



Оригинальная статья

УДК 519.677

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-302-310



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА УНРС ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ ПРИ ЕГО ПОДАЧЕ ИЗ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ПОГРУЖНОГО СТАКАНА

В. И. Одинокое¹, А. И. Евстигнеев^{1,2}, Э. А. Дмитриев¹,
С. Ю. Александров¹, Г. И. Усанов¹

¹ Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Россия, 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

² Хабаровский федеральный исследовательский центр (Институт машиноведения и металлургии) ДВО РАН (Россия, 681005, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1)

Аннотация. Экспериментальные исследования течения жидкого металла в кристаллизаторе УНРС являются продолжительным, сложным и трудоемким процессом. Поэтому все шире используется для этого математическое моделирование численными методами. Предложена новая технология разлива жидкого металла в кристаллизатор. Приведена оригинальная запатентованная конструкция устройства, состоящая из прямооточного и вращающегося глухонного стаканов. Представлены основные результаты исследований течения расплава в объеме кристаллизатора. Объектами исследований стали гидродинамические и тепловые потоки жидкого металла нового процесса разлива стали в кристаллизатор прямоугольного сечения УНРС, а результатом – пространственная математическая модель, описывающая потоки и температуры жидкого металла в кристаллизаторе. Для моделирования процессов, протекающих при течении металла в кристаллизаторе, использован специально созданный программный комплекс. В основу теоретических расчетов положены основополагающие уравнения гидродинамики, уравнения математической физики (уравнение теплопроводности с учетом массопереноса) и апробированный численный метод. Исследуемую область разбивали на элементы конечных размеров, для каждого элемента записывали в разностном виде полученную систему уравнений. Результат решения – поля скоростей и температур потока металла в объеме кристаллизатора. По разработанным численным схемам и алгоритмам составлена программа расчета. Приведен пример расчета разлива 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 углах поворота глухонного стакана. Выявлены области интенсивной турбулентности. Представлено сравнение потоков металла описанного технологического процесса заливки с традиционной подачей металла через неподвижный глухонный стакан.

Ключевые слова: численное моделирование, гидродинамика, теплоперенос, жидкий металл, разлива, кристаллизатор, установка непрерывной разлива стали, вращающийся погружной стакан

Для цитирования: Одинокое В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Александров С.Ю., Усанов Г.И. Математическое моделирование процесса заполнения кристаллизатора УНРС жидким металлом при его подаче из вращающегося погружного стакана // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 302–310. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-302-310>

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF FILLING THE CCM MOLD WITH LIQUID METAL DURING ITS SUPPLY FROM A ROTATING SUBMERSIBLE NOZZLE

V. I. Odinokov¹, A. I. Evstigneev^{1,2}, E. A. Dmitriev¹,
S. Yu. Aleksandrov¹, G. I. Usanov¹

¹ Komsomolsk-on-Amur State University (27 Lenina Ave., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681013, Russian Federation)

² Khabarovsk Federal Research Center (Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences) (1 Metallurgov Str., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681005, Russian Federation)

Abstract. Experimental studies of the flow of liquid metal in CCM mold are long, complex and labor consuming process. Therefore, mathematical modeling by numerical methods is increasingly used for this purpose. The article considers a new technology for liquid metal supply into a mold. The authors present original patented design of the device, consisting of direct-flow and rotating bottom nozzles. The main results of investigations of the melt flow in the mold are considered. The objects of research were hydrodynamic and heat flows of liquid metal at new process of steel casting

into a CCM mold of rectangular section. The result is spatial mathematical model describing flows and temperatures of liquid metal in the mold. To simulate the processes occurring during metal flow in the mold, special software was designed. Theoretical calculations are based on fundamental equations of hydrodynamics, equations of mathematical physics (equation of heat conduction taking into account mass transfer) and proven numerical method. The area under study was divided into elements of finite dimensions; for each element, resulting system of equations was written in difference form. The results are fields of velocities and temperatures of metal flow in the mold volume. A calculation program was compiled based on developed numerical schemes and algorithms. An example of calculation of steel casting into a mold of rectangular cross-section, and flow diagrams of liquid metal along various sections of the mold are given. Vector flows of liquid metal in different sections of the mold are clearly presented at different angles of rotation of the deep-bottom nozzle. The authors have identified the areas of intense turbulence. Metal flows of the described technological process were compared with traditional metal supply through a fixed bottom nozzle.

Keywords: numerical modeling, hydrodynamics, heat and mass transfer, liquid metal, casting, mold, CCM, rotating submersible nozzle

For citation: Odnokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Aleksandrov S.Yu., Usanov G.I. Mathematical modeling of filling the CCM mold with liquid metal during its supply from a rotating submersible nozzle. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 302–310. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-302-310>

ВВЕДЕНИЕ

Получение непрерывнолитого слитка с качественной структурой начинается при заливке жидкого металла в кристаллизатор установки непрерывной разливки стали (УНРС). Именно в кристаллизаторе УНРС начинает формироваться твердая фаза металла и его зернистая структура. Известно, что чем интенсивнее и равномернее потоки металла в объеме кристаллизатора, тем мельче получаемое при кристаллизации зерно металла и эффективнее процесс теплоотвода через стенки кристаллизатора. В многочисленных работах описываются различные способы и устройства подачи жидкого металла в кристаллизатор УНРС [1 – 3], использование магнитного перемешивания [4], подача металла из нескольких погружных стаканов [5], подача металла в кристаллизатор из погружного стакана с эксцентричными отверстиями для выхода металла [6], выход металла с помощью отражателя [7]. Другие новаторские решения и практические результаты по подаче жидкого металла в кристаллизатор УНРС и его перемешивание представлены в работах [8 – 22].

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 этот процесс [23].

Предложен новый процесс заполнения жидким металлом и его перемешивание в кристаллизаторе УНРС [24]. В работе [25] математически описан этот новый процесс и представлены некоторые результаты моделирования только по двум сечениям кристаллизатора.

В настоящей работе представлены результаты исследования кинематики потоков жидкого металла по всем другим сечениям кристаллизатора.

Постановочные инженерные и математические части задачи в основном изложены в работе [25], в которой в графическом виде представлена схема процесса разлива жидкого металла в кристаллизатор при свободном вращении погружного стакана. Обоснована схема вращения квадратного погружного стакана для вычисления потоков металла в двух положениях. Идеализация про-

цесса [25] позволяет рассматривать процесс как стационарный, что значительно облегчает его постановку и решение. Кроме того, не учитывается появляющаяся на гранях кристаллизатора корочка затвердевшего металла.

Суть нового способа состоит в следующем. Жидкий металл из ковша через погружной прямооточный стакан поступает в плавающий глухонный стакан квадратного поперечного сечения, откуда через эксцентричные окна выходит в кристаллизатор. Выходящие из эксцентричных окон струи жидкого металла создают вращательный момент, приводящий в движение (вращение) плавающий глухонный стакан.

Вследствие вращения глухонного стакана струи жидкого металла будут создавать эффект перемешивания, которое дополнительно усиливается от вращения квадратных граней. Квазистационарный процесс повторяется при повороте квадратного стакана на 180° при кристаллизаторе прямоугольного сечения и на 90° при кристаллизаторе квадратного поперечного сечения. Рассмотрим процесс подачи металла в кристаллизатор прямоугольного поперечного сечения.

При математической постановке задачи рассматривали стационарный процесс истечения жидкого металла из окон квадратного стакана в кристаллизатор прямоугольного поперечного сечения. Среда (жидкий металл) считается несжимаемой.

Для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) и стационарного течения $\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} = 0\right)$ имеем следующую систему уравнений гидродинамики:

– закон количества движения

$$F_i^* - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 v_i = I_i, \quad F_2^* = F_3^* = 0;$$

$$I_i = \rho \frac{dv_i}{d\tau}, \quad \frac{dv_i}{d\tau} = v_k \frac{dv_i}{dx_k}, \quad i, k = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$\nabla^2 v_i = \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_3^2}, \quad i = 1, 2, 3;$$

– уравнение несжимаемости

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

$$v_{i,i} = 0, i = 1, 2, 3; \quad (6)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; δ_{ij} – символ Кронекера.

Для стационарного процесса:

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

Граничные условия задачи имеют вид (рис. 1):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{\Gamma_2} &= p_1; \quad (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 1 \div 3; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_i} &= 0; \quad i = 4, 6, 7; \\ \sigma_{31} = \sigma_{32}|_{\Gamma_i} &= 0; \quad i = 5, 8; \\ v_3|_{\Gamma_6} &= V_3^*; \quad v_2|_{\Gamma_5} = V_2^*; \\ v_1|_{\Gamma_1} &= v_u; \quad v_1|_{\Gamma_3} = 0; \quad v_2|_{\Gamma_7} = 0; \\ v_2|_{\Gamma_4} &= v_2^*; \quad v_3|_{\Gamma_8} = 0. \end{aligned} \tag{7}$$

При решении уравнения (3) использовали следующие граничные условия:

$$\sigma_{ij,j} + F_i^* = I_i^*, \quad I_i^* = \rho \left(\dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right); \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij}, \quad \xi_{ij} = \frac{1}{\gamma} (v_{i,j} + v_{j,i}); \quad (5)$$

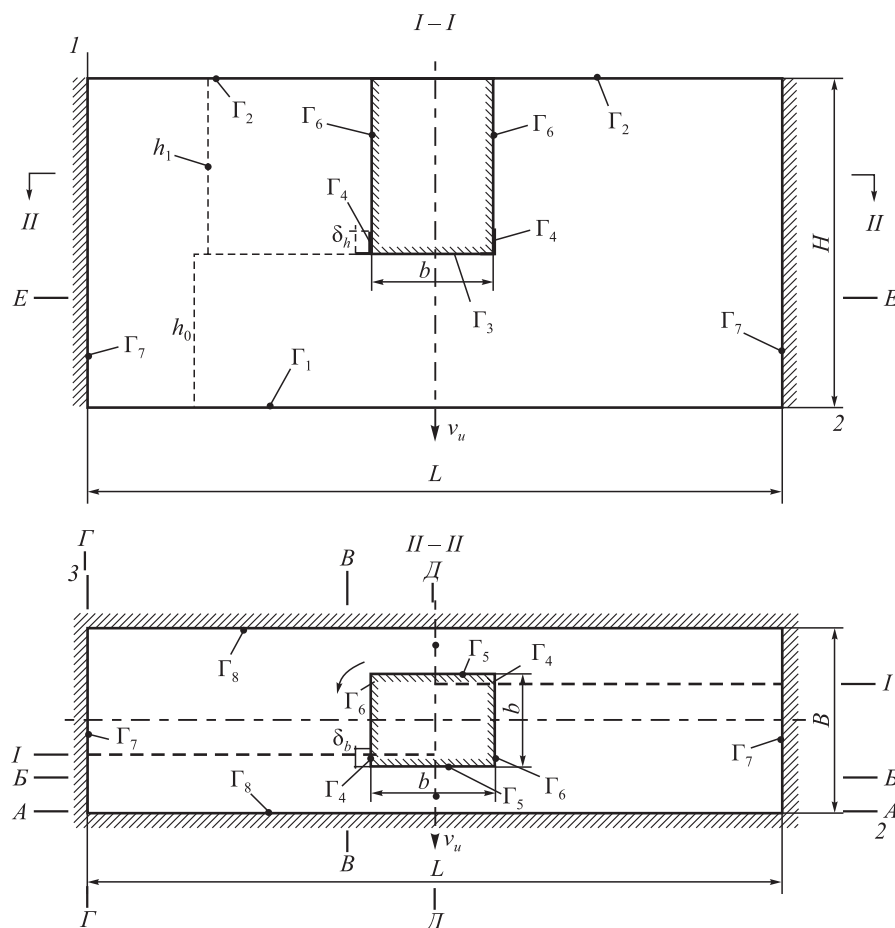


Рис. 1. Формализованная расчетная схема задачи процесса разливки металла в кристаллизатор

Fig. 1. Formalized design scheme of the task of metal casting in a mold

$$\begin{aligned}
 \theta|_{\Gamma_2} &= \theta_2^*; \quad \theta|_{\Gamma_1} = \theta_1^*; \quad \theta|_{\Gamma_3} = \theta_3^*; \\
 \theta|_{\Gamma_4} &= \theta_4^*; \quad \theta|_{\Gamma_5} = \theta_5^*; \quad \theta|_{\Gamma_6} = \theta_6^*; \\
 q|_{\Gamma_8} &= q_1^*; \quad q_2|_{\Gamma_7} = q_2^*;
 \end{aligned} \quad (8)$$

здесь v_u – скорость вытягивания слитка (рис. 1); v_2^* – скорость выхода жидкого металла из окон погружного стакана; V_i^* – скорость вращения поверхностей граней ($i = 5, 6$); θ_i^* – заданные функции распределения температуры металла на поверхностях Γ_i ; q_i^* ($i = 1, 2$) – заданные по экспериментальным данным тепловые потоки через поверхности Γ_8, Γ_7 .

Решение системы уравнений (4) – (6) при граничных условиях (7) осуществляли численным методом в соответствии с численной схемой и алгоритмом [23, 26]. Решение уравнения теплопроводности для нестационарного процесса нагрева описано в работе [26].

Используя численную методику [26], рассмотрим уравнение теплопроводности для стационарного процесса с учетом массопереноса (3), и запишем его разностный аналог для элемента, находящегося внутри рассматриваемой области. Следуя методике [26], уравнение теплопроводности (3) по элементу (рис. 2) для стационарного случая с учетом массопереноса без внутренних источников тепла будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^3 t_{i2}(\theta_i^+ - \theta_k^-) - \sum_{i=1}^3 t_{i1}(\theta_k^+ - \theta_i^-) = \\
 = \sum_{i=1}^3 t_i(\theta_k - \theta_i^-) - \sum_{i=1}^3 a_i(\theta_i^+ - \theta_k^-);
 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned}
 t_{12} &= \frac{4F_1^2 A}{S_{21}^+ + S_{21}^-}; \quad t_{11} = \frac{4F_1^1 A}{S_{21}^+ + S_{21}^-}; \\
 t_1 &= \frac{2v_1^*}{S_{21}^+ + S_{21}^-}; \quad a_1 = \frac{2v_1^*}{S_{21}^+ + S_{21}^-}; \\
 t_{22} &= \frac{4F_2^2 A}{S_{12}^+ + S_{12}^-}; \quad t_{21} = \frac{4F_2^1 A}{S_{12}^+ + S_{12}^-}; \\
 t_2 &= \frac{2v_2^*}{S_{12}^+ + S_{12}^-}; \quad a_2 = \frac{2v_2^*}{S_{12}^+ + S_{12}^-}; \\
 t_{32} &= \frac{4F_3^2 A}{S_{23}^+ + S_{23}^-}; \quad t_{31} = \frac{4F_3^1 A}{S_{23}^+ + S_{23}^-}; \\
 t_3 &= \frac{2v_3^*}{S_{23}^+ + S_{23}^-}; \quad a_3 = \frac{2v_3^*}{S_{23}^+ + S_{23}^-};
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$A = \frac{\lambda}{c\gamma V_k}; \quad F_i^j = S_{ik}^j S_{ip}^j; \quad i \neq k \neq p;$$

$$i, k, p = 1, 2, 3;$$

$$V_k = \frac{S_{12} S_{13} S_{21}}{16},$$

где θ_k – среднее значение температуры в k -ом элементе; θ_i^+ и θ_i^- – среднее значение температуры в элементе

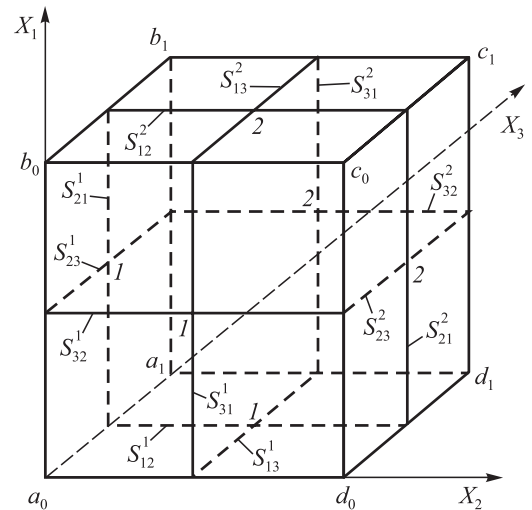


Рис. 2. Вид элемента области разбиения

Fig. 2. View of the separation area element

те, следующим за элементом k в отрицательную и положительную стороны по координате x_i ; $S_{ij}^- = S_{ij}^{1-} + S_{ij}^{2-}$ и $S_{ij}^+ = S_{ij}^{1+} + S_{ij}^{2+}$ – значения дуг S_{ij} элементов, граничащих с элементом k с соответствующей стороны; v_i^* – средние по элементу проекции скорости перемещений по координатным осям x_i ($i = 1, 2, 3$).

При заданных значениях v_i^* ($i = 1, 2, 3$) уравнения (9) линейные. Решая их с учетом граничных условий (8), получим значения θ_k , $k = 1, \dots, m$, где m – количество элементов.

Алгоритм решения:

- исследуемая область течения разбивается на элементы ортогональной формы, рассчитывается матрица длин дуг элементов;
- по разработанной специальной программе [27] численно решается система нелинейных уравнений (4) – (6) с учетом граничных условий (8);
- численно решается система уравнений теплопроводности (9) с учетом граничных условий (10) и найденных значений v_i ($i = 1, 2, 3$).

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для сравнения кинематики течения металла в кристаллизаторе задавали исходные параметры [23]. Геометрические размеры кристаллизатора следующие: $H = 100$ см; $B = 25$ см; $l = 200$ см; $h_1 = 20$ см; $b = 15$ см; $\delta_h = 8,5$ см; $\delta_B = 3$ см. Принимали $v_u = 1$ м/мин = 1,66 см/с, тогда для стационарного процесса определяли величину v_2^* из равенства секундных объемов:

$$v_u B l = 2v_2^* \delta_n \delta_B; \quad \Rightarrow \quad v_2^* = \frac{v_u B l}{2\delta_n \delta_B}.$$

Для определения тепловых потоков q_1^* и q_2^* , МВт/м², по стенкам кристаллизатора воспользуемся формулой [28]:

$$q_i^* = 2,5v^{0,8}, i = 1, 2.$$

где v – скорость омывания стенки кристаллизатора, м/с.

При условии, что $q_i^* = -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_i$, получаем

$$(\theta_n^{\beta})_i = (\theta_n^k)_i - \frac{\delta}{\lambda} q_i^*, i = 1, 2,$$

где θ_n^{β} – температура элемента, примыкающего к поверхности n ; θ_n^k – температура внутреннего элемента, находящегося по нормали сразу же за поверхностным элементом β ; δ – расстояние от центра тяжести элемента β до центра тяжести элемента k .

Температуру истекания жидкой стали из окна Γ_4 принимали $\theta^*|_{\Gamma_4} = 1600$ °С. Температуры на поверхностях стакана (рис. 1) S_i ($i = 5, 6$) принимали $\theta^*|_{S_i} = 1550$ °С.

На поверхности Γ_2 (рис. 1) находится жидкая шлаковая «рубашка», температура которой $\theta^*|_{\Gamma_2} = 1550$ °С. Температура кристаллизации $\theta_k = 1450$ °С.

Константы в системе уравнений (10) для стали составляют $\lambda = 0,29$ Вт/(см·с), $c = 444,47$ Дж/(кг·с), $\gamma = 7,8$ г/см³. Коэффициент вязкости стали μ в уравнении (7) принимали $2,1 \cdot 10^{-4}$ кг·с/м² [28]. Число оборотов вращения $n = 10$ об/мин. На рис. 3 – 7 представлены результаты решения.

На рис. 3 изображены потоки металла по широкой грани кристаллизатора в сечении $A-A$ (рис. 1). Рассмотрены два положения вращающегося погружного стакана. Металл выходит из окон стакана вдоль широких граней (рис. 3, а), металл выходит из окон перпендикулярно широким граням (рис. 3, б).

В первом положении (рис. 3, а) потоки металла похожи на потоки, рассмотренные в работе [23], когда металл выходит в кристаллизатор через эксцентричные окна, но стакан не вращается. В рассматриваемом случае наблюдается (также как и в работе [23]) вихрь, но с очень большой шириной, практически охватывающий всю область кристаллизатора в сечении $A-A$. Это результат вращения граней. Траектория движения металла (рис. 3, б), когда стакан повернут на 90° и поток вращающегося металла из окон направлен прямо в широкие грани. Траектории потоков металла в сечении $A-A$ изменились: потоки внутри кристаллизатора направлены преимущественно в сторону вращения стакана. Изменение траектории движения металла увеличивает интенсивность его перемешивания. Поле температур довольно сложно отобразить в результате такого перемешивания жидкого металла. На рис. 3 крестиками помечены локальные места, в которых температура жидкого металла меньше 1450 °С, то есть возможные центры кристаллизующегося металла. Для наглядности восприятия цифрами на рисунках обозначены модули векторов течения металла.

Траектории течения металла в сечении $B-B$ представлены в работе [25], где рассмотрены два положения погружного стакана. Вихри в этом сечении более сконцентрированы к центру и с левой стороны погружного стакана. При повороте стакана картина потоков в сечении меняется, что также способствует перемешиванию кристаллизующегося металла.

На рис. 4 показаны потоки металла в сечении $B-B$ в двух положениях погружного стакана: струи бьют вдоль широких граней кристаллизатора (рис. 4, а), перпендикулярно широким граням (рис. 4, б). В первом

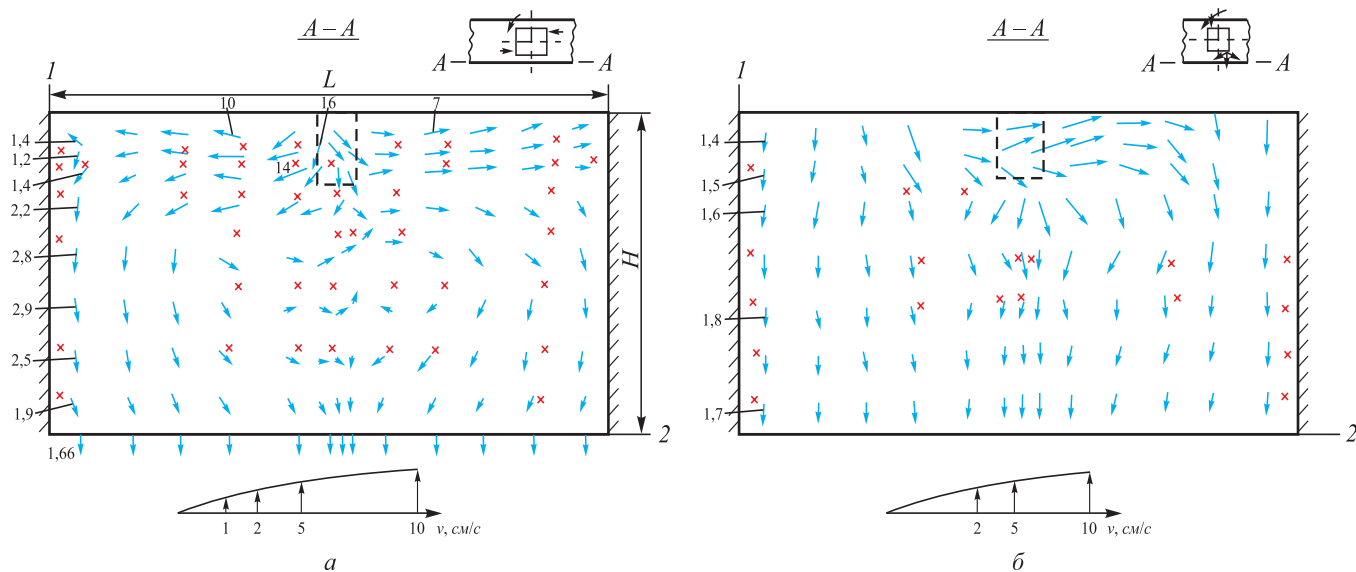


Рис. 3. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении $A-A$ в зависимости от варианта выхода металла из окон стакана (вдоль широких граней (а), перпендикулярно широким граням (б))

Fig. 3. Velocity field of metal flows in the mold in $A-A$ section, depending on the variant of metal outlet from the nozzle windows (along wide edges (a), perpendicular to wide edges (b))

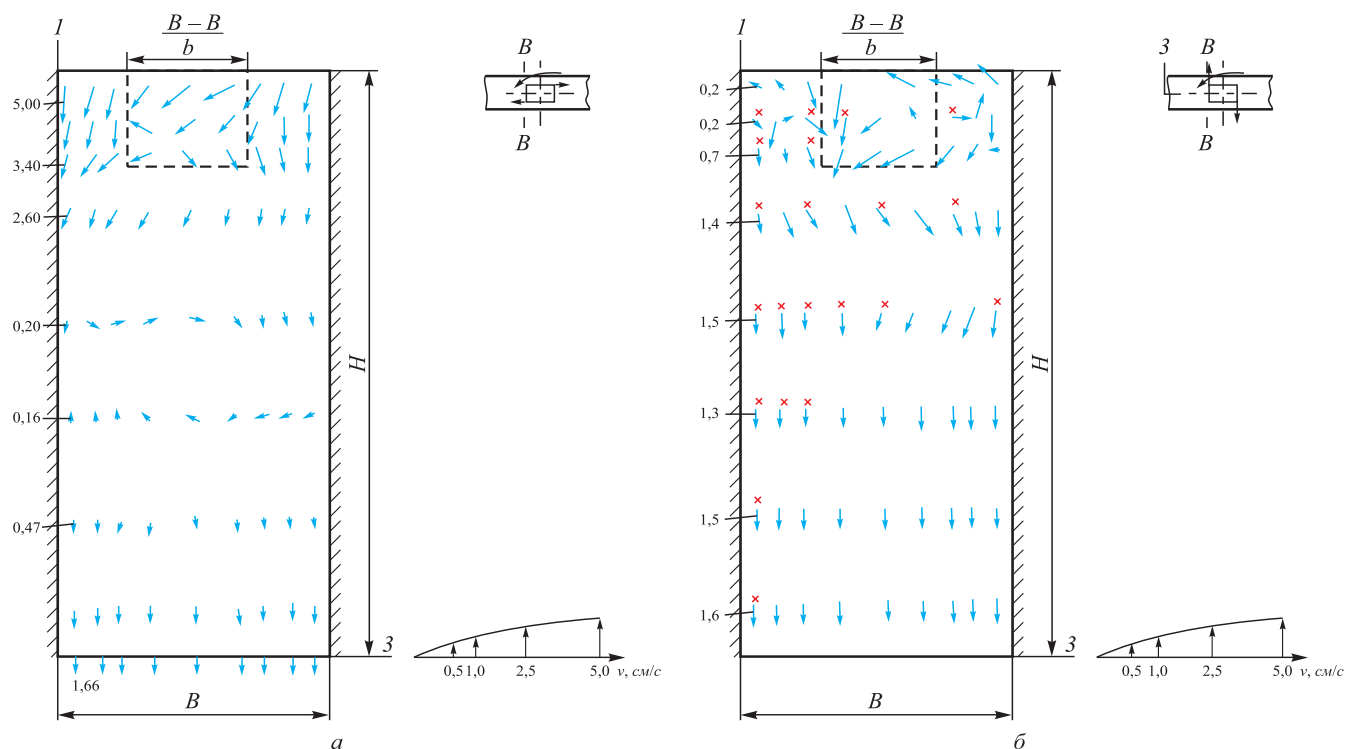


Рис. 4. Поле скоростей потоков течения металла в сечении $B-B$ в зависимости от варианта выхода металла из окон стакана (вдоль широких граней (а), перпендикулярно широким граням (б))

Fig. 4. Velocity field of metal flows in $B-B$ section, depending on the variant of metal outlet from the nozzle windows (along wide edges (a), perpendicular to wide edges (b))

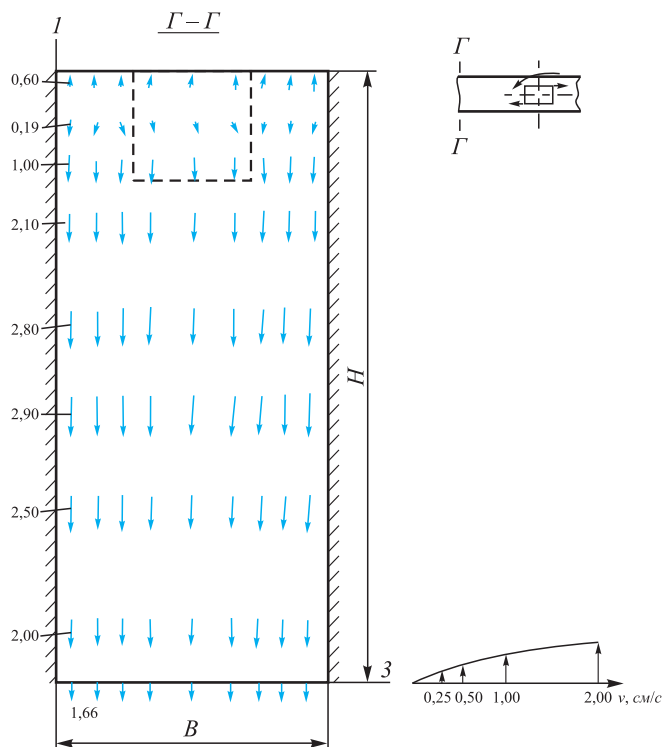


Рис. 5. Поле скоростей потоков течения металла на торце широких граней в сечении $\Gamma-\Gamma$ в зависимости от положения погружного стакана

Fig. 5. Velocity field of metal flows at the end of the wide edges in $\Gamma-\Gamma$ section, depending on the submerged nozzle position

положении (рис. 4, а) интенсивные потоки металла концентрируются в области кристаллизатора, быстро затухая к центру, при повороте (рис. 4, б) – наоборот, ударяясь в широкие грани, поток металла устремляется вниз. Вихрь наблюдается в области погружного стакана. Центры кристаллизации наблюдаются по всему сечению, особенно когда струи выходящего металла направлены вдоль широких стенок кристаллизатора.

На рис. 5 изображены потоки металла на торце широких граней (рис. 1, сечение $\Gamma-\Gamma$) в положении погружного стакана. Вихри отсутствуют. Идет прямолинейное движение металла со скоростью, принимающей максимальное значение в центральной (по высоте) грани кристаллизатора.

На рис. 6 показаны потоки металла в сечении $\Delta-\Delta$ (рис. 1) при положении погружного стакана. Наблюдается очень интересный рисунок потоков. Сначала поток устремляется вниз с обоих боков погружного стакана, но быстро замедляется и поднимается вверх с небольшими скоростями, и только в нижней части сечения опять идет вниз. Это значит, что под погружным стаканом идет интенсивное вихревое движение. Это подтверждает график потоков (рис. 7, а) в горизонтальном сечении $E-E$ (рис. 1), когда погружной стакан находится в том же положении. Видно, что под погружным стаканом идет интенсивное движение, о чем свидетельствуют проекции векторов потоков в горизон-

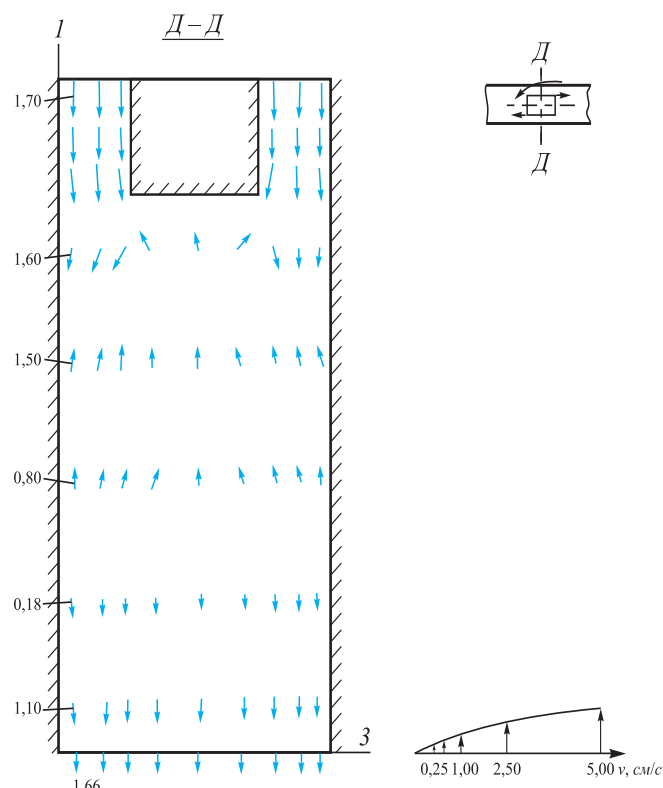


Рис. 6. Поле скоростей потоков течения металла в сечении $D-D$ в зависимости от исходного положения погружного стакана

Fig. 6. Velocity field of metal flows in $D-D$ section depending on the submerged nozzle initial position

тальной плоскости. Кроме того, в сечении $E-E$ видны большие области разнонаправленности векторов течения металла на краях относительно средней части, что свидетельствует о наличии вихревого движения. Центры кристаллизации металла охватывают всю область сечения, особенно по стенкам кристаллизатора и под погружным стаканом. На рис. 7, б показаны потоки, когда погружной стакан повернут на 90° . Видно резкое затухание потоков, которые локализируются в основном в центральной части сечения – под погружным стаканом, впрочем, как и центры кристаллизации.

Выводы

Поставлена и численно решена пространственная задача по определению кинематики течения металла в кристаллизаторе УНРС при его заполнении из погружного вращающегося стакана с эксцентрично расположенными выходными окнами. Представлен подробный анализ течения металла в объеме кристаллизатора по различным его сечениям. Показано, что при таком технологическом процессе перемешивание жидкого

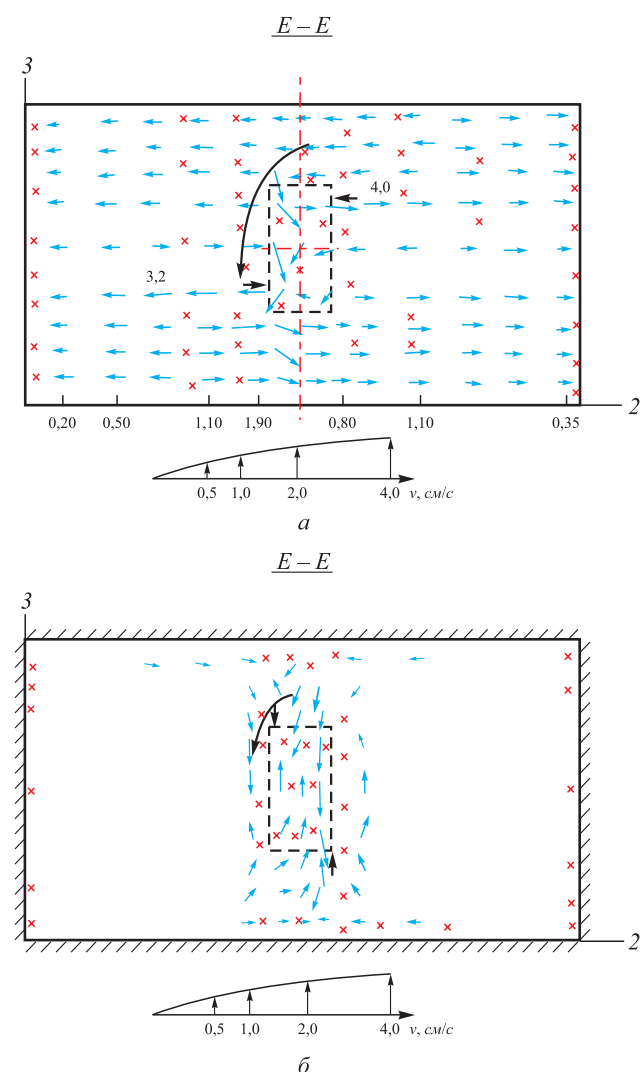


Рис. 7. Поле скоростей потоков металла в горизонтальном сечении $E-E$ в зависимости от положения погружного стакана (в исходном состоянии (а), при повороте погружного стакана на 90° (б))

Fig. 7. Velocity field of metal flows in $E-E$ horizontal section, depending on the submerged nozzle position (in its initial state (a), when turning the submerged nozzle by 90° (б))

металла в кристаллизаторе происходит во много раз более интенсивно, чем при сравнимом процессе выхода металла в кристаллизатор из погружного стакана, но без вращения. Возникают и изменяются по направлению и скорости многочисленные вихревые потоки, что свидетельствует об интенсивном перемешивании жидкого металла. Перемешивание охватывает весь объем металла в кристаллизаторе. Дополнительное принудительное перемешивание металла позволит еще более значительно повысить однородность металла по всему объему кристаллизатора, а значит качество и свойства формируемых заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Смирнов А.И. Производство стали. Т. 4. Непрерывная разливка металла. М.: Теплотехник, 2008. 528 с.
2. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Metallurgiya, 1976. 552 с.
3. Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials. October 25–28, 1994. Nagoya, Japan: ISIJ, 1994. 580 p.
4. Шахов С.И., Смоляков А.С., Рогачиков Ю.М. Работа по применению электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 10. С. 79–84.
5. Pat. JPS61180656A. Immersion nozzle for continuous casting / Shuzo Fukuda, Toshio Ishii, Toru Kitagawa, Yutaka Okubo, Mikio Suzuki, Toshio Tejima. 13.08.1986.
6. Разработка нового способа разливки слябовых заготовок на МНЛЗ / В.В. Стулов, В.А. Матысик, Т.В. Новиков, С.В. Щербakov, И.В. Чистяков, А.П. Плотников. Владивосток: Дальнаука, 2008. 156 с.
7. Герман Э. Непрерывное литье. М.: Госнаучтехиздат, 1961. 815 с.
8. Ho K., Pehlke R. Modelling of steel solidification using the general finite difference method. In book: Proc. 6th Process Technologic Conf. and 5th Int. Iron and Steel Congr., April 6–9, 1986, Warrendale. Vol. 6. Warrendale. 1986. P. 853–866.
9. Kohn A., Morillon Y. Étude mathématique de la solidification de lingots de 12 tonnes en acier doux et en acier mi-dur // Revue de Metallurgie. 1965. Vol. 62. No. 4. P. 321–338. <https://doi.org/10.1051/metal/196562040321>
10. Mizikar E. Mathematical heat transfer model for solidification of continuous cast steel slabs // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 1967. Vol. 239. No. 11. P. 1747–1753.
11. Szekely J., Stanek V. On heat transfer and liquid mixing in the continuous casting of steel // Metallurgical Transactions. 1970. Vol. 1. No. 1. P. 119–126. <https://doi.org/10.1007/BF02819250>
12. Larreq M., Sagues C., Wanin M. Modèle mathématique de la solidification en coulée continue tenant compte de la convection à l'interface solide-liquide // Revue de Metallurgie. 1978. Vol. 75. No. 6. P. 337–352. <https://doi.org/10.1051/metal/197875060337>
13. Yuan Q., Shi T., Vanka S.P., Thomas B.G. Simulation of turbulent flow and particle transport in the continuous casting of steel. In book: Computational Modeling of Materials Minerals and Metals. Warrendale, PA. 2002. P. 491–500.
14. Thomas B.G., Zhang L. Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 10. P. 1181–1193. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1181>
15. Thomas B.G., Mika L.J., Najjar F.M. Simulation of fluid flow inside a continuous slab casting machine // Metallurgical Transactions B. 1990. Vol. 21. No. 2. P. 387–400. <https://doi.org/10.1007/BF02664206>
16. Нарцт Х.-П., Кёллерер С., Штахельбергер К. и др. Новаторские решения и практические результаты технологии непрерывного литья слябов // Черные металлы. 2003. № 11. С. 34–38.
17. Виммер Ф., Тёне Х., Пёкштайнер Л. и др. Высокоскоростное литье мелкосотовых заготовок на МНЛЗ с кристаллизатором «Дайэмоуд» // Сталь. 1999. № 6. С. 22–26.
18. Davidson P.A., Boysan F. The importance of secondary flow in the rotary electromagnetic stirring of steel during continuous casting // Applied Scientific Research. 1987. No. 1-2. P. 241–259. <https://doi.org/10.1007/BF00412016>
19. Олер К., Оденталь Х.-Ю., Пфаифер Г., Леманович И. Цифровое моделирование процессов течения и затвердевания металла в МНЛЗ для литья тонких слябов // Черные металлы. 2002. № 8. С. 22–30.
20. Айхингер А., Фраунхубер К., Хёдль Х., Мёрвальд К. Новейшее оборудование для высокопроизводительной непрерывной разливки // Сталь. 2000. № 3. С. 25–28.
1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Smirnov A.I. *Steel Production. Vol. 4. Continuous Casting of Metal*. Moscow: Teplotekhnika, 2008. 528 p. (In Russ.).
2. Efimov V.A. *Casting and Crystallization of Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1976. 552 p. (In Russ.).
3. *Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials. October 25–28, 1994. Nagoya, Japan: ISIJ, 1994. 580 p.*
4. Shakhov S.I., Smolyakov A.S., Rogachikov Yu.M. Application of electromagnetic stirring at steel continuous casting. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2015, no. 10, pp. 79–84. (In Russ.).
5. Shuzo Fukuda, Toshio Ishii, Toru Kitagawa, Yutaka Okubo, Mikio Suzuki, Toshio Tejima. *Immersion nozzle for continuous casting*. Patent JPS61180656A. Publ. 13.08.1986.
6. Stulov V.V., Matysik V.A., Novikov T.V., Shcherbakov S.V., Chistyakov I.V., Plotnikov A.P. *Development of a New Method for Slab Billets Casting in CCM*. Vladivostok: Dal'nauka, 2008. 156 p. (In Russ.).
7. Herrmann E. *Handbook on Continuous Casting*. Düsseldorf: Aluminium-Verl., 1980. 742 p.
8. Ho K., Pehlke R. Modelling of steel solidification using the general finite difference method. In: *Proc. 6th Process Technologic Conf. and 5th Int. Iron and Steel Congr., April 6–9, 1986, Warrendale*, vol. 6. Warrendale, 1986, pp. 853–866.
9. Kohn A., Morillon Y. Étude mathématique de la solidification de lingots de 12 tonnes en acier doux et en acier mi-dur. *Revue de Metallurgie*. 1965, vol. 62, no. 4, pp. 321–338. (In Fr.). <https://doi.org/10.1051/metal/196562040321>
10. Mizikar E. Mathematical heat transfer model for solidification of continuous cast steel slabs. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1967, vol. 239, no. 11, pp. 1747–1753.
11. Szekely J., Stanek V. On heat transfer and liquid mixing in the continuous casting of steel. *Metallurgical Transactions*. 1970, vol. 1, no. 1, pp. 119–126. <https://doi.org/10.1007/BF02819250>
12. Larreq M., Sagues C., Wanin M. Modèle mathématique de la solidification en coulée continue tenant compte de la convection à l'interface solide-liquide. *Revue de Metallurgie*. 1978, vol. 75, no. 6, pp. 337–352. (In Fr.). <https://doi.org/10.1051/metal/197875060337>
13. 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, pp. 491–500.
14. Thomas B.G., Zhang L. Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 10, pp. 1181–1193. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1181>
15. Thomas B.G., Mika L.J., Najjar F.M. Simulation of fluid flow inside a continuous slab casting machine. *Metallurgical Transactions B*. 1990, vol. 21, no. 2, pp. 387–400. <https://doi.org/10.1007/BF02664206>
16. Nartst Kh.-P., Kellerer S., Shtakhel'berger K., Merval'd K., Feder-shpil' K., Val' G. Innovative solutions and practical results of continuous slab casting technology. *Chernye metalli*. 2003, no. 11, pp. 34–38. (In Russ.).
17. Vimmer F., Tene Kh., Pekshtajner L., Fukskhuber J., Pappich U. High-speed billet casting with the use of “Daimold” technology. *Stal'*. 1999, no. 6, pp. 22–26. (In Russ.).
18. Davidson P.A., Boysan F. The importance of secondary flow in the rotary electromagnetic stirring of steel during continuous casting. *Applied Scientific Research*. 1987, no. 1-2, pp. 241–259. <https://doi.org/10.1007/BF00412016>
19. Oler K., Odental' Kh.-Yu., Pfäifer G., Lemanovich I. Digital modeling of metal flow and solidification processes in CCM for thin slabs casting. *Chernye metalli*. 2002, no. 8, pp. 22–30. (In Russ.).
20. Aikhinger A., Frauenhuber K., Khedl' X., Merval'd K. Advanced equipment for high-performance continuous casting. *Stal'*. 2000, no. 3, pp. 25–28. (In Russ.).

21. Eastman C.M. Jr., Glaws P.C. Steel quality improvements with vertical continuous casting at Faircrest steel plant // *ASTM Special Technical Publication*. 2017. Vol. 11. P. 1–22.
<https://doi.org/10.1520/STP160020160157>
22. Drazin P.G., Riley N. *The Navier-Stokes Equations: A Classification of Flows and Exact Solutions* (London Mathematical Society Lecture Note Series. Vol. 334). Cambridge University Press, 2006. 206 p.
23. Одинокое 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. Т. 61. № 8. С. 606–612. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-606-612>
24. Патент 2741611 РФ. Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки / Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И. Кузнецов С.А., Горнаков А.И., Александров С.Ю. Заявл. 27.02.2020; опубл. 27.01.2021. Бюл. № 3.
25. Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Александров С.Ю. Моделирование нового способа подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 3. С. 237–243.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-237-243>
26. Одинокое В.И., Каплунев Б.Г., Песков А.В., Бахов А.А. Математическое моделирование сложных технологических процессов. М.: Наука, 2008. 176 с.
27. Математическое моделирование гидродинамики расплава в машине непрерывного литья заготовок: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201261 / Одинокое В.И., Горнаков А.И. № 201261228. Заявл. 30.03.2012; опубл. 22.05.2012.
28. Kim W.S. Chair T.S. A simplified phenomenological theory of viscosity for liquid metals // *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2001. Vol. 22. No. 1. P. 43–45.
21. Eastman C.M. Jr., Glaws P.C. Steel quality improvements with vertical continuous casting at Faircrest steel plant. *ASTM Special Technical Publication*. 2017, vol. 11, pp. 1–22.
<https://doi.org/10.1520/STP160020160157>
22. Drazin P.G., Riley N. *The Navier-Stokes Equations: A Classification of Flows and Exact Solutions* (London Mathematical Society Lecture Note Series. Vol. 334). Cambridge University Press, 2006, 206 p.
23. Odnokov 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, vol. 61, no. 8, pp. 606–612. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-606-612>
24. Odnokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I. Kuznetsov S.A., Gornakov A.I., Aleksandrov S.Yu. *Device for supplying and stirring steel in a CCM mold*. Patent RF no. 2741611. *Bulleten' izobretenii*. 2021, no. 3. (In Russ.).
25. Odnokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I., Aleksandrov S.Yu. Simulation of a new method for supplying and stirring liquid metal in a CCM mold. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 237–243 (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-237-243>
26. Odnokov V.I., Kaplunov B.G., Peskov A.V., Bakhov A.A. *Mathematical Modeling of Complex Technological Processes*. Moscow: Nauka, 2008, 176 p. (In Russ.).
27. Odnokov V.I., Gornakov A.I. *Mathematical modeling of melt hydrodynamics in a CCM*. Certificate of state registration of computer programs no. 201261228. Publ. 22.05.2012. (In Russ.).
28. Kim W.S. Chair T.S. A simplified phenomenological theory of viscosity for liquid metals. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2001, vol. 22, no. 1, pp. 43–45.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Иванович Одинокое, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
E-mail: 79122718858@yandex.ru

Алексей Иванович Евстигнеев, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, главный научный сотрудник, Хабаровский федеральный исследовательский центр (Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН)
E-mail: diss@knastu.ru

Эдуард Анатольевич Дмитриев, д.т.н., доцент, ректор, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
E-mail: rector@knastu.ru

Сергей Юрьевич Александров, старший преподаватель, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
E-mail: sandrov@mail.ru

Геннадий Иванович Усанов, д.э.н., профессор кафедры «Менеджмент, маркетинг и государственное управление», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
E-mail: USANOV_G@mail.ru

Valerii I. Odnokov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. – Consultant, Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University
E-mail: 79122718858@yandex.ru

Aleksei I. Evstigneev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. – Consultant, Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University, Chief Researcher, Khabarovsk Federal Research Center (Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences)
E-mail: diss@knastu.ru

Eduard A. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Rector, Komsomolsk-on-Amur State University
E-mail: rector@knastu.ru

Sergei Yu. Alexandrov, Senior Lecturer, Komsomolsk-on-Amur State University
E-mail: sandrov@mail.ru

Gennadii I. Usanov, Dr. Sci. (Economics), Prof. of the Chair “Management, Marketing and Public Administration”, Komsomolsk-on-Amur State University
E-mail: USANOV_G@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.2020
После доработки 10.12.2020
Принята к публикации 11.12.2020

Received 24.11.2020
Revised 10.12.2020
Accepted 11.12.2020