

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ МЕДНУЮ СТЕНКУ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

И. М. ЯЧИКОВ¹, д-р техн. наук, профессор кафедры информационно-измерительной техники, iachikovim@susu.ru; Т. И. ШАФИКОВ¹, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, asp21sti028@susu.ru, Д. В. БЕЛЫХ², старший преподаватель, belykh.work@yandex.ru
(¹ Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Россия, г. Челябинск; ² Новотроицкий филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Россия, г. Новотроицк)

Аннотация. Кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является важнейшим узлом устройства, так как в нем происходит формирование твердой оболочки слитка. Стенки кристаллизатора выполнены из медьсодержащего материала, который обладает высокой теплопроводностью, что и позволяет отводить до 25 % теплоты кристаллизации металла к охлаждающей воде. Исследование и определение надежных методов расчета теплообменных процессов в слябовом кристаллизаторе остается актуальной проблемой. При анализе тепловой работы кристаллизатора большую роль играет знание коэффициента теплопередачи от его рабочей поверхности к охлаждающей воде. Он позволяет подбирать рациональные режимы водяного охлаждения при различных технологических параметрах разлива металла, а также не допустить перегрева рабочей поверхности медьсодержащей стенки выше температуры разупрочнения. Целью работы является сравнительный анализ существующих аналитических и численных методов расчета коэффициента теплопередачи через медную стенку кристаллизатора МНЛЗ с щелевыми каналами к охлаждающей воде. Рассмотрено три основных алгоритма аналитического расчета коэффициента теплопередачи через медную стенку кристаллизатора МНЛЗ. Построена математическая модель расчета теплового состояния стенки кристаллизатора с щелевыми каналами и разработана компьютерная программа для определения коэффициента теплопередачи через медную стенку. Проведенный сравнительный анализ для всех рассмотренных методов расчета коэффициента теплопередачи для узкой и широкой медных стенок слябового кристаллизатора показал, что в широком практическом диапазоне скоростей воды в каналах 4–9 м/с коэффициент теплопередачи в разных методах расчета отличается в среднем не более чем на 12–13 %. Установлено, что толщина износостойкого Co–Ni-покрытия медных стенок кристаллизатора 0,67–2 мм дополнительно увеличивает термическое сопротивление, а значит, уменьшает коэффициент теплопередачи на 7–23 %.

Ключевые слова: кристаллизатор, машина непрерывного литья заготовок, тепловой поток, медные стенки, коэффициент теплопередачи, коэффициент теплоотдачи, математическая модель.

Ссылка для цитирования: Ячиков И. М., Шафиков Т. И., Белых Д. В. Сравнительный анализ методов расчета коэффициента теплопередачи через медную стенку кристаллизатора МНЛЗ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2025. Т. 81. № 5. С. 32-41.

DOI: 10.32339/0135-5910-2025-5-32-41

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT THROUGH THE COPPER WALL OF THE MNLZ CRYSTALLIZER

I. M. YACHIKOV¹, HD (Tech.), Professor of the Department of Information and Measurement Technology, iachikovim@susu.ru; T. I. SHAFIKOV¹, Postgraduate Student of the Department of Information and Measurement Technology, asp21sti028@susu.ru, D. V. BELYKH², Senior Lecturer, belykh.work@yandex.ru
(¹ South Ural State University (National Research University), Russia, Chelyabinsk; ² Novotroitsk Branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “National Research Technological University “MISIS”, Russia, Novotroitsk)

Abstract. The crystallizer of a continuous casting machine (CCM) is the most critical component of the system, as it is where the solid shell of the cast strand is formed. The crystallizer walls are made of copper-containing material, which exhibits high thermal conductivity, enabling the removal of up to 25% of the heat generated during metal solidification

to the cooling water. Research and development of reliable methods for calculating heat transfer processes in slab crystallizers remain an urgent challenge. When analyzing the thermal performance of the crystallizer, knowledge of the heat transfer coefficient between its working surface and the cooling water is crucial. This coefficient allows for the selection of optimal water cooling regimes under varying metal casting parameters and prevents overheating of the copper-containing wall's working surface beyond its weakening temperature. The aim of this work is to perform a comparative analysis of existing analytical and numerical methods for calculating the heat transfer coefficient through the copper wall of a CCM crystallizer with slotted channels to the cooling water. Three primary analytical algorithms for determining the heat transfer coefficient through the copper wall of the CCM crystallizer are examined. A mathematical model for calculating the thermal state of the crystallizer wall with slotted channels was developed, along with a computer program to determine the heat transfer coefficient through the copper wall. A comparative analysis of all methods for calculating the heat transfer coefficient for narrow and wide copper walls of a slab crystallizer revealed that, within the practical water velocity range of 4–9 m/s in the channels, the heat transfer coefficients obtained by different methods differ by an average of no more than 12–13%. It was also established that a wear-resistant Co–Ni coating with a thickness of 0.67–2 mm on the copper crystallizer walls increases thermal resistance, thereby reducing the heat transfer coefficient by 7–23%.

Keywords: crystallizer, continuous casting machine, heat flow, copper walls, coefficient of heat transfer, heat transfer coefficient, mathematical model.

For citation: Yachikov I. M., Shafikov T. I., Belykh D. V. Comparative analysis of methods for calculating the heat transfer coefficient through the copper wall of the MNLZ crystallizer. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2025, vol. 81, no. 5. pp. 32–41.

DOI: 10.32339/0135-5910-2025-5-32-41

Кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является важнейшим узлом устройства, так как в нем происходит формирование твердой оболочки слитка [1, 2]. Стенки кристаллизатора выполнены из меди, которая обладает высокой теплопроводностью, что позволяет за время нахождения формируемого слитка в кристаллизаторе отводить к охлаждающей воде до 25 % теплоты кристаллизации металла.

На толщину формируемой в кристаллизаторе твердой корочки слитка оказывает влияние выбор материала и толщина стенки кристаллизатора, скорость воды в каналах охлаждения, температура охлаждающей воды. Уменьшение толщины стенки на 1 мм приводит к росту толщины твердой корки слитка на 0,16 мм во всем диапазоне скоростей литья. Повышение скорости воды на 1 м/с способствует увеличению толщины твердой корки слитка на 0,1 мм [3].

При анализе тепловой работы кристаллизатора большую роль играет знание коэффициента теплопередачи от его рабочей поверхности к охлаждающей воде. Он позволяет подбирать рациональные режимы водяного охлаждения при различных технологических параметрах разлива металла, а также не допустить перегрева рабочей поверхности медьсодержащей стенки выше температуры разупрочнения.

В разное время вопросы, связанные с расчетами теплопередачи в кристаллизаторе МНЛЗ

рассмотрены в трудах А. Д. Акименко, К. М. Китаева, А. Л. Кузьминова, Ю. А. Калягина и др. [4–7]. В настоящее время существует множество математических моделей разной сложности для расчета тепловой работы медного кристаллизатора, это точные аналитические методы с разным уровнем допущений, а также приближенные численные методы. Поэтому исследование по определению простых и надежных методов расчета коэффициента теплопередачи в медной стенке кристаллизатора остается актуальной проблемой.

Целью работы является сравнительный анализ существующих аналитических и численных методов расчета коэффициента теплопередачи через медную стенку кристаллизатора МНЛЗ с целевыми каналами к охлаждающей воде.

Аналитические методы определения величины коэффициента теплопередачи

Существует несколько подходов к расчету величины коэффициента теплопередачи:

- методы, основанные на использовании стационарного или нестационарного теплового состояния медной стенки;
- методы, основанные на аналитических зависимостях или численных расчетах.

Нестационарный тепловой режим наблюдается только в начале разлива и занимает незначительное время в сравнении со всем временем тепловой работы стенок кристаллизатора. На

рис. 1 показаны результаты расчета нагрева отдельных точек, расположенных на расстоянии 12,5 мм от задней стенки, и средней температуры рабочей поверхности от времени медной стенки кристаллизатора толщиной $H = 55$ мм с начальной температурой $t_0 = 40$ °С. Расчет выполнен с использованием компьютерной программы для кристаллизатора высотой $L = 900$ мм при скорости разливки $v = 1$ м/мин [8]. Видно, что стационарный режим с точностью до нескольких градусов наступает через 40–60 с, поэтому при неизменном технологическом режиме и времени разливки плавки 40–50 мин коэффициент теплопередачи можно определять при стационарном тепловом режиме.

Для нахождения коэффициента теплопередачи через медную стенку необходимо определить термические сопротивления при передаче тепла от рабочей поверхности к охлаждающей воде. Общее термическое сопротивление через стенку $R_{ст}$ включает в себя сумму следующих термических сопротивлений: износостойкого Co–Ni-покрытия толщиной $h_{п}$ (z), мм; медной стенки толщиной C , мм; оребренной стенки с теплоотдачей к охлаждающей воде с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{в}$ (рис. 2):

$$R_{ст} = \frac{C}{\lambda_{м}} + \frac{h_{п}}{\lambda_{п}} + R_{т}, \quad (1)$$

где $\lambda_{п}$, $\lambda_{м}$ — коэффициенты теплопроводности медьсодержащей стенки и Co–Ni-покрытия соответственно.

Все существующие аналитические алгоритмы расчета, как правило, используют формулу (1) и отличаются расчетом термического сопротивления ребра стенки $R_{т}$.

Коэффициент теплопередачи определяется как величина обратная термическому сопротивлению

$$K = 1/R_{ст}. \quad (2)$$

Алгоритм 1. Чаще всего расчет термического сопротивления основывается на формуле одномерной теплопередачи через ребристую плоскую стенку с использованием коэффициента эффективности ребра [9]:

$$R_{т1} = \frac{\delta + a_{к}}{\alpha_{в}(2Eb_{к} + a_{к})}, \quad (3)$$

где $E = th\left(\frac{b_{к}}{\delta}\sqrt{2Bi}\right) / \left(\frac{b_{к}}{\delta}\sqrt{2Bi}\right)$ — коэффициент эффективности ребра; $Bi = \alpha_{в}\delta/\lambda_{м}$ — число Био;

δ — среднее расстояние между водяными каналами, мм; $a_{к}$, $b_{к}$ — ширина, высота щелевых каналов соответственно, мм. Это уравнение справедливо при выполнении условия $\delta \ll b$.

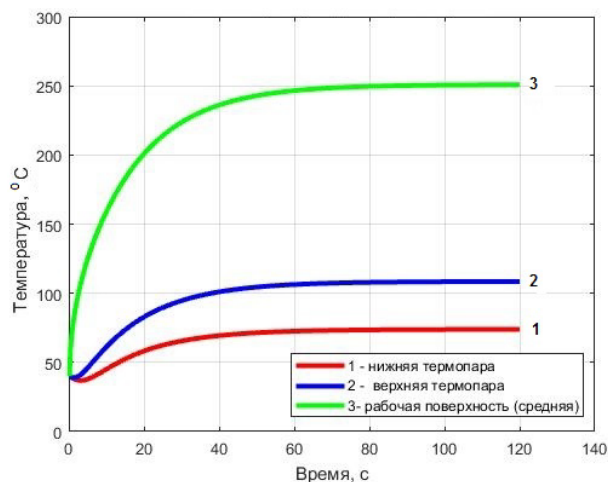


Рис. 1. Динамика изменения температуры в местах расположения термопар в стенке на расстоянии от верха кристаллизатора: $z_1 = 475$ мм, $z_2 = 275$ мм (кривые 1 и 2 соответственно) и температуры средней рабочей поверхности кристаллизатора (кривая 3)

Fig. 1. Dynamics of temperature change at the locations of thermocouples in the wall at a distance from the top of the mold: $z_1 = 475$ mm, $z_2 = 275$ mm (curves 1 and 2, respectively) and the temperature of the middle working surface of the mold (curve 3)

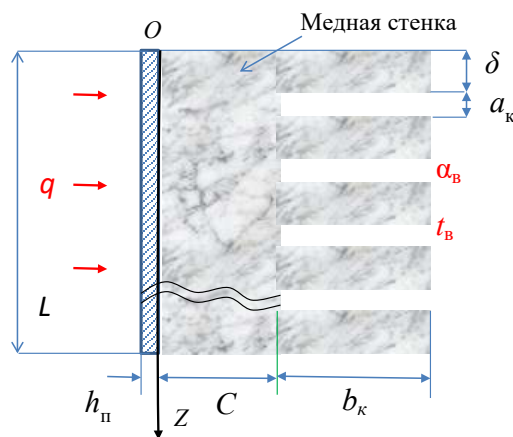


Рис. 2. Теплопередача от затвердевающего слитка к воде через износостойкое покрытие, медную стенку кристаллизатора с щелевыми каналами к охлаждающей воде

Fig. 2. Heat transfer from solidifying ingot to water through wear-resistant coating, copper wall of crystallizer with slotted channels to cooling water

Коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности канала α_B при турбулентном режиме течения воды чаще всего определяется по формуле Михеева [2]:

$$Nu = \frac{\alpha_B d_B}{\lambda_B} = 0,021 Re^{0,8} Pr_B^{0,43} (Pr_B / Pr_c)^{0,25}, \quad (4)$$

где $Re = W_B d_B / \nu_B$ — число Рейнольдса; W_B — средняя скорость воды в каналах, м/с; $d_B = 2a_k b_k / (a_k + b_k)$ — эквивалентный диаметр прямоугольного канала.

Для воды в диапазоне температур t от 10 до 200 °С (при давлении до 15 атм) зависимость числа Прандтля от температуры может быть представлена следующим эмпирическим выражением [2]:

$$Pr = 89,666 t^{-0,8563}. \quad (5)$$

Среднеинтегральное значение вязкости и теплопроводности воды в диапазоне температур t от 30 до 40 °С равно $\bar{\nu}_B = 0,7568$ мм²/с и $\bar{\lambda}_B = 0,618$ Вт/(м·К) соответственно.

Алгоритм 2. В работах [10–12] при расчете термического сопротивления ребра стенки к охлаждающей воде предлагается формула, полученная с учетом двумерного температурного поля:

$$R_{T2} = \frac{\delta + a_k}{(K_T + \alpha_B a_k)}, \quad (6)$$

где коэффициент теплопередачи ребра стенки

$$K_T = 2\lambda_M \sum_{i=1}^{\infty} \frac{D_i}{ch(\mu_i b_k / \bar{\delta})} \sin(\mu_i) sh(\mu_i b_k / \bar{\delta});$$

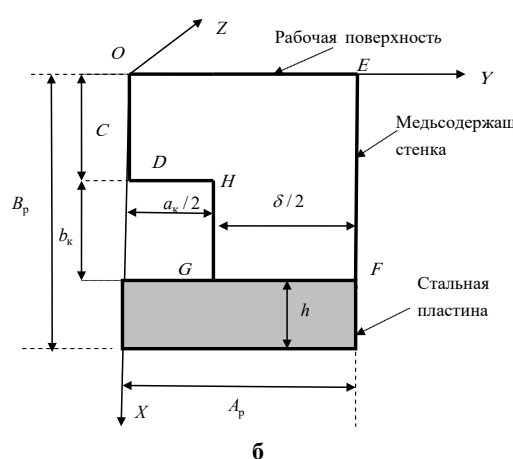
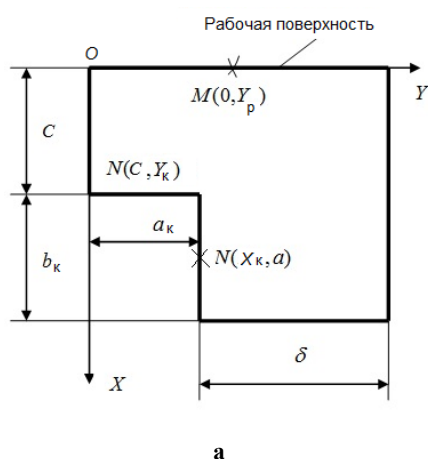


Рис. 3. Рабочий элемент стенки кристаллизатора в математической модели расчета: а — по аналитическому алгоритму 3; б — по численному алгоритму 4

Fig. 3. Working element of the crystallizer wall in the mathematical model of calculation: а — by analytical algorithm 3; б — by numerical algorithm 4

$$D_i = \frac{\sin(\mu_i)}{\mu_i + \sin(\mu_i) \cos(\mu_i)},$$

где μ_i — корни характеристического уравнения $tg(\mu) = Bi / \mu$.

Алгоритм 3. Для нахождения термического сопротивления стенки кристаллизатора рассматривается ее элемент, представленный на рис. 3, а. Передаваемую тепловую мощность от рабочей поверхности к охлаждающей воде можно определить с использованием интегральной формы закона Фурье:

$$Q = - \int_F \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF. \quad (7)$$

Для получения расчетной зависимости находят среднеинтегральное расстояние β , которое проходит тепловой поток от рабочей поверхности стенки к поверхности охлаждающего канала. Локальное расстояние определяется от произвольной точки на рабочей поверхности стенки $M(0, Y_p)$ до произвольной точки на поверхности канала $N(X_k, Y_k)$. Для определения среднеинтегральной толщины рабочей стенки поверхность целевого канала разбивают на две зоны [13, 14]. Находят среднеинтегральное расстояние до первой и второй зон:

$$\bar{\beta}_1 = \frac{1}{a_k (a_k + \delta)} \int_0^{a_k} dY_k \int_0^{a_k + \delta} \sqrt{C^2 + (Y_p - Y_k)^2} dY_p, \quad (8)$$

$$\bar{\beta}_2 = \frac{1}{b_k \delta} \int_C^{b_k + C} dX_k \int_{a_k}^{a_k + \delta} \sqrt{X_k^2 + (Y_p - a_k)^2} dY_p. \quad (9)$$

Далее определяют результирующее среднеинтегральное расстояние:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{(a_k + b_k)(a_k + \delta)} [\bar{\beta}_1 a_k (a_k + \delta) + \bar{\beta}_2 b_k \delta], \quad (10)$$

а также термическое сопротивление стенки от рабочей поверхности до охлаждающей воды:

$$R_{т3} = \frac{\bar{\beta}}{\lambda} + \frac{a_k + \delta}{\alpha(a_k + b_k)}. \quad (11)$$

Численный метод определения величины коэффициента теплопередачи

Алгоритм 4. Результаты аналитических расчетов термических сопротивлений $R_{ст}$ и коэффициентов теплопередачи K по рассмотренным выше алгоритмам сравнивали с расчетом с использованием численных методов. В стенке кристаллизатора наблюдается практически периодическое расположение щелей охлаждения. В качестве допущения выделяется два семейства плоскостей зеркальной симметрии: вертикальные плоскости, проходящие по центру каналов и по центру между щелей [15]. Эти плоскости симметрии могут рассматриваться как теплонепроницаемые границы. Исходя из этого, можно выделить прямоугольный элемент стенки кристаллизатора $A_p B_p$, где $A_p = (a_k/2 + \delta/2)$; $B_p = b_k + C$ (см. рис. 3, б).

Материал рабочей медной стенки имеет высокую теплопроводность, а плотность теплового потока изменяется по высоте кристаллизатора $q(z)$, поэтому теплота распространяется не только поперек рабочей стенки (по осям Ox и Oy), но также вдоль нее (по оси Oz) (см. рис. 3, б). Известно, что чем больше скорость разливки, тем меньше проявляется перенос теплоты теплопроводностью вдоль рабочей стенки по оси Oz . При скоростях разливки 1 м/мин и более это явление при расчете теплового состояния кристаллизатора можно не учитывать. В качестве допущения считаем, что тепловые потоки в медной стенке вдоль оси Oz существенно меньше, чем тепловые потоки вдоль осей Ox и Oy , поэтому можно принять $\partial t / \partial z = 0$.

Тепловое состояние выбранного элемента стенки для моментов времени $\tau > 0$ описываем двумерным уравнением нестационарной теплопроводности Фурье:

$$a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (12)$$

где τ — время; $t(x, y, \tau)$ — поле температур;

$a_m = \lambda_m / (c_m \rho_m)$, c_m , ρ_m — коэффициент температуропроводности, удельная теплоемкость и плотность материала стенки соответственно.

Решение стационарной задачи находилось как квазистационарное состояние при $\tau \rightarrow \infty$. Для решения уравнения (12) задавались крайние условия. В качестве начального условия выбиралась начальная температура стенки. В качестве граничных условий на рабочей поверхности (OE) задавалось граничное условие 2-го рода при действии теплового потока q со стороны кристаллизующейся заготовки, на границах (OD) и (EF) — условие симметрии при выборе элементарного объема; на поверхности контакта стальной и медной пластины (GF) — граничное условие 4-го рода и на поверхности каналов водяного охлаждения (DH) и (HG) — граничное условие 3-го рода.

Средний коэффициент теплопередачи и термическое сопротивление от рабочей стенки нагрева до охлаждающей воды можно записать как

$$K_4 = \frac{q}{(\bar{t}_p - t_b)}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}), \quad (13)$$

$$R_{ст4} = \frac{1}{K}, \quad (14)$$

где \bar{t}_p — средняя температура рабочего элемента стенки; t_b — температура охлаждающей воды.

На основе описанной математической модели создана компьютерная программа CCM mold Ural steel с использованием среды разработки Matlab version R2017a [8].

Сравнительный анализ различных методов расчета коэффициента теплопередачи

Для проведения расчетов в таблице представлены исходные геометрические и технологические параметры. В качестве материала стенки используется холоднокатаная медь марки SE Cu Ag (0,08–0,13 %), МСр0,1.

На основе этих данных по разработанной программе проведено компьютерное моделирование для кристаллизатора высотой $L = 900$ мм. Получены диаграммы распределения температуры в элементе стенки при тепловом потоке $q = 1489$ кВт/м² при скоростях воды в каналах $W_b = 4$ м/с (рис. 4, а) и $W_b = 9$ м/с (см. рис. 4, б). Видно, что увеличение скорости воды приводит к снижению температуры рабочей поверхности и увеличению коэффициента теплопередачи K . В первом случае $K = 8407$ Вт/(м²·К), во втором — $K = 9456$ Вт/(м²·К).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

INPUT DATA FOR MODELING

Параметр	Значение
Ширина прямоугольного канала a_k , мм	5
Глубина прямоугольного канала b_k , мм	26
Эквивалентный диаметр прямоугольного канала d_v , мм	8,39
Среднее расстояние между водяными каналами в узкой стенке кристаллизатора δ , мм	17,9
Среднее расстояние между водяными каналами в широкой стенке кристаллизатора δ , мм	24
Расстояние от рабочей поверхности до канала C , мм	29
Толщина медной стенки кристаллизатора H , мм	55
Расстояние от верха кристаллизатора z , мм	150
Тепловой поток со стороны рабочей стенки $q(z)$, кВт/(м ² ·К) ($z = 150$ мм — расстояние от лунки)	1489
Температура охлаждающей воды t_b , °С	30
Скорость разливки v , м/мин	1

Толщина износостойкого покрытия меняется по высоте кристаллизатора по линейному закону, увеличиваясь к нижней части кристаллизатора $h_{\text{п}}(z) = 0,5 + 1,5(z / L)$. Влияние толщины Со–Ni-покрытия на термическое сопротивление стенки показано на рис. 5, где приведена зависимость отношения термического сопротивления с износостойким покрытием и без него по высоте кристаллизатора. При этом толщина Со–Ni-покрытия $h_{\text{п}}$ изменялась от 0,67 до 2 мм, а коэффициент теплопроводности принимался равным $\lambda_{\text{п}} = 80$ Вт/(м·К). Из рис. 5 видно, что износостой-

кое покрытие увеличивает термическое сопротивление, а значит, уменьшает коэффициент теплопередачи в разных горизонтальных плоскостях кристаллизатора на 7–23 %. В процессе эксплуатации кристаллизатора с истиранием покрытия коэффициент теплопередачи увеличивается. Посредством компьютерного моделирования установлено, что данное отношение термических сопротивлений с износостойким покрытием и без него $\psi = R_{\text{ст}2}(z) / R_{\text{ст}20}(z)$ является инвариантом, и оно практически не зависит от скорости воды в каналах и скорости разливки стали.

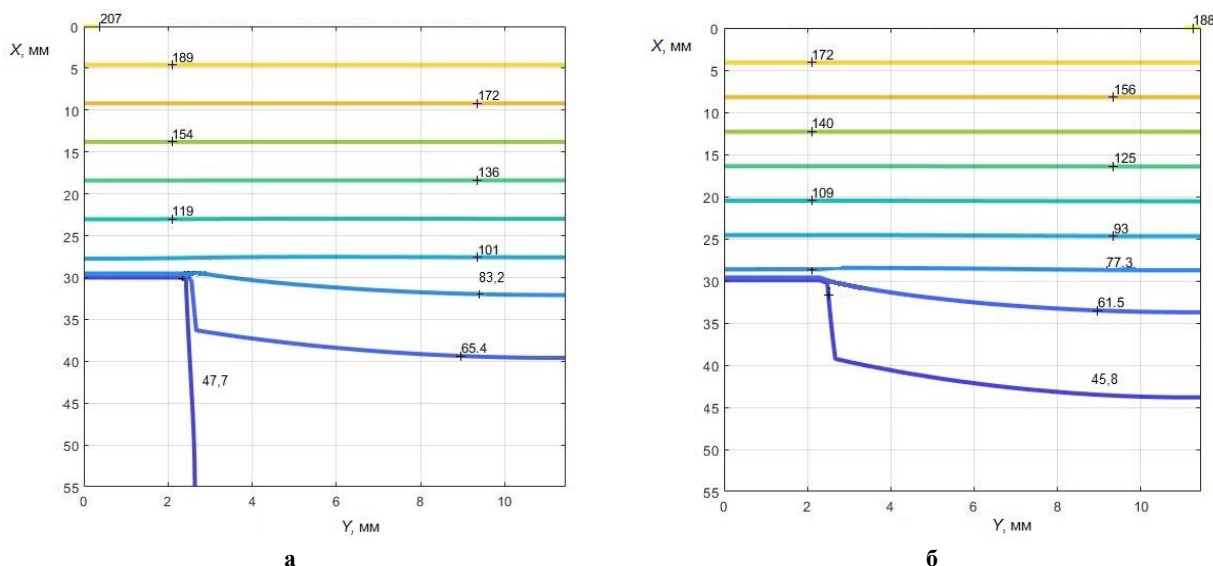


Рис. 4. Диаграмма распределения температуры в элементе стенки (см. рис. 3, б) при скорости воды в каналах узкой стенки: а — $W_6 = 4$ м/с ($\alpha_6 = 17431$ Вт/(м²·К), $\bar{t}_p = 207$ °С); б — $W_6 = 9$ м/с ($\alpha_6 = 31489$ Вт/(м²·К), $\bar{t}_p = 187$ °С)

Fig. 4. Diagram of temperature distribution in the wall element (Fig. 3, б) at the velocity of water in the channels of a narrow wall: а — $W_6 = 4$ m/s ($\alpha_6 = 17431$ W/(m²·K), $\bar{t}_p = 207$ °C); б — $W_6 = 9$ m/s ($\alpha_6 = 31489$ W/(m²·K), $\bar{t}_p = 187$ °C)

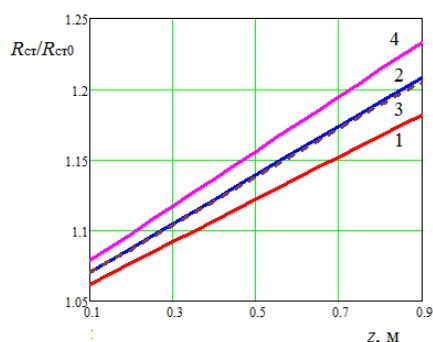


Рис. 5. Отношение полных термических сопротивлений для стенок с покрытием и без покрытия по высоте кристаллизатора при разной скорости воды в каналах: 1 — R_{cm2}/R_{cm20} при $W_в = 4$ м/с; 2 — R_{cm2}/R_{cm20} при $W_в = 9$ м/с; 3 — R_{cm1}/R_{cm10} при $W_в = 4$ м/с; 4 — R_{cm1}/R_{cm10} при $W_в = 9$ м/с

Fig. 5. Ratio of total thermal resistances for coated and uncoated walls at the height of the mold at different water velocities in the channels:

1 — R_{cm2}/R_{cm20} at $W_в = 4$ m/s; 2 — R_{cm2}/R_{cm20} at $W_в = 9$ m/s;
3 — R_{cm1}/R_{cm10} at $W_в = 4$ m/s; 4 — R_{cm1}/R_{cm10} at $W_в = 9$ m/s

На рис. 6 показаны зависимости термического сопротивления (см. рис. 6, а) и коэффициента теплопередачи (см. рис. 6, б) от скорости

воды, полученные при разных алгоритмах расчета без покрытия узкой стенки кристаллизатора ($h_n = 0$). Значения термического сопротивления стенки от рабочей поверхности до охлаждающей воды R_t определены с помощью формулы (1) и зависимостей (3), (4), (6) и путем численного моделирования с использованием программы CCM mold Ural steel [7]. Рассмотрение полученных графиков показывает, что во всем диапазоне скоростей воды в каналах R_{ct1} и R_{ct4} довольно близки, при этом отношение R_{ct1}/R_{ct4} изменяется на 0,4–0,5 %, R_{ct2}/R_{ct4} — на 12–13 %, а R_{ct3}/R_{ct4} — на 7–10 %.

Для сравнительного анализа были выполнены аналогичные расчеты для широкой стенки кристаллизатора, в котором среднее расстояние между каналами больше на 34 %. Результаты расчетов приведены на рис. 7. Видно, что результаты численного расчета коэффициента теплопередачи очень близки с расчетами по первому алгоритму и отличаются друг от друга примерно на 1 %. Соответствующие отношения для других алгоритмов K_4/K_2 изменяются на 12–13 %, а K_4/K_3 — на 13–16 %.

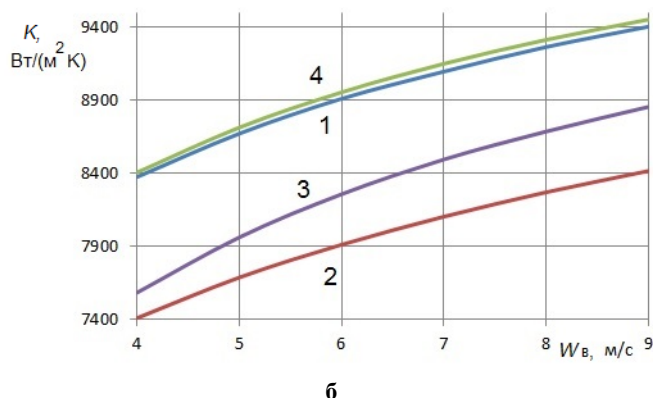
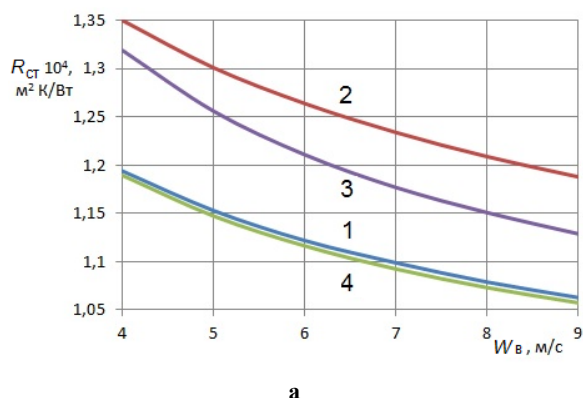


Рис. 6. Полное термическое сопротивление (а) и коэффициент теплопередачи (б) от рабочей поверхности до охлаждающей воды без покрытия в зависимости от скорости воды в каналах:

1 — R_{cm1} ; 2 — R_{cm2} ; 3 — R_{cm3} ($v = 1$ м/мин, $z = 0,15$ м, $h_n = 0$ мм, $C = 29$ мм, $\delta = 17,9$ мм)

Fig. 6. Total thermal resistance (a) and heat transfer coefficient (б) from the working surface to the cooling water without coating as a function of water velocity in the channels:

1 — R_{cm1} ; 2 — R_{cm2} ; 3 — R_{cm3} ($v = 1$ m/min, $z = 0,15$ m, $h_n = 0$ mm, $C = 29$ mm, $\delta = 17,9$ mm)

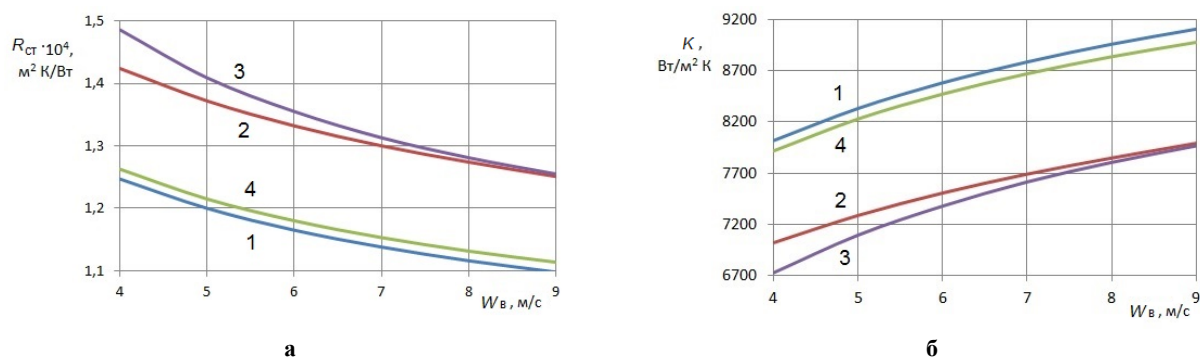


Рис. 7. Полное термическое сопротивление (а) и коэффициент теплопередачи (б) от рабочей поверхности до охлаждающей воды без покрытия в зависимости от скорости воды в каналах:

1 — R_{cm1} ; 2 — R_{cm2} ; 3 — R_{cm3} ($v = 1$ м/мин, $z = 0,15$ м, $h_n = 0$ мм, $C = 29$ мм, $\delta = 24$ мм)

Fig. 7. Total thermal resistance (a) and heat transfer coefficient (б) from the working surface to the cooling water without coating as a function of water velocity in the channels:

1 — R_{cm1} ; 2 — R_{cm2} ; 3 — R_{cm3} ($v = 1$ m/min, $z = 0,15$ m, $h_n = 0$ mm, $C = 29$ mm, $\delta = 24$ mm)

Заключение

1. Приведены три основных алгоритма, используемых для аналитического расчета коэффициента теплопередачи через медную стенку кристаллизатора МНЛЗ.

2. Построена математическая модель расчета теплового состояния стенки кристаллизатора с каналами прямоугольного сечения и на основе численного алгоритма создана компьютерная программа для определения коэффициента теплопередачи через медную стенку кристаллизатора.

3. Посредством моделирования получены расчетные зависимости термических сопротивлений, коэффициентов теплопередачи и их отношений от скорости воды в каналах для трех аналитических и численного алгоритмов.

4. Установлено, что толщина износостойкого Co–Ni-покрытия медных стенок кристаллизатора

0,67–2 мм увеличивает термическое сопротивление, а значит, уменьшает коэффициент теплопередачи на 7–23 %.

5. Путем сравнительного анализа для четырех рассмотренных методов расчета установлено, что в широком диапазоне скоростей воды в каналах, используемых на практике (4–9 м/с), и при изменении расстояния между каналами на 34 % коэффициент теплопередачи отличается в среднем не более чем на 12–13 %.

6. Для определения термического сопротивления медной стенки кристаллизатора с достаточной для большинства расчетов точностью можно рекомендовать первый алгоритм простой одномерной модели, использующий формулу теплопередачи через ребристую плоскую стенку с применением коэффициента эффективности ребра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Столяров А. М., Великий А. Б., Юречко Д. В. Повышение эффективности разливки стали на высокопроизводительных сортовых МНЛЗ: монография. — Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2009. — 126 с.
2. Вдовин К. Н., Точилкин В. В., Ячиков И. М. Непрерывная разливка сталей: монография. — СПб.: Лань, 2023. — 732 с.
3. Паршин В. М., Буланов Л. В. Непрерывная разливка стали. — Липецк: ОАО «НЛМК», 2011. — 221 с.
4. Акименко А. Д., Китаев Е. М., Скворцов А. А. Тепловой расчет машин непрерывного литья стальных заготовок: учебное пособие. — Горький: ГПИ, 1979. — 85 с.
5. Китаев Е. М. Исследование теплопередачи и затвердевания при непрерывной разливке стальных слитков круглого сечения: дис. ... к-та тех. наук. — Горький, 1970. — 189 с.
6. Кузьминов А. Л. Теория и технология контроля процессов формирования слитка и состояния оборудования при непрерывной разливке стали: дис. ... д-ра тех. наук. — Череповец, 1999. — 297 с.
7. Калягин Ю. А. Тепловые процессы при непрерывной разливке стали в оборудовании машин непрерывного литья заготовок: автореф. дис. ... д-ра тех. наук. — Череповец, 2005. — 32 с.

8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024687070. Расчет теплового состояния стенки кристаллизатора с каналами различного сечения / И. М. Ячиков, Т. И. Шафиков, А. Д. Дрозин // 14.11.2024. Заявл. 30.10.2024.
9. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 486 с.
10. Лукин С. В., Шестаков Г. Н., Мухин В. В. Расчет температурного поля в слое защитного шлака // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 1. С. 64.
11. Сорокин С. В., Лукин С. В., Шестаков Г. Н. Расчет теплообмена в слябовой заготовке при непрерывной разливке стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 11. С. 66, 67.
12. Лукин С. В., Мухин В. В., Осипов Е. Б. и др. Исследование теплообмена слитка с кристаллизатором сортовой машины непрерывного литья заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 5. С. 31–35.
13. Ячиков И. М., Кадошников В. И., Бахметьев В. В. Расчет теплопередачи в стенке кристаллизатора МНЛЗ с цилиндрическими и щелевыми каналами // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях. — Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 149–155.
14. Шестаков Н. И., Калягин Ю. А., Манько О. В., Лукин С. В. Теплообмен в рабочей стенке щелевого кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 3. С. 78–81.
15. Ермолюк Т. Д., Лях А. П., Целиков А. А. Повышение эксплуатационной стойкости кристаллизатора МНЛЗ // Сталь. 1985. № 6. С. 33–36.

*Поступила 25 марта 2025 г.
Принята в печать 30 марта 2025 г.*

REFERENCES

1. Stolyarov A. M., Velikii A. B., Yurechko D. V. *Povyshenie effektivnosti razlivki stali na vysokoproizvoditel'nykh sortovykh MNLZ* [Improving the efficiency of steel casting at high-productive longitudinal CCM]. Magnitogorsk: MGTU im. G. I. Nosova, 2009, 126 p. (In Russ.).
2. Vdovin K. N., Tochilkin V. V., Yachikov I. M. *Nepreryvnaya razlivka staley* [Continuous casting of steels]. St. Petersburg: Lan', 2023, 732 p. (In Russ.).
3. Parshin V. M., Bulanov L. V. *Nepreryvnaya razlivka stali* [Continuous steel casting]. Lipetsk: OJSC "NLMK", 2011, 221 p. (In Russ.).
4. Akimenko A. D., Kitaev E. M., Skvortsov A. A. *Teplovoi raschet mashin nepreryvnogo lit'ya stal'nykh zagotovok* [Thermal calculation of continuous casting machines for steel billets]. Gor'kii: GPI, 1979, 85 p. (In Russ.).
5. Kitaev E. M. *Issledovanie teploperedachi i zatverdevaniya pri nepreryvnoi razlivke stal'nykh slitkov kruglogo secheniya: dis. ... k-ta tekh. nauk* [Investigation of heat transfer and solidification at continuous casting of steel ingots of round cross-section. Cand. Sci. Dis.]. Gor'kii, 1970, 189 p. (In Russ.).
6. Kuz'minov A. L. *Teoriya i tekhnologiya kontrolya protsessov formirovaniya slitka i sostoyaniya oborudovaniya pri nepreryvnoi razlivke stali: dis. ... d-ra tekh. nauk* [Theory and technology of control of ingot formation processes and equipment condition at continuous casting of steel. Dr. Sci. Dis.]. Cherepovets, 1999, 297 p. (In Russ.).
7. Kalyagin Yu. A. *Teplovye protsessy pri nepreryvnoi razlivke stali v oborudovanii mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok: avtoref. dis. ... d-ra tekh. nauk* [Thermal processes at continuous casting of steel in the equipment of continuous casting machines. Extended Abstract of Dr. Sci. Dis.]. Cherepovets, 2005, 32 p. (In Russ.).
8. Yachikov I. M., Shafikov T. I., Drozin A. D. *Raschet teplovogo sostoyaniya stenki kristallizatora s kanalami razlichnogo secheniya* [Calculation of the thermal state of the crystallizer wall with channels of different cross-section]. Certificate of registration of the computer program RU 2024687070. 14.11.2024. Application from 30.10.2024. (In Russ.).
9. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha* [Heat Transfer]. Moscow: Energiya, 1975, 416 p. (In Russ.).
10. Lukin S. V., Shestakov G. N., Mukhin V. V. Temperature field calculations in protective slag layer. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgia*, 2007, vol. 1, pp. 64. (In Russ.).
11. Sorokin S. V., Lukin S. V., Shestakov G. N. Heat exchange estimation for continuously cast slab semis. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgia*, 2007, vol. 11, pp. 66, 67. (In Russ.).

12. Lukin S. V., Mukhin V. V., Osipov E. B. etc. Investigation of ingot heat transfer with the crystallizer of a continuous casting machine. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgia*, 2008, vol. 5, pp. 31–35. (In Russ.).
13. Yachikov I. M., Kadoshnikov V. I., Bakhmet'ev V. V. *Raschet teploperedachi v stenke kristallizatora MNLZ s tsilindricheskimi i shchelevymi kanalami* [Calculation of Heat Transfer in the Crystallizer Wall of Caster with Cylindrical and Slotted Channels]. *Matematika. Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh, tekhnicheskikh i pedagogicheskikh issledovaniyakh* [Mathematics. Application of mathematics in economic, technical and pedagogical researches]. Magnitogorsk: MG TU, 2004, pp. 149–155. (In Russ.).
14. Shestakov N. I., Kalyagin Yu. A., Man'ko O. V., Lukin S. V. Heat exchange in the working wall of the slotted crystallizer of the continuous casting machine. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2004, vol. 3, pp. 78–81. (In Russ.).
15. Ermolyuk T. D., Lyakh A. P., Tselikov A. A. Increase of the operating resistance of the CCM crystallizer. *Stal'*, 1985, vol. 6, pp. 33–36. (In Russ.).

Received March 25, 2025

Accepted for publication March 30, 2025