta t)$, $\bar{\alpha}_2(G, 0,98\Delta t)$, $\bar{\alpha}_3(1,02G, \Delta t)$, $\bar{\alpha}_4(0,98G, \Delta t)$, $\delta_{эф1}(G, 1,02\Delta t)$, $\delta_{эф2}(G, 0,98\Delta t)$, $\delta_{эф3}(1,02G, \Delta t)$, $\delta_{эф4}(0,98G, \Delta t)$;

- для зафиксированного базового значения величины G на уровне 1700 л/мин рассмотрены функции:

$$П\bar{\alpha}_1(\Delta t) = \frac{\bar{\alpha}_1(G, 1,02\Delta t) - \bar{\alpha}(G, \Delta t)}{\bar{\alpha}(G, \Delta t)} \cdot 100\%;$$

$$П\bar{\alpha}_2(\Delta t) = \frac{\bar{\alpha}_2(G, 0,98\Delta t) - \bar{\alpha}(G, \Delta t)}{\bar{\alpha}(G, \Delta t)} \cdot 100\%;$$

$$П\delta_{эф1}(\Delta t) = \frac{\delta_{эф1}(G, 1,02\Delta t) - \delta_{эф}(G, \Delta t)}{\delta_{эф}(G, \Delta t)} \cdot 100\%;$$

$$П\delta_{эф2}(\Delta t) = \frac{\delta_{эф2}(G, 0,98\Delta t) - \delta_{эф}(G, \Delta t)}{\delta_{эф}(G, \Delta t)} \cdot 100\%.$$

- для зафиксированного базового значения величины Δt на уровне 6,325 °С рассмотрены функции:

$$П\bar{\alpha}_3(G) = \frac{\bar{\alpha}_3(1,02G, \Delta t) - \bar{\alpha}(G, \Delta t)}{\bar{\alpha}(G, \Delta t)} \cdot 100\%;$$

$$П\bar{\alpha}_4(G) = \frac{\bar{\alpha}_4(0,98G, \Delta t) - \bar{\alpha}(G, \Delta t)}{\bar{\alpha}(G, \Delta t)} \cdot 100\%;$$

$$\Pi\delta_{\varphi 3}(G) = \frac{\delta_{\varphi 3}(1.02G, \Delta t) - \delta_{\varphi 3}(G, \Delta t)}{\delta_{\varphi 3}(G, \Delta t)} \cdot 100\%;$$

$$\Pi\delta_{\varphi 4}(G) = \frac{\delta_{\varphi 4}(0.98G, \Delta t) - \delta_{\varphi 4}(G, \Delta t)}{\delta_{\varphi 4}(G, \Delta t)} \cdot 100\%.$$

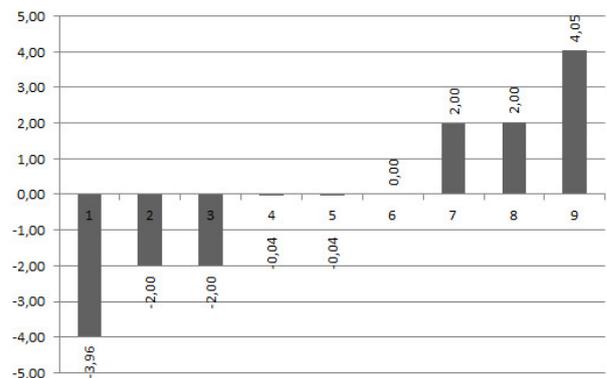
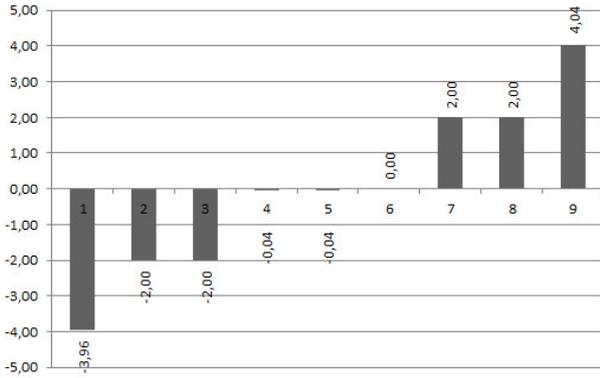


Рис. 3. Относительная погрешность определения \bar{q} (слева) и \bar{k} (справа)

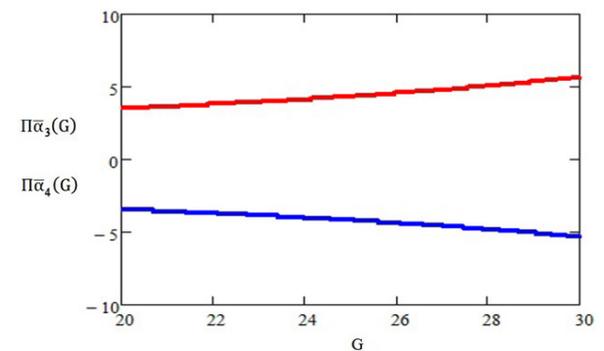
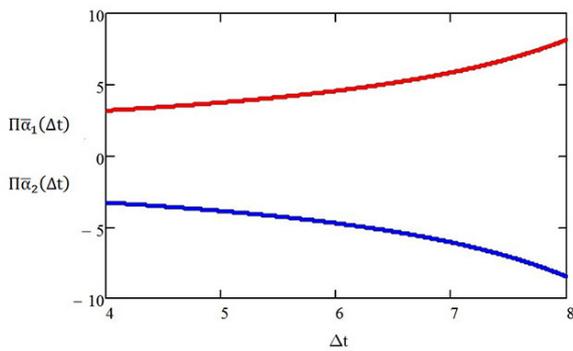


Рис. 4. Относительная погрешность в измерениях $\bar{\alpha}$

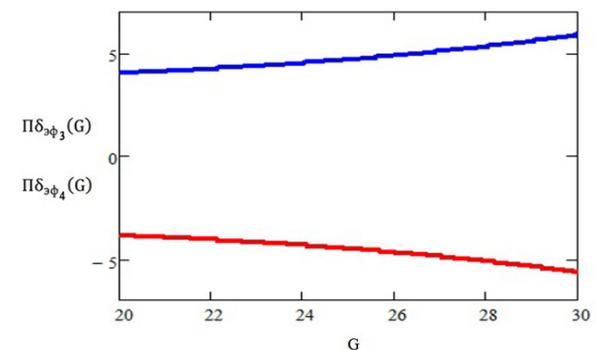
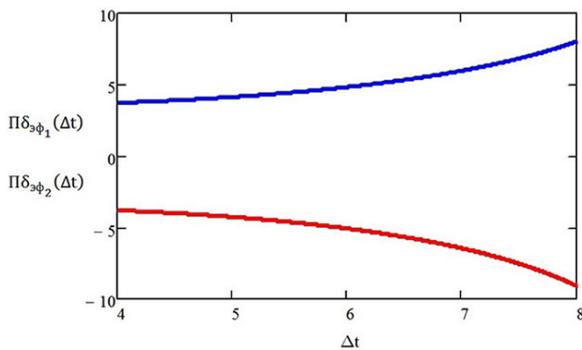


Рис. 5. Относительная погрешность в измерениях δ_{φ}

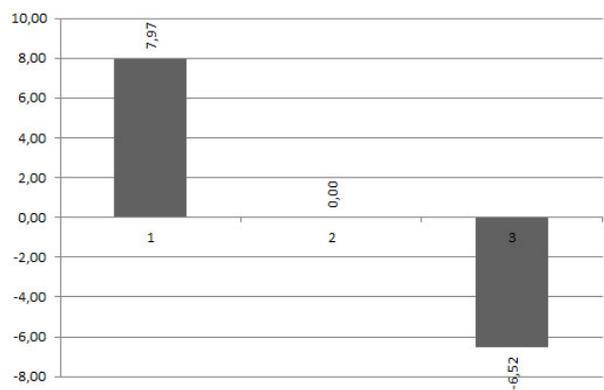
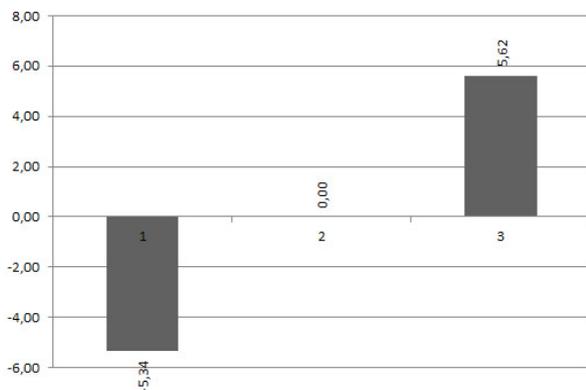


Рис. 6. Относительная погрешность в измерениях $\bar{\alpha}$ (слева) и δ_{φ} (справа) при минимальных значениях G и Δt

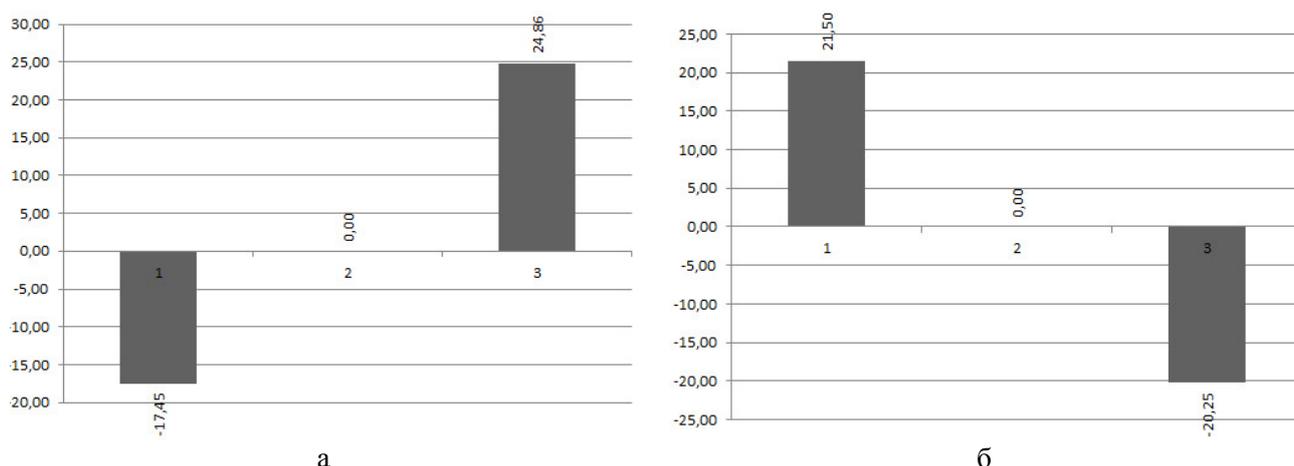


Рис. 7. Относительная погрешность в измерениях $\bar{\alpha}$ (а) и $\delta_{эф}$ (б) при максимальных значениях G и Δt

Результаты исследования погрешностей в определении $\bar{\alpha}$ и $\delta_{эф}$ представлены на рис. 4-5. Из анализа этой информации можно сделать вывод о том, что погрешности определения $\bar{\alpha}$ и $\delta_{эф}$ при помощи системы диагностики существенно зависят от текущих значений G и Δt и возрастают с их увеличением. В наибольшей мере эта закономерность свойственна случаю возрастания Δt , когда для минимальных возможных значений Δt погрешности определения $\bar{\alpha}$ и $\delta_{эф}$ составляют порядка 3-4 %, а для максимальных значений Δt они достигают 5-8 %.

Данные зависимости позволяют оценивать лишь погрешности, вызванные 2-процентным отклонением в измерениях одной из исходных величин (G либо Δt). Однако для оценки максимально допустимых погрешностей нужно учитывать максимально возможные отклонения. С этой целью для трех наборов аргументов [1) 0,98 G , 0,98 Δt ; 2) G , Δt ; 3) 1,02 G , 1,02 Δt] были рассчитаны значения $\bar{\alpha}$ и $\delta_{эф}$ при минимально и максимально возможных в производстве базовых уровнях $G_{min}=20$; $G_{max}=30$ и $\Delta t_{min}=4$; $\Delta t_{max}=8$.

Значения относительных погрешностей относительно базовой точки 2 представлены на рис. 6-7.

Полученные максимальные значения погрешностей порядка 20 % являются недопустимо большими. Поэтому аналогичные расчеты были проведены для случая погрешности определения исходных величин G и Δt 1 %. Относительная погрешность в измерениях $\bar{\alpha}$ при минимальных и максимальных значениях G и Δt составила -2,69; 2,77 % и -9,43; 11,24 % соответственно. Относительная погрешность в измерениях $\delta_{эф}$ при минимальных и максимальных значениях G и Δt составила -3,62; 3,62 % и -10,28; 10,07 % соответственно. Очевидно, что для снижения

погрешности определения искомых величин при помощи системы диагностики необходимо повышать точность измерения исходных величин. В случае, если уровень точности, соответствующий погрешности определения искомых величин в 1 %, является недостаточным, необходимо дальнейшее повышение точности измерения входящих величин.

Выводы

Исследование расчетных зависимостей, используемых в приведенной системе диагностики, показало, что уменьшение погрешности измерения величин-аргументов в 2 раза позволяет примерно в 2 раза повысить точность определения величин, характеризующих тепловую работу кристаллизаторов МНЛЗ. Так, для выхода на уровень максимально допустимой погрешности определения искомых величин порядка 1 % необходимо использовать измерительные приборы, обеспечивающие точность измерений величин G и Δt на уровне $\pm 0,5$ %.

Список литературы

1. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали: учебник / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
2. Biryukov A.B. Effect of the casting rate of a billet on the resistance of the mold shell in a high-capacity section continuous caster / A.B. Biryukov, V.V. Kravtsov, E.S. Lolenko // Russian Metallurgy (Metally). – 2009. – Issue 7. – P. 615-617.
3. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. – К.: Техніка, 1988. – 253 с.
4. Непрерывная разливка сортовой заготовки / А.Н. Смирнов [и др.]. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417 с.

5. Birukov A.B. Billet CC's mould heat engineering parameters monitoring system // Metallurgical and mining industry. – 2014. – Vol.1. – P. 44-48.
6. 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 Межд. науч.-практ. конф. студентов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 306 с.
7. Heat and Mass Transfer: Workbook / S.I. Ginkul [et al.]. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 291 p.

A.V. Vasylieva, A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

RESEARCH OF DIAGNOSTIC SYSTEM ERRORS WHEN DETERMINING QUANTITIES CHARACTERIZING THE THERMAL PERFORMANCE OF CCM MOLDS

Background. A significant role in ensuring the rational parameters of the existing continuous casting machine given to the automated control systems, which ultimately should have a comprehensive monitoring and timely analysis of all parameters of CCM. In recent times, there are solutions that allow implementing quick diagnosis of heat-technological processes in the mold based on the data processing about the temperature and consumption of the cooling water in the mold. However, until now, the assessment of the accuracy of determination of desired quantities depending on the errors in measurement of values-arguments has not been implemented.

Materials and/or methods. For flow meters and differential thermocouples used on a real CCM the relative error of measurement, as a rule, does not exceed 2 %. The error estimates of indirect measurements for the case when an error in the measurement values-arguments is 2% performed in the paper. For the average density of heat flow in the mold \bar{q} and the average heat transfer coefficient in the mold \bar{k} , the independence of the error from base-level values of G and Δt justified. The calculations showed that in the worst case the determination error of these values does not exceed 4%. To study the error of determination of heat transfer coefficient $\bar{\alpha}$ and the effective thickness of the gas gap $\delta_{\text{эф}}$ the functions that display a relative error of the measurements $\bar{\alpha}(\Delta t)$, $\delta_{\text{эф}}(\Delta t)$, $\bar{\alpha}(G)$ and $\delta_{\text{эф}}(G)$ considered. For estimation of the maximum possible error, the most unfavorable cases of the results deviations of the measurement of G and Δt considered. To calculate the errors under these conditions, we considered two baseline values of Δt and G : $G_{\text{min}}=20$; $G_{\text{max}}=30$ and $\Delta t_{\text{min}}=4$; $\Delta t_{\text{max}}=8$.

Results. It is established that at minimum values of G and Δt the maximum possible determination error is $\pm 5.3 \dots 5.6 \%$ and $\pm 6.52 \dots 7.97 \%$. At maximum – $\pm 17.45 \dots 24.86 \%$ and $\pm 20.25 \dots 21.5 \%$. For comparison, in the limitation of the maximum possible error of G and Δt as the 1% the following results were obtained: relative error in measurement at minimum and maximum values of G and Δt amounted to -2.69; 2.77 % -9.43; of 11.24 %, respectively; -3.62; 3.62 % -10.28; of 10.07 %.

Conclusion. The calculations showed a significant dependence of accuracy of determining the desired values by means of a diagnosis system on the error of values-arguments determination. The used approach allows determining by the calculation method the permissible measurement errors of values-arguments, providing a preset level of accuracy while setting the desired values.

Keywords: diagnostics, heat sink, mold, varietal continuous casting machine.

Сведения об авторах

А.В. Васильева

Телефон: +380 (66) 919-19-03
Эл. адрес: alexandrasnytkina@gmail.com

А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680
Orcid ID: 0000-0002-8146-2017
Телефон: +380 (62) 301-08-61
Эл. адрес: birukov.ttf@gmail.com

Статья поступила 28.11.2016 г.
© А.В. Васильева, А.Б. Бирюков, 2016
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Ерньоко