

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ  
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ  
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL  
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,  
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

УДК 621.74.045

DOI 10.17073/0368-0797-2023-6-733-742



Оригинальная статья

Original article

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ ПРИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ РУБАШКЕ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ РЕБРАМИ

В. И. Одинокоев, А. И. Евстигнеев<sup>✉</sup>, Э. А. Дмитриев, В. А. Карпенко

Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Россия, 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

✉ [diss@knastu.ru](mailto:diss@knastu.ru)

**Аннотация.** Предложена новая технология процесса заполнения кристаллизатора установки непрерывной разливки стали (УНРС) жидким металлом и его перемешивания. Приведена оригинальная запатентованная конструкция устройства, состоящая из глухондонного стакана и вращающейся рубашки. Экспериментальные исследования течения жидкого металла в кристаллизаторе продолжительны, сложны и трудоемки, поэтому в работе применяется математическое моделирование численным методом. Представлены основные результаты исследований течения расплава в объеме кристаллизатора. Объектами исследований являются гидродинамические и тепловые потоки жидкого металла нового процесса разливки стали в кристаллизатор прямоугольного сечения УНРС, а результатом – пространственная математическая модель, описывающая потоки и температуры жидкого металла в кристаллизаторе. Для моделирования процессов, протекающих при тении металла в кристаллизаторе, авторы используют специально созданный программный комплекс. В основе теоретических расчетов лежат основополагающие уравнения гидродинамики, уравнения математической физики (уравнение теплопроводности с учетом массопереноса) и апробированный численный метод. Исследуемая область разбивается на элементы конечных размеров, для каждого элемента в разностном виде формулируется система уравнений. Результат решения – поля скоростей и температур потока металла в объеме кристаллизатора. По разработанным численным схемам и алгоритмам составлена программа расчета. Приведен пример расчета разливки стали в кристаллизатор прямоугольного сечения, схемы потоков жидкого металла по различным сечениям кристаллизатора. Наглядно представлены векторные потоки жидкого металла в различных сечениях кристаллизатора при разных числах оборотов вращающейся рубашки. Выявлены области интенсивной турбулентности. Результаты численного решения задачи представлены в графической форме схемами полей скоростей потоков жидкого металла и их температуры по различным сечениям кристаллизатора.

**Ключевые слова:** моделирование, кристаллизатор, жидкий металл, заполнение, потоки расплава, математическая модель, численная схема, алгоритм, скорость течения

**Для цитирования:** Одинокоев В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Карпенко В.А. Моделирование нового процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали при вращающейся рубашке с вертикальными ребрами. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(6):733–742. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-733-742>

## SIMULATION OF A NEW PROCESS OF MIXING LIQUID METAL IN CCM MOLD WITH ROTATING COOLING JACKET WITH VERTICAL RIBS

V. I. Odinokov, A. I. Evstigneev<sup>✉</sup>, E. A. Dmitriev, V. A. Karpenko

Komsomolsk-on-Amur State University (27 Lenina Ave., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681013, Russian Federation)

✉ [diss@knastu.ru](mailto:diss@knastu.ru)

**Abstract.** The article proposes a new technology of filling the CCM mold with liquid metal and mixing it. The original patented device consists of a closed bottom nozzle and a rotating jacket. Experimental studies of liquid metal flow in a mold are long, complex and time-consuming, therefore, in the work was used mathematical modeling by numerical method. The objects of research are the hydrodynamic and thermal flows of liquid metal during

the new process of steel casting into a CCM mold of rectangular cross-section, and the result is a spatial mathematical model that describes the flows and temperatures of liquid metal in the mold. To simulate the processes occurring during the metal flow in the mold, the authors used a specially created software package. The theoretical calculations are based on the fundamental equations of hydrodynamics, the equations of mathematical physics (equation of thermal conductivity taking into account mass transfer) and a proven numerical method. The area under study is divided into elements of finite dimensions, for each element a formulated system of equations is written in a difference form. The result is the velocity and temperature fields of the metal flow in the mold volume. According to the developed numerical schemes and algorithms, a calculation program was compiled. The paper considers an example of calculating the steel casting into a mold of rectangular cross-section and flow diagrams of liquid metal over various mold sections. Vector flows of liquid metal in various mold sections are clearly presented for different rotary speed of the rotating jacket. The authors identified the areas of intense turbulence and presented the results of the problem numerical solution in graphical form by diagrams of the velocity fields of liquid metal flows and their temperature over various mold sections.

**Keywords:** modeling, mold, liquid metal, filling, melt flow, mathematical model, numerical scheme, algorithm, flow rate

**For citation:** Odnokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Karpenko V.A. Simulation of a new process of mixing liquid metal in CCM mold with rotating cooling jacket with vertical ribs. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6):733–742.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-733-742>

## ВВЕДЕНИЕ

Все больший интерес среди исследователей и производственников проявляется к разработке новых и совершенствованию существующих способов подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС и МНЛЗ, а также устройств для их осуществления.

Экспериментальные исследования течения жидкого металла в кристаллизаторе являются продолжительным, сложным и трудоемким процессом, поэтому все шире используется для этого математическое моделирование, особенно численными методами.

Теоретические и практические вопросы подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС рассмотрены в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей, в том числе и по изучению качества получаемых заготовок.

Известен традиционный способ [1 – 5] создания условий для более равномерного омывания жидким металлом стенок кристаллизатора и получения однородной структуры по периметру заготовки, когда металл из промежуточного ковша поступает в кристаллизатор через окна глухонного погружного стакана, расположенные друг относительно друга под углом 180°.

Предложен ряд новых способов выхода жидкого металла в кристаллизатор из погружного стакана: различные наклоны окон [6], их эксцентричное расположение [7], установка нескольких погружных стаканов [8], электромагнитное перемешивание жидкого металла в кристаллизаторе [9], выход металла на отражатель [10].

Другие новаторские решения и практические результаты по подаче жидкого металла в кристаллизатор УНРС и его перемешивание представлены в работах [11 – 13].

Продолжаются разработки моделей для математического исследования процессов течения жидкого металла в кристаллизаторе и затвердевания стали, а именно, за счет применения цифрового моделирования [14], установления важности вторичного потока при вращательном электромагнитном перемешивании стали при непрерывной разливке [15], моделирования течения металла

внутри МНЛЗ и УНРС [16; 17], турбулентного течения и переноса частиц при непрерывной разливке стали [18], а также моделей затвердевания металла [19 – 21] и теплопередачи при затвердевании [22 – 24].

При этом для ряда способов подачи жидкого металла в кристаллизатор уже построены математические модели, позволяющие по движущемуся жидкому металлу в объеме кристаллизатора оценить эффективность того или иного устройства, с помощью которого осуществляется рассматриваемый процесс [7; 8].

Однако очень мало работ посвящено математическому моделированию этих процессов (особенно численными методами), что ограничивает возможности проектирования новых технологий подачи и перемешивания жидкого металла в УНРС и МНЛЗ.

Несмотря на имеющийся задел и опыт, следует отметить, что проблема проектирования и моделирования процессов и устройств подачи и перемешивания расплава в кристаллизаторе изучено недостаточно широко, что подчеркивает актуальность решаемых задач.

Таким образом, актуальной задачей остается разработка новых процессов по подаче и перемешиванию расплава в кристаллизаторе и их математическое моделирование, позволяющее еще на стадии разработки и проектирования новых устройств предсказать их работоспособность и эффективность.

В настоящей работе предложены новые технологии разливки жидкого металла в кристаллизатор за счет использования эффекта вращения для перемешивания в кристаллизаторе.

Целью настоящей работы является построение математической модели, описывающей гидродинамические процессы в кристаллизаторе УНРС при использовании нового предложенного способа подвода стали в кристаллизатор, а также обоснование полезности применения принудительного вращения для подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали по сравнению со свободным вращением стакана при разливке стали.

В настоящей работе описывается и анализируется новый процесс подачи и перемешивания жидкой стали в кристаллизаторе УНРС [25]. Рассматриваемый про-

песс, в отличие от описанных ранее [26; 27], позволяет в широких диапазонах регулировать скорость перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС, что способствует получению более качественного непрерывного слитка.

На рис. 1 изображена схема этого устройства. Из ковша 1 металл через глуходонный стакан 2 поступает в кристаллизатор 5. Глуходонный стакан 2 имеет эксцентрично расположенные отверстия 4. По наружной поверхности глуходонного стакана выше его выходных отверстий установлена с зазором огнеупорная рубашка 3, имеющая ребра 6. Рубашка соединена с механизмом вращения, состоящим из упорного подшипника 7, редуктора 8 и электродвигателя 9.

Рассматриваемый процесс не стационарный (квази-стационарный). При математическом описании процесса были приняты допущения (формализация). Глуходонный стакан в сечении выпуска и вращающаяся огнеупорная рубашка имеют одинаковое внешнее квадратное сечение, поэтому огнеупорная рубашка при вращении будет перемешивать жидкий металл в кристаллизаторе также и своими гранями.

При заданном направлении вращения одна половина грани квадрата огнеупорной рубашки как бы выталкивает жидкий металл от себя, а вторая – его втягивает. В этом случае можно считать погружной стакан неподвижным, а через грани рубашки втекает и вытекает металл со скоростями, пропорциональными скоростям вращения и геометрическим размерам квадратного сечения этой огнеупорной рубашки. Такая идеализация подробно описана в работе [1] и позволяет рассматривать данный процесс как стационарный. Кроме того, не учитываются появляющиеся на гранях кристаллизатора корочки затвердевшего металла.

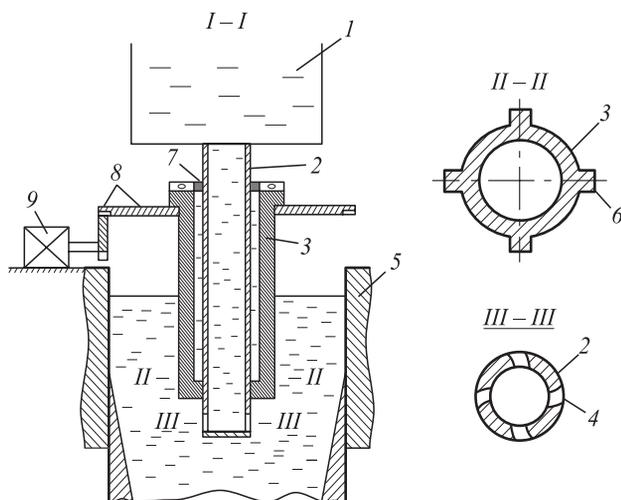


Рис. 1. Схема устройства для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе с вращающейся рубашкой с вертикальными ребрами

Fig. 1. Scheme of a device for feeding and mixing of steel in the mold with rotating jacket with vertical ribs

Среда (жидкий металл) считается несжимаемой. Рассмотрим уравнения гидродинамики. Для течения ньютоновской вязкой несжимаемой жидкости справедливы следующие уравнения (процесс стационарный):

$$\sigma_{ij,j} + F_i^* = I_i^*; I_i^* = \rho \left( \dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij}; \xi_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}); \quad (2)$$

$$v_{i,i} = 0; i = 1, 2, 3; \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a\Delta\theta; \frac{d\theta}{d\tau} = v_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i}; i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

здесь  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\xi_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $p$  – давление в данной точке ( $p = -\sigma$ );  $\sigma$  – гидростатическое напряжение;  $\mu$  – коэффициент вязкости, (г·с)/см<sup>2</sup>;  $v_i$  – проекция скоростей перемещений по координатным осям  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ );  $\rho$  – плотность жидкого металла;  $F_i^*$  – проекция удельной объемной силы на координатные оси  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ );  $\tau$  – время;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\theta$  – температура;  $a = \lambda/(c\gamma)$  – температуропроводность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\gamma$  – плотность (все они принимаются постоянными (константами)).

Для стационарного процесса:

$$\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau} = 0.$$

Уравнение теплопроводности записано с учетом массопереноса и стационарности.

На рис. 2 представлена расчетная схема рассматриваемого процесса.

Граничные условия задачи следующие (рис. 2):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{\Gamma_2} &= p_1; (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{\Gamma_i} = 0; i = 1 \div 3; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_i} &= 0; i = 5 \div 8; \\ (\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{\Gamma_i} &= 0; i = 9 \div 11; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_8} &= 0; (\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{\Gamma_8} = 0; \\ v_2|_{\Gamma_5} &= v^*; \\ v_3|_{\Gamma_8} &= V_l; \\ v_2|_{\Gamma_8} &= V_l; \\ v_1|_{\Gamma_1} &= v_u; \\ v_1|_{\Gamma_3} &= 0; \\ v_2|_{\Gamma_i} &= 0; i = 6 \div 8; \\ v_3|_{\Gamma_i} &= 0; i = 9 \div 11. \end{aligned} \quad (5)$$

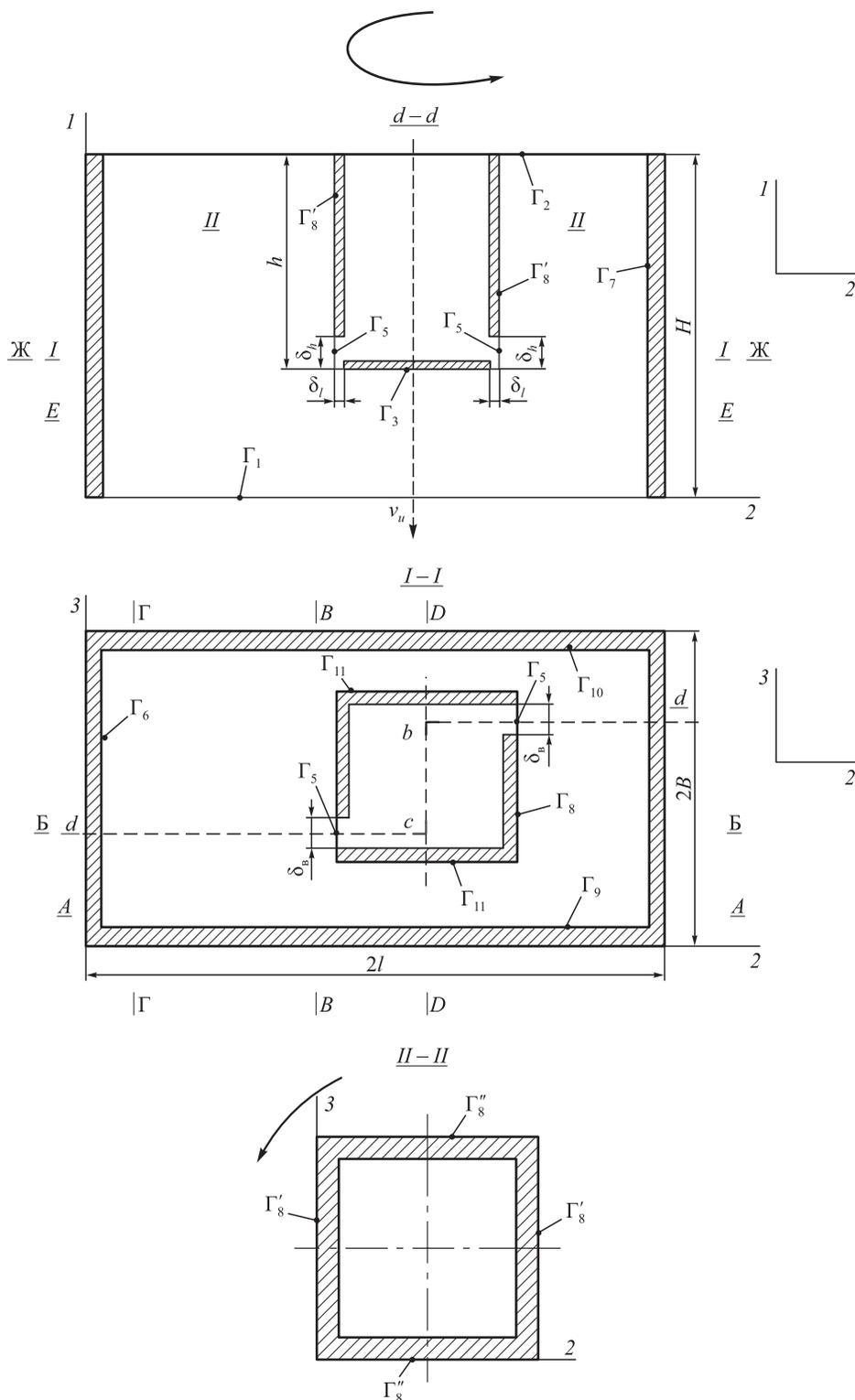


Рис. 2. Формализованная расчетная схема процесса разлива металла в кристаллизатор

Fig. 2. Formalized design scheme of metal casting into the mold

При решении уравнения теплопроводности (4) использовались граничные условия:

$$\theta|_{\Gamma_i} = \theta_i^*; \quad i = 1 \div 10;$$

$$q|_{\Gamma_i} = q_i^*; \quad i = 6, 7, 9, 10;$$

здесь  $v_u$  – скорость вытягивания слитка (рис. 2);  $v_2^*$  – скорость выхода жидкого металла из окон погружного стакана;  $\theta_i^*$  – заданные функции распределения температуры металла на поверхностях  $\Gamma_i$ ;  $q_i^*$  – заданные из экспериментальных данных тепловые потоки через поверхности  $\Gamma_i$ ;  $\theta_5^*$  – заданная температура выхода металла из окна  $\Gamma_5$ .

Численная схема и алгоритм решения системы уравнений (1) – (4) при граничных условиях (5), (6) подробно описаны в работе [28] с использованием широко апробированного численного метода.

Ниже приводятся результаты полученного численного решения поставленной задачи в различных сечениях кристаллизатора с их анализом.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА**

Принимаем следующие существующие размеры кристаллизатора:  $H = 100$  см;  $B = 12,5$  см;  $l = 100$  см;  $h = 20$  см;  $b = 7,5$  см;  $\delta_h = 8,5$  см;  $\delta_B = 1,5$  см;  $\delta_1 = 1,5$  см;  $v_u = 1$  м/мин = 1,66 см/с. Для стационарного процесса величину  $v^*$  определяли из равенства секундных объемов:

$$v_u Bl = v^* \delta_n \delta_B \Rightarrow v^* = \frac{v_u Bl}{\delta_n \delta_B}.$$

Температура истекания жидкой стали из окна ( $\Gamma_5$ ) принимали  $\theta^*_{\Gamma_5} = 1600$  °С. Температуры на поверхностях стакана (рис. 2)  $\Gamma_i$  ( $i = 3, 8, 8', 11$ ) принимались по экспериментальным данным  $\theta^*_{\Gamma_i} = 1550$  °С,  $i = 3, 8, 8', 11$ . На поверхности  $\Gamma_2$  (рис. 2) находится жидкая шлаковая «рубашка», температура которой  $\theta^*_{\Gamma_2} = 1550$  °С.

Константы  $\lambda = 0,29$  Вт/(см·с);  $c = 444,47$  Дж/(кг·с);  $\gamma = 7,8$  г/см<sup>3</sup>. Коэффициент вязкости  $\mu = 2,1 \cdot 10^{-4}$  (кг·с)/м<sup>2</sup> в уравнениях (2) принимался по работе [29].

На рис. 3 показаны потоки металла в сечении  $A - A$  при вращении рубашки со скоростью ( $n$ ) 30 и 50 об/мин.

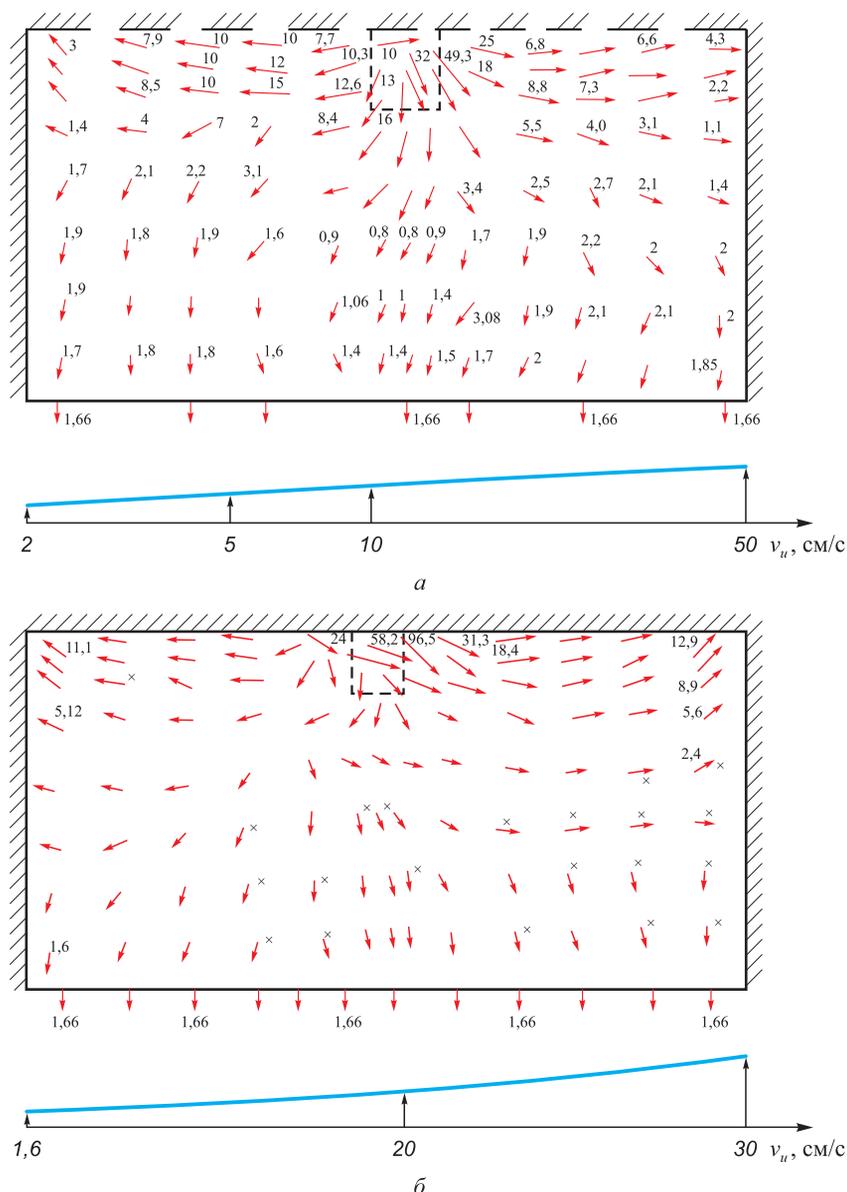


Рис. 3. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении  $A - A$  при  $n = 30$  (а) и 50 об/мин (б)

Fig. 3. Velocity field of metal flows in the mold cross-section  $A - A$  at  $n = 30$  (a) and 50 rpm (б)

Картины течения схожие, но более интенсивно при  $n = 50$  об/мин (рис. 3, б). В сечении  $A - A$  имеет место хаотичное движение металла в области погружного стакана. Звездочками на рис. 3, б помечены области, где температура металла выше температуры кристаллизации. В сечении  $A - A$  отслеживается более выраженная неравномерность температур в потоках движущегося металла.

На рис. 4 показаны потоки металла в сечении  $B - B$  – это вертикальное сечение у выхода металла из погружного стакана. На рис. 4 показаны потоки при вращении рубашки при  $n$ , равном 30 и 50 об/мин. Все векторы потоков направлены преимущественно вниз. Интенсивность, как и следовало ожидать, больше при  $n = 50$  об/мин.

На рис. 5, а изображены потоки металла в сечении  $D - D$  (рис. 2) при вращении рубашки при  $n$ , равном 30 и 50 об/мин. Наблюдаются малые вихри под погружным стаканом по его центру при  $n = 30$  об/мин (рис. 5, а), при  $n = 50$  об/мин – вихри отсутствуют. Ско-

рость потока металла по боковым граням значительно выше, чем под погружным стаканом.

На рис. 6 показаны векторные потоки металла в горизонтальном сечении  $E - E$  при скорости вращения рубашки  $n$ , равном 30 и 50 об/мин.

Векторные потоки мало чем отличаются как по характеру движения, так и по скорости. Для величины  $n = 50$  об/мин на рис. 7 приведены потоки металла в горизонтальном сечении погружного стакана по выходным окнам (сечение  $Ж - Ж$ ). Наблюдаем тот же характер течения металла, что и в сечении  $E - E$  (рис. 6), но более интенсивной величины.

При скорости вращения  $n = 50$  об/мин металл в узких стенках кристаллизатора может проникать в область шлаковой подушки. На рис. 8 показано поле движения жидкого металла (сечение  $\Gamma' - \Gamma'$ ). Действительно, движение жидкого металла направлено вверх, причем это движение охватывает по высоте половину вертикальной плоскости боковой стенки кристаллизатора, ускоряясь к шлаковой рубашке, где достигает

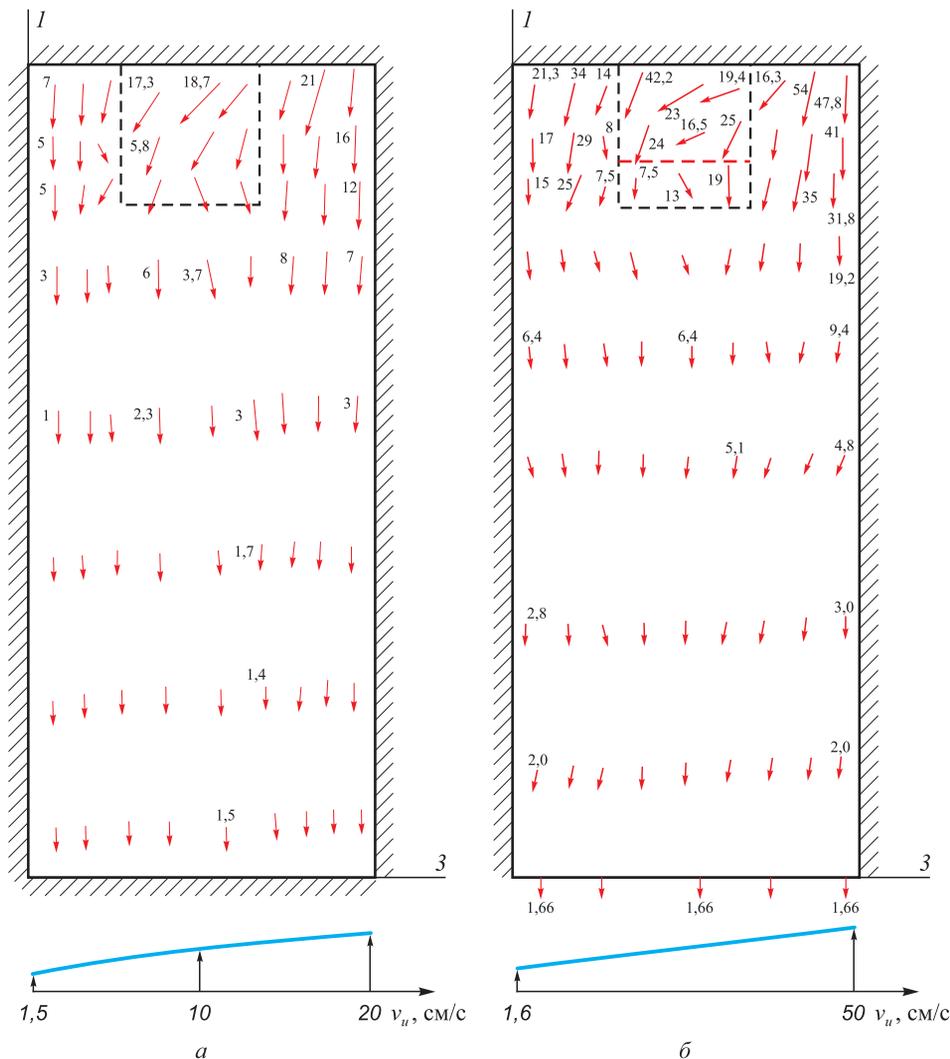


Рис. 4. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении  $B - B$  при  $n = 30$  (а) и 50 об/мин (б)

Fig. 4. Velocity field of metal flows in the mold cross-section  $B - B$  at  $n = 30$  (a) and 50 rpm (б)

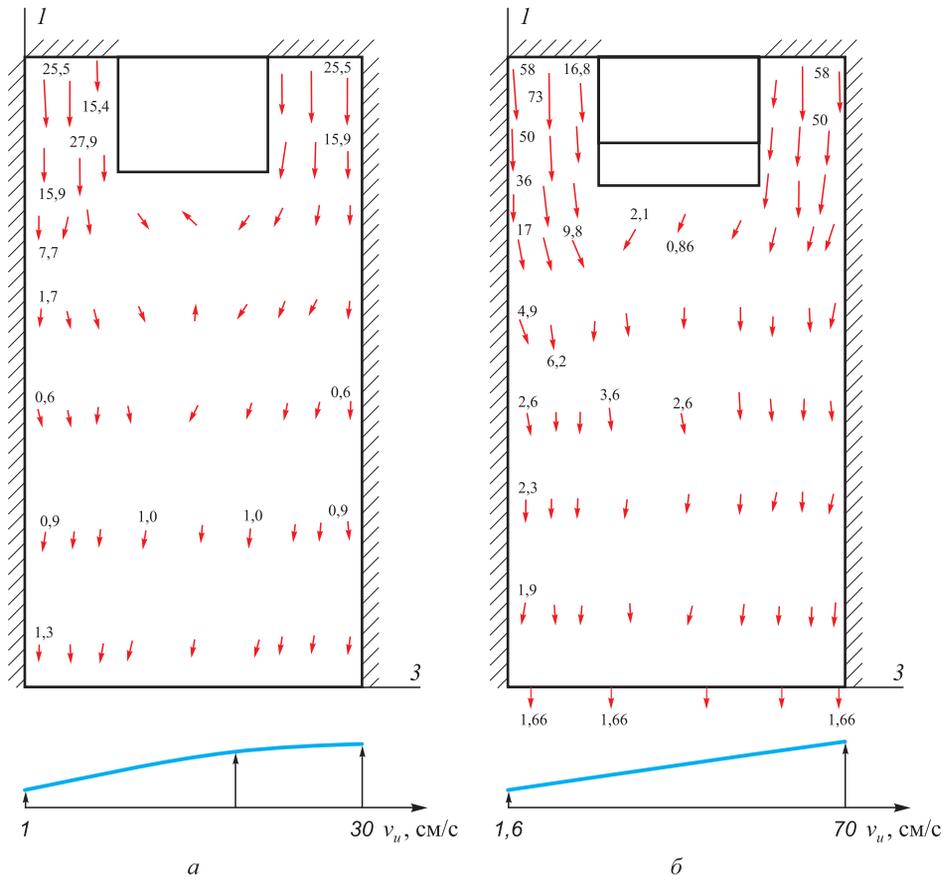


Рис. 5. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении  $D - D$  при  $n = 30$  (а) и 50 об/мин (б)

Fig. 5. Velocity field of metal flows in the mold cross-section  $D - D$  at  $n = 30$  (a) and 50 rpm (б)

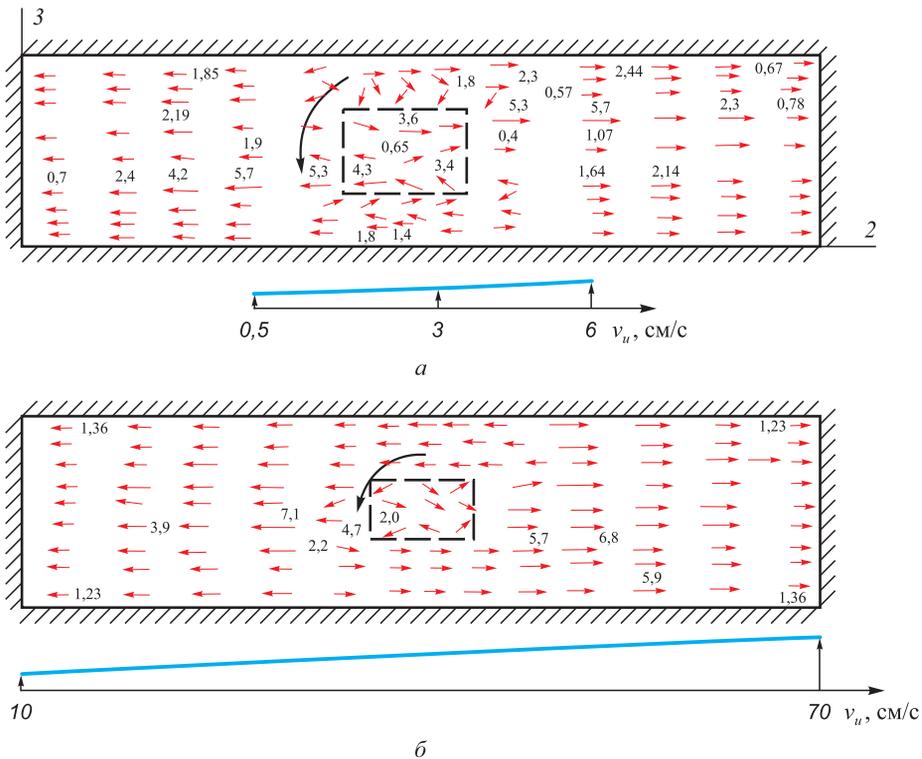


Рис. 6. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении  $E - E$  при  $n = 30$  (а) и 50 об/мин (б)

Fig. 6. Velocity field of metal flows in the mold cross-section  $E - E$  at  $n = 30$  (a) and 50 rpm (б)

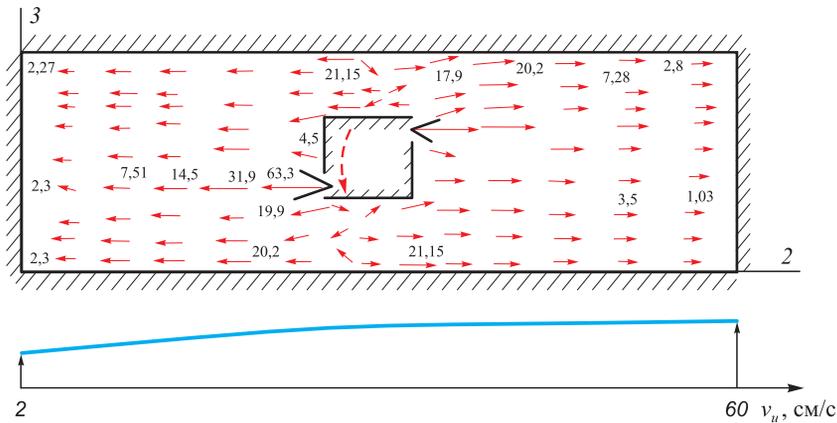


Рис. 7. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Ж – Ж при  $n = 50$  об/мин

Fig. 7. Velocity field of metal flows in the mold cross-section Ж – Ж at  $n = 50$  rpm

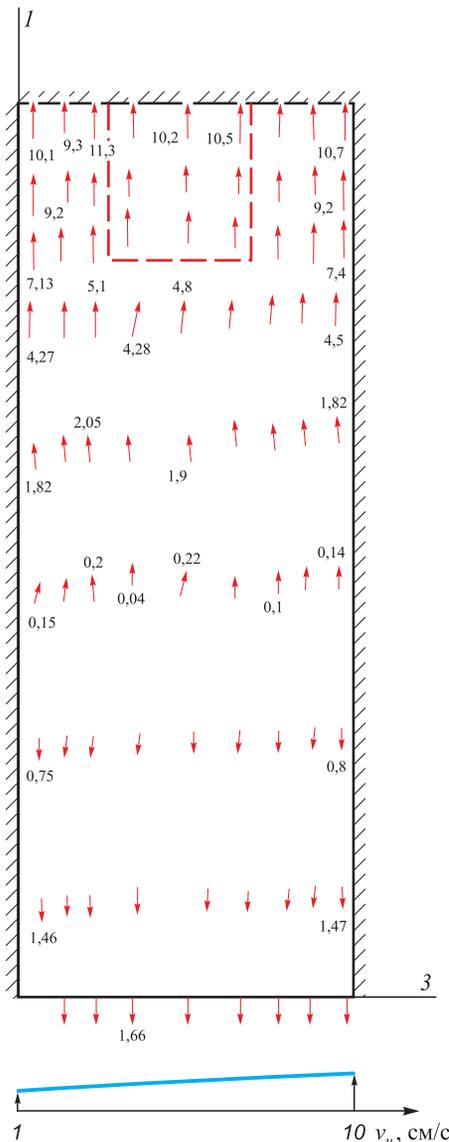


Рис. 8. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Г' – Г' при  $n = 50$  об/мин

Fig. 8. Velocity field of metal flows in the mold cross-section Г' – Г' at  $n = 50$  rpm

10 см/с. В сечении  $D - D$  металл устремляется интенсивно вниз от шлаковой рубашки (рис. 5, б). Можно предположить, что под шлаковой рубашкой происходит интенсивные вихревые движения металла. Это не очень полезное явление, так как может быть захват шлака в область непрерывного слитка, что негативно повлияет на его качество.

### Выводы

Получены численные результаты теоретического исследования:

- при принудительном перемешивании жидкого металла в кристаллизаторе прямоугольного сечения происходит интенсивное омывание стенок кристаллизатора, что безусловно способствует отводу тепла от жидкого металла к стенкам кристаллизатора;

- внутри кристаллизатора, особенно в верхней его части наблюдается ускоренное движение потоков жидкого металла;

- на узких стенках кристаллизатора наблюдается заброс жидкого металла (даже при  $n = 30$  об/мин) в область шлаковой рубашки, что может привести к попаданию части шлака в непрерывно-литой слиток; чтобы избежать этого явления, можно продвинуть погружной стакан вместе с вращающейся рубашкой глубже в кристаллизатор, что возможно при увеличении высоты кристаллизатора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Смирнов А.Н. *Производство стали. Т. 4. Непрерывная разливка металла.* Москва: Теплотехник; 2009:528.
2. Ефимов В.А. *Разливка и кристаллизация стали.* Москва: Металлургия; 1976:552.
3. Акименко А.Д., Гирский В.Е., Гуськов А.И. Влияние способов подвода металла в кристаллизатор на формирование осевой зоны квадратного слитка. *Сталь.* 1973;(5):408-409.

- Akimenko A.D., Girsii V.E., Gus'kov A.I. Influence of methods of metal supply to a mold on formation of axial zone in a square ingot. *Stal'*. 1973;(5):408–409. (In Russ.).
4. Одинок В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора УНРС\*. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017;60(6):493–498.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-493-499>
  - Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I. Numerical modeling of the process of filling the CCM mold with metal. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017;60(6):493–498. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-493-499>
  5. *Proceedings of the Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials. October 25–28, 1994, Nagoya, Japan*. ISIJ; 1994:580.
  6. Стулов В.В., Матысик В.А., Новиков Т.В., Щербачков С.В., Чистяков И.В., Плотников А.П. *Разработка нового способа разливки слябовых заготовок на МЛНЗ*. Владивосток: Дальнаука; 2008:156.  
Stulov V.V., Matysik V.A., Novikov T.V., Shcherbakov S.V., Chistyakov I.V., Plotnikov A.P. *Development of a New Method for Casting Slab Blanks in CCM*. Vladivostok: Dal'nauka; 2008:156. (In Russ.).
  7. Одинок В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И. Математическое моделирование процесса течения металла в кристаллизаторе при его подаче из погружного стакана с эксцентричными отверстиями. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(8):606–612.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-606-612>
  - Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I. Mathematical modeling of metal flow in crystallizer at its supply from submersible nozzle with eccentric holes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(8):606–612. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-606-612>
  8. Куберский С.В., Семирягин С.О., Федоров О.В. *Расчеты технологических и конструктивных параметров МЛНЗ: Учебное пособие*. Алчевск: ДОНГТУ; 2006:146.
  9. Смирнов А.А., Нисковских В.М., Куликов В.И. Исследование процесса электромагнитного перемешивания металла в слябовых МЛНЗ методом моделирования. В кн.: *Совершенство конструкций, исследование и расчет машин непрерывного литья заготовок. Сборник научных трудов*. Москва: ВНИИМЕТМАШ; 1987:85–90.
  10. Одинок В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А. Численное моделирование процесса заполнения металла кристаллизатора с отражателем УНРС. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(10):747–755.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-747-755>
  - Odinokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A. Numerical modelling of metal filling in CCM mold completed with deflector. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(10):747–755. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-747-755>
  11. Нарцт Х.-П., Келлерер С., Штахельбергер К., Мёрвальд К., Федершпиль К., Валь Г. Новаторские решения и практические результаты технологии непрерывного литья слябов. *Черные металлы*. 2003;(11):34–38.  
Nartst Kh.-P., Kellerer S., Shtakelberger K., Merval'd K., Fedeshpil' K., Val' G. Innovative solutions and practical results of continuous slab casting technology. *Chernye metally*. 2003;(11):34–38. (In Russ.).
  12. Виммер Ф., Тене Х., Пекштайнер Л. Высокоскоростное литье мелкосортных заготовок на МНЛЗ с кристаллизатором «Дайэмоулд». *Сталь*. 1999;(6):22–26.  
Vimmer F., Tene X., Pekshtainer L. High-speed casting of small-grade billets on CCM with Diamond mold. *Stal'*. 1999;(6):22–26. (In Russ.).
  13. Айхингер А., Фрауэнхубер К., Хедль Х., Мервальд К. Новейшее оборудование для высокопроизводительной непрерывной разливки. *Сталь*. 2000;(3):25–28.  
Aikhinger A., Frauenkhuber K., Khedl' X., Merval'd K. Modern equipment for high-performance continuous casting. *Stal'*. 2000;(3):25–28. (In Russ.).
  14. Олер К., Оденталь Х.-Ю., Пфайфер Г., Леманович И. Цифровое моделирование процессов течения и затвердевания металла в МНЛЗ для литья тонких слябов. *Черные металлы*. 2002;(8):22–30.  
Oler K., Odental' Kh.-Yu., Pfaifer G., Lemanovich I. Digital modeling of metal flow and solidification in CCM for casting thin slabs. *Chernye metally*. 2002;(8):22–30. (In Russ.).
  15. Davidson P.A., Boysan F. The importance of secondary flow in the rotary electromagnetic stirring of steel during continuous casting. *Applied Scientific Research*. 1987;44(1–2):241–259. <http://doi.org/10.1007/BF00412016>
  16. Thomas B.G., Mika L.J., Najjar F.M. Simulation of fluid flow inside a continuous slab casting machine. *Metallurgical Transactions B*. 1990;21(2):387–400.  
<http://doi.org/10.1007/BF02664206>
  17. Thomas B.G., Zhang L. Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting. *ISIJ International*. 2001;41(10):1181–1193. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1181>
  18. Yuan Q., Shi T., Vanka S.P., Thomas B.G. Simulation of turbulent flow and particle transport in the continuous casting of steel. In: *Computational Modeling of Materials Minerals and Metals*. Warrendale, PA; 2002:491–500.
  19. Larreq M., Sagues C., Wanin M. Vodele mathematique de la solidification eu coulee continue tenant compte de la convection al'interface solide-liquide. *Revue de Metallurgie*. 1978;75(6):337–352.
  20. Ozava M., Okano S., Matsuno J. Influence des contitions du jet de coulee sur la formation de la peau solidifiee eu lingotiere de brames de colee con-tinue. *Tetsu-to-Hagane*. 1976;62(4):86.
  21. Kohn A., Morillon Y. Etnde mathematique de la solidification des lingots en acier mi-dur. *Revue de Metallurgie*. 1966;63(10):779–790.
  22. Ho K., Pehlke R. Modelling of steel solidification using the general finite difference method. In: *5<sup>th</sup> Int. Iron and Steel Congress. Proceedings of the 6<sup>th</sup> Process Technol. Conf. (Apr. 6–9, 1986)*. Warrendale; 1986;6:853–866.
  23. Mizikar E. Mathematical heat transfer model for solidification of continuous cast steel slabs. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1967;239(11):1747.
  24. Szekely J., Stanek V. On heat transfer and liquid mixing in the continuous casting of steel. *Metallurgical Transactions*. 1970;1(1):119. <https://doi.org/10.1007/BF02819250>
  25. Патент №2764446 РФ. *Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки* / Одинок В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А.

- риев Э.А., Александров А.Ю., Карпенко В.А.; заявл. 20.05.2021; опублик. 17.01.2022. Бюл. № 2.
26. Одинок В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Кузнецов С.А., Горнаков А.И. Совершенствование устройств по заполнению кристаллизатора УНРС жидким металлом. *Металлург.* 2021;(4):33–35.  
[https://doi.org/10.52351/00260827\\_2021\\_04\\_33](https://doi.org/10.52351/00260827_2021_04_33)  
Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I., Kuznetsov S.A., Gornakov A.I. Improvement of devices for filling CCM mold by liquid metal. *Metallurg.* 2021;(4):33–35. (In Russ.). [https://doi.org/10.52351/00260827\\_2021\\_04\\_33](https://doi.org/10.52351/00260827_2021_04_33)
27. Одинок В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Александров С.Ю., Карпенко В.А. Совершенствование устройств для подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывного литья стали. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2022;20(3):99–103.  
<https://doi.org/10.36652/1684-1107-2022-20-3-99-102>
- Odinokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Karpenko V.A. Mathematical modeling of mixing liquid metal in CCM mold. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody.* 2023;(3):18–41. (In Russ.).
29. Kim, W.S., Chair T.S. A simplified phenomenological theory of viscosity for liquid metals. *Bulletin of the Korean Chemical Society.* 2001;22(1):43–45.

### Сведения об авторах

### Information about the Authors

**Валерий Иванович Одинок**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0000-0003-0200-1675  
**E-mail:** 79122718858@yandex.ru

**Алексей Иванович Евстигнеев**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0000-0002-9594-4068  
**E-mail:** diss@knastu.ru

**Эдуард Анатольевич Дмитриев**, д.т.н., доцент, ректор, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0000-0001-8023-316X  
**E-mail:** rector@knastu.ru

**Владимир Анатольевич Карпенко**, соискатель степени к.т.н., Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0009-0003-7137-0789  
**E-mail:** volodya.karpenko.89@mail.ru

**Valerii I. Odinokov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0000-0003-0200-1675  
**E-mail:** 79122718858@yandex.ru

**Aleksei I. Evstigneev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0000-0002-9594-4068  
**E-mail:** diss@knastu.ru

**Eduard A. Dmitriev**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Rector, Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0000-0001-8023-316X  
**E-mail:** rector@knastu.ru

**Vladimir A. Karpenko**, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.), Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0009-0003-7137-0789  
**E-mail:** volodya.karpenko.89@mail.ru

### Вклад авторов

### Contribution of the Authors

**В. И. Одинок** – научное руководство, анализ результатов исследований, редактирование и корректировка финальной версии статьи.

**А. И. Евстигнеев** – формирование концепции статьи, определение цели и задачи исследования, анализ результатов исследования, подготовка текста.

**Э. А. Дмитриев** – проведение расчетов, их анализ, подготовка и корректировка текста.

**В. А. Карпенко** – проведение расчетов, их анализ, подготовка библиографического списка, обработка графического материала, оформление материалов.

**V. I. Odinokov** – scientific guidance, analysis of the research results, editing and correction of the final version of the article.

**A. I. Evstigneev** – formation of the article concept, setting the goal and objectives of the study, analysis of the research results, writing the text.

**E. A. Dmitriev** – conducting calculations, analysis, writing and correction of the text.

**V. A. Karpenko** – conducting calculations, analysis, preparation of references, processing of graphic material, design of materials.

Поступила в редакцию 27.06.2023  
После доработки 12.07.2023  
Принята к публикации 14.07.2023

Received 27.06.2023  
Revised 12.07.2023  
Accepted 14.07.2023