

**Оригинальная статья**

УДК 519.677

DOI 10.17073/0368-0797-2021-3-237-243



## МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА ПОДАЧИ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

**В. И. Одинокоев, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, С. Ю. Александров****Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Россия, 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)**

**Аннотация.** Значительное влияние на стабильность процесса заполнения кристаллизатора установки непрерывной разливки стали (УНРС) жидким металлом оказывают конструктивно-технологические схемы и конструкции применяемых устройств, режимы и параметры заливки кристаллизатора расплавом. Все это связано с особенностями применяемых устройств и совершенствованием их конструкции. Высокие требования, предъявляемые к таким устройствам, определили необходимость создания новых конструкций устройств, предназначенных для сокращения затрат времени на подготовку к работе и обслуживание, повышение качества получаемых металлозаготовок. В научной литературе, в том числе и патентной, все больше публикуется статей и материалов по разработке новых и совершенствованию существующих способов подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС и устройств для их осуществления. Экспериментальные исследования течения жидкого металла в кристаллизаторе УНРС являются продолжительным, сложным и трудоемким процессом. Поэтому все шире используется для этого математическое моделирование численными методами. Авторами предложена новая технология разливки жидкого металла в кристаллизатор и устройство для его осуществления за счет использования эффекта вращающегося в кристаллизаторе глухондонного погружного стакана с эксцентричными выходными отверстиями. Целью настоящей работы является моделирование апробированным численным методом нового процесса заполнения прямоугольного кристаллизатора УНРС жидкой сталью и ее перемешивание. По разработанным численным схемам и алгоритмам составлена программа расчета. Приведен пример расчета разливки стали в кристаллизатор прямоугольного сечения, схемы потоков жидкого металла в сечении кристаллизатора.

**Ключевые слова:** моделирование, заполнение, жидкий металл, кристаллизатор, вращающийся погружной стакан, поле скоростей

**Для цитирования:** Одинокоев 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>

*Original article*

## SIMULATION OF A NEW METHOD FOR SUPPLYING AND STIRRING LIQUID METAL IN A CCM MOLD

**V. I. Odinson, E. A. Dmitriev, A. I. Evstigneev, S. Yu. Aleksandrov****Komsomolsk-on-Amur State University (27 Lenina ave., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681013, Russian Federation)**

**Abstract.** A significant influence on stability of the process of filling the CCM mold with liquid metal is exerted by the structural and technological schemes and designs of used devices, modes and parameters of filling the mold with the melt. All this is due to the features of the devices used and the improvement of their design. The high requirements for such devices have determined the need to create new devices designs to reduce the time spent on preparation for work and maintenance and to improve the quality of resulting metal billets. In scientific literature, including patents, more and more articles and materials are devoted to the development of new and improvement of the existing methods of supplying and stirring liquid metal in CCM and devices for their implementation. Experimental studies of liquid metal flow in CCM are a long, complex and laborious process. Therefore, mathematical modeling by numerical methods is increasingly used for this purpose. The authors have proposed a new technology for pouring liquid metal into a mold and a device for its implementation due to the use of effect of a deep-bottom submersible nozzle rotating in the mold with eccentric outlet holes. The purpose of this work is to simulate by proven numerical method a new process of filling a rectangular CCM mold with liquid steel and stirring it. Based on the developed numerical schemes and algorithms, a calculation program was compiled. The article describes an example of calculating the steel casting into a mold of rectangular cross-section and flow diagrams of liquid metal in it.

**Keywords:** modeling, filling, liquid metal, mold, rotating submerged nozzle, velocity field

**For citation:** Odinson 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>

**ВВЕДЕНИЕ**

Существует 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 глуходонного погружного стакана, расположенные друг относительно друга под углом 180°. Также предложен ряд новых способов выхода жидкого металла в кристаллизатор из погружного стакана. Это 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 установки непрерывной разливки стали (УНРС) и его перемешивание представлены в работах [11 – 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 данный процесс [7, 8].

В представленной работе сделана попытка математически описать новый процесс заполнения жидким металлом и его перемешивание в кристаллизаторе УНРС.

**ИНЖЕНЕРНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Суть нового процесса состоит в следующем (рис. 1). Жидкий металл из ковша 1 через погружной прямооточный стакан 2 поступает в плавающий глуходонный стакан 3 квадратного поперечного сечения, откуда через эксцентриковые окна 4 выходит в кристаллизатор 5.

Выходящие из эксцентриковых окон струи жидкого металла создают вращательный момент, приводящий в движение (вращение) плавающий глуходонный стакан. Вследствие вращения глуходонного стакана струи жидкого металла будут создавать эффект перемешивания, который дополнительно усиливается от вращения квадратных граней.

Имеем квазистационарный процесс, повторяющийся при повороте квадратного стакана на 180° при кристаллизаторе прямоугольного сечения, и на 90° при кристаллизаторе квадратного поперечного сечения. Будем рассматривать процесс подачи металла в кристаллизатор прямоугольного поперечного сечения.

На рис. 2 отображена схема вращения стакана квадратного поперечного сечения в плоскости  $(x_2, x_3)$ . Очевидно, что  $cd = c'd' = cc' = dd' = d$ . Возьмем произвольную точку  $b$  на стороне квадрата  $cd$ . При заданном направлении вращении квадрата со скоростью  $V$  имеем:

$$V_i = -V \sin \alpha; \sin \alpha = \frac{O'b}{r}; V = \frac{\pi r n}{30}; V_i = -\pi n \frac{x_2}{30}. \quad (1)$$

Здесь  $n$  – число оборотов (об/мин);  $x_2 = O'b$ .

Очевидно, формула (1) верна для поверхностей  $\Gamma_6$ . Для поверхностей  $\Gamma_5$  имеем:

$$V_i = \pi n \frac{x_3}{30}. \quad (2)$$

В течение поворота стакана на 180° процесс будет нестационарным. При этом из окон стакана в нижней его части выходит жидкий металл со скоростью  $V_m$ . Будем считать, что поперечные сечения окон равны. Процесс очень сложен даже при использовании численных методов.

Квадрат в горизонтальном сечении вращается вокруг центра  $O$  (см. рис. 2). При заданном направлении вращения одна половина грани квадрата  $O'c$  как бы выталкивает жидкий металл от себя наружу, а вторая половина грани  $O'd$  втягивает металл в противоположном направлении. То же самое происходит и с другими гранями квадрата. В этом смысле, можно интерпретировать данный процесс как выход металла из участка грани  $O'c$  со скоростью  $V_i$  по формуле (1) и вход того же объема металла в участок грани  $O'd$  также со скоростью по формуле (1). Аналогич-

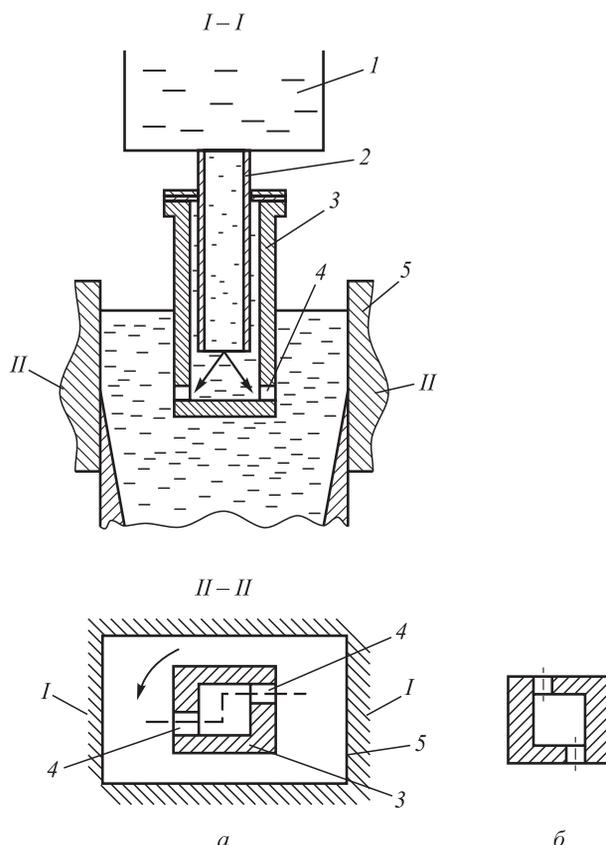


Рис. 1. Схема процесса разливки жидкого металла в кристаллизатор

Fig. 1 Scheme of the process of liquid metal casting into a mold

ную интерпретацию движения металла можно применить и к другим граням квадрата с использованием формул (1), (2).

Таким образом, будем считать погружной стакан квадратного поперечного сечения неподвижным, а через его грани втекает и вытекает металл со скоростями  $V_i$  согласно формулам (1), (2). Это не касается окон стакана, из которых жидкий металл поступает в кристаллизатор со скоростью  $V_m$ . При этом будем рассматривать два положения квадратного стакана, повернутых друг относительно друга на  $90^\circ$  (см. рис. 1).

Вычисленные потоки металла в этих двух положениях стакана дадут представление и о течении металла в кристаллизаторе, когда стакан повернется относительно первого положения (рис. 1, а) на  $45^\circ$ .

Такая идеализация позволяет рассматривать данный процесс как стационарный, что значительно облегчает его постановку и решение. Кроме того, не будем учитывать появляющуюся на гранях кристаллизатора корочку затвердевшего металла.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходя из принятых допущений, рассмотрим стационарный процесс истекания жидкого металла из окон квадратного стакана в кристаллизатор прямоугольного поперечного сечения. При этом движение металла по нормали к граням стакана соответствует формулам (1), (2).

Среду (жидкий металл) будем считать несжимаемой. Исходя из сформулированных допущений, запишем систему дифференциальных уравнений в декартовой системе координат для течения ньютоновской вязкой несжимаемой жидкости:

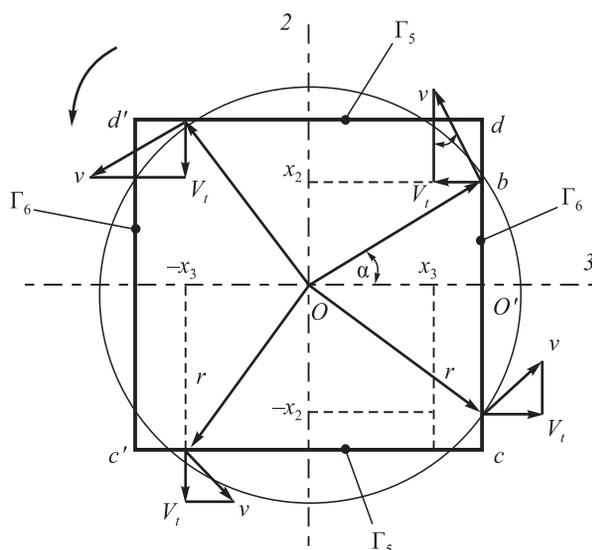


Рис. 2. Схема вращения погружного стакана

Fig. 2 Scheme of immersion nozzle rotation

$$\sigma_{ij,j} + F_i^* = I_i^*, I_i^* = \rho \left( \dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right), F_2^* = F_3^* = 0; \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij}, \xi_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (4)$$

$$i, j = 1, 2, 3;$$

$$v_{i,i} = 0, i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Здесь  $\sigma$  – гидростатическое напряжение;  $\mu$  – коэффициент вязкости ( $\text{г}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ );  $v_i$  – проекции скоростей перемещений по координатным осям  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ );  $\rho$  – плотность жидкого металла;  $F_i^*$  – проекция удельной объемной силы на координатные оси  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ );  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\xi_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера. Для стационарного процесса:

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

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

Граничные условия задачи (рис. 3):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{\Gamma_2} &= p_1, (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{\Gamma_1} = 0, i = 1 \div 3; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_1} &= 0, i = 4, 6, 7, \\ \sigma_{31} = \sigma_{32}|_{\Gamma_1} &= 0, i = 5, 8; \\ v_3|_{\Gamma_6} &= V_7 - \text{формула (2)}; \\ v_2|_{\Gamma_3} &= V_1 - \text{формула (1)}; \\ v_1|_{\Gamma_1} &= v_u, v_1|_{\Gamma_3} = 0, v_2|_{\Gamma_7} = 0; \\ v_2|_{\Gamma_4} &= v_2^*, v_3|_{\Gamma_8} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $v_u$  – скорость вытягивания слитка (рис. 3);  $v_2^*$  – скорость выхода жидкого металла из окон погружного стакана ( $\Gamma_4$ ).

Решение системы уравнений (3) – (5) при граничных условиях (6) осуществлялось численным методом [25], в соответствии с которым исследуемую область разбивают на элементы конечных размеров. Для каждого элемента записывалась в разностном виде система уравнений (3) – (5), которая решалась по описанной в работе [25] численной схеме с учетом программы [26]. Результат решения – поля скоростей потока металла в объеме кристаллизатора. Поля напряжений  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) так же определялись из решения задачи, но они оказались малозначимы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для сравнения кинематики течения металла в кристаллизаторе задавались исходные параметры, что и в работах [7]. Геометрические размеры кристаллизатора:



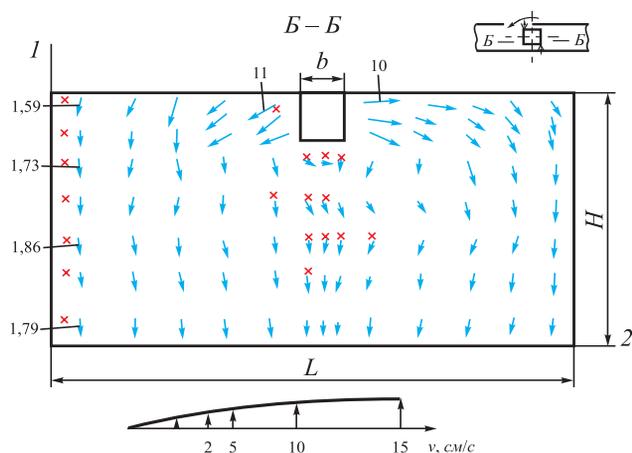


Рис. 5. Поле скоростей потоков течения металла в сечении Б–Б в зависимости от положения погружного стакана при его повороте

Fig. 5 Velocity field of metal flow in section Б–Б, depending on position of the submerged nozzle at its rotation

## Выводы

Численно промоделирован сложный процесс подачи жидкого металла в кристаллизатор прямоугольного сечения из вращающегося погружного стакана.

Интенсивным перемешиванием охвачен весь объем жидкого металла в кристаллизаторе, о чем свидетельствуют направления и скорости многочисленных вихревых потоков.

Приведенные в работе потоки жидкого металла в объеме кристаллизатора указывают на эффективность предложенного технологического процесса заполнения кристаллизатора.

Для промышленного использования предложенной разработки понадобятся дополнительные конструктивные решения, связанные с обеспечением фиксации плавящего огнеупорного стакана относительно погружного стакана во время его смены в условиях серийной разливки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Смирнов А.Н. Производство стали. Т. 4. Непрерывная разливка металла. М.: Теплотехник, 2009. 528 с.
2. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Metallurgiya, 1976. 552 с.
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. С. 408–409.
4. Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора УНРС // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 6. С. 493–498. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-493-499>
5. Intern. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. October 25–28, 1994. Nagoya, Japan: ISIJ, 1994. 580 p.
6. Разработка нового способа разливки слябовых заготовок на МЛНЗ / В.В. Стулов, В.А. Матысик, Т.В. Новиков, С.В. Щербakov, И.В. Чистяков, А.П. Плотников. Владивосток: Дальнаука, 2008. 156 с.
7. 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>
8. Куберский С.В., Семирягин С.О., Федоров О.В. Расчеты технологических и конструктивных параметров МЛНЗ: Учебное пособие. Алчевск: ДОНГУ, 2006. 146 с.
9. Смирнов А.А., Нисковских В.М., Куликов В.И. Исследование процесса электромагнитного перемешивания металла в слябовых МЛНЗ методом моделирования // Совершенствование конструкций, исследование и расчет машин непрерывного литья заготовок: Сборник научных трудов. М.: ВНИИМЕТМАШ, 1987. С. 85–90.
10. Одинокое В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А. Численное моделирование процесса заполнения металла кристаллизатора с отражателем УНРС // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 10. С. 747–755. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-747-755>
11. Ho K., Pehlke R. Modelling of steel solidification using the general finite difference method. 5<sup>th</sup> Int. Iron and Steel. Congr. Proc. 6<sup>th</sup> Process Technol. Conf. (Apr. 6–9, 1986). Warrendale. 1986. Vol. 6. P. 853–866.
1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Smirnov A.P. *Steel Production. Vol. 4: Continuous Casting of Metal*. Moscow: Teplotekhnika, 528 p. (In Russ.).
2. Efimov V.A. *Casting and Crystallization of Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 552 p. (In Russ.).
3. Akimenko A.D., Girskii V.E., Gus'kov A.I. Influence of methods of metal supplying into a mold on axial zone formation in a square ingot. *Stal'*. 1973, no. 5, pp. 408–409. (In Russ.).
4. 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, vol. 60, no. 6, pp. 493–498. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-493-499>
5. *Intern. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. October 25-28, 1994. Nagoya, Japan: ISIJ, 1994, 580 p.*
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 casting slab billets in CCM*. Vladivostok: Dal'nauka, 2008, 156 p. (In Russ.).
7. 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, vol. 61, no. 8, pp. 606–612. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-606-612>
8. Kuberskii S.V., Semiryagin S.O., Fedorov O.V. *Calculations of CCM Technological and Design Parameters: Textbook*. Alchevsk: DONSTU, 2006, 146 p. (In Russ.).
9. Smirnov A.A., Niskovskikh V.M., Kulikov V.I. Investigation of electromagnetic metal mixing in slab CCM by modeling method. In: *Improvement of Design, Research and Calculation of Continuous Casting Machines: Proceedings*. Moscow: VNIIMETMAsh, 1987, pp. 85–90. (In Russ.).
10. Odinokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A. Numerical modeling of metal filling in CCM mold completed with deflector. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 10, pp. 747–755. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-747-755>
11. Ho K., Pehlke R. Modeling of steel solidification using the general finite difference method. 5<sup>th</sup> Int. Iron and Steel. Congr. Proc. 6<sup>th</sup> Process Technol. Conf. (Apr. 6 – 9, 1986). Warrendale. 1986, vol. 6, pp. 853–866.

12. Kohn A., Morillon Y. Etude mathematique de la solidification des lingots en acier mi-dur // *Revue de Metallurgie*. 1966. Vol. 63. No. 10. P. 779–790.
13. 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.
14. 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.
15. Ozava M., Okano S., Matsuno J. Influence des conditions du jet de coulée sur la formation de la peau solidifiée en lingotière de brames de coulée continue // *Tetsu-to-Hagane*. 1976. Vol. 62. No. 4. P. 86.
16. Larreq M., Sagues C., Wanin M. Vodele mathematique 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.
17. Yuan Q., Shi T., Vanka S.P., Thomas B.G. Simulation of turbulent flow and particle transport in the continuous casting of steel // *Computational Modeling of Materials Minerals and Metals*. Warrendale, PA. 2002. P. 491–500.
18. Thomas B. G., Zhang L. Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting // *ISIJ International*. 2001. Vol. 41. No. 10. P. 1181–1193. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1181>
19. 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. <http://doi.org/10.1007/BF02664206>
20. Нарцт Х.-П., Келлерер С., Штахельбергер К. и др. Новаторские решения и практические результаты технологии непрерывного литья слэбов // *Черные металлы*. 2003. № 11. С. 34–38.
21. Виммер Ф., Тене Х., Пекштайнер Л. Высокоскоростное литье мелкосортовых заготовок на МНЛЗ с кристаллизатором «Дай-эмолд» // *Сталь*. 1999. № 6. С. 22–26.
22. Davidson P.A., Boysan F. The importance of secondary flow in the rotary electromagnetic stirring of steel during continuous casting // *Applied Scientific Research*. 1987. Vol. 44. No. 1–2. P. 241–259. <http://doi.org/10.1007/BF00412016>
23. Олер К., Оденталь Х.-Ю., Пфайфер Г., Леманович И. Цифровое моделирование процессов течения и затвердевания металла в МНЛЗ для литья тонких слэбов // *Черные металлы*. 2002. № 8. С. 22–30.
24. Айхингер А., Фраунхубер К., Хедль Х., Мервальд К. Новейшее оборудование для высокопроизводительной непрерывной разливки // *Сталь*. 2000. № 3. С. 25–28.
25. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В.И. Одинокое, Б.Г. Каплунов, А.В. Песков, А.А. Бахов. М.: Наука, 2008. 176 с.
26. Одинокое В.И., Горнаков А.И. Математическое моделирование гидродинамики расплава в машине непрерывного литья заготовок: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ N201261 № 201261228. Заявл. 30.03.2012; опублик. 22.05.2012.
27. 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.
28. Пат. 2741611 РФ. Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали / В.И. Одинокое, Э.А. Дмитриев, А.И. Евстигнеев и др.; опублик. 27.01.2021. Бюлл. № 3.
12. Kohn A., Morillon Y. Etude mathematique de la solidification des lingots en acier mi-dur. *Revue de Metallurgie*. 1966, vol. 63, no. 10, pp. 779–790. (In Fr.)
13. 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.
14. 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.
15. Ozava M., Okano S., Matsuno J. Influence des conditions du jet de coulée sur la formation de la peau solidifiée en lingotière de brames de coulée continue. *Tetsu-to-Hagane*. 1976, vol. 62, no. 4, pp. 86. (In Fr.)
16. Larreq M., Sagues C., Wanin M. Vodele mathematique 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.)
17. Yuan Q., Shi T., Vanka S.P., Thomas B.G. Simulation of turbulent flow and particle transport in the continuous casting of steel. *Computational Modeling of Materials Minerals and Metals*. Warrendale, PA, 2002, pp. 491–500.
18. Thomas B.G., Zhang L. Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 10, pp. 1181–1193. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1181>
19. 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. <http://doi.org/10.1007/BF02664206>
20. Nartst Kh.-P., Kellerer S., Shtakhel'berger K., Merval'd K., Federshpil' K., Val' G. Innovative solutions and practical results of continuous slab casting technology. *Chernye metally*. 2003, no. 11, pp. 34–38. (In Russ.)
21. Vimmer F., Tene X., Pekshtainer L. High-speed casting of small-cell billets on continuous casting machine with "Diamould" mold. *Stal'*, 1999, no. 6, pp. 22–26. (In Russ.)
22. Davidson P.A., Boysan F. The importance of secondary flow in the rotary electromagnetic stirring of steel during continuous casting. *Applied Scientific Research*. 1987, vol. 44, no. 1-2, pp. 241–259. <http://doi.org/10.1007/BF00412016>
23. Oler K., Odental' Kh.-Yu., Pfayfer G., Lemanovich I. Digital modeling of the processes of metal flow and solidification in continuous casting machine for casting thin slabs. *Chernye metally*. 2002, no. 8, pp. 22–30. (In Russ.)
24. Aikhinger A., Frauenhuber K., Khedl' X., Merval'd K. State-of-the-art equipment for high-performance continuous casting. *Stal'*. 2000, no. 3, pp. 25–28.
25. Odiokov V.I., Kaplunov B.G., Peskov A.V., Bakov A.V. *Mathematical Modeling of Complex Technological Processes*. Moscow: Nauka, 2008, 176 p. (In Russ.)
26. Odiokov V.I., Gornakov A.I. *Mathematical modeling of melt hydrodynamics in a continuous casting machine*. Certificate of state registration of computer programs no. 201261228. Publ. 22.05.2012. (In Russ.)
27. 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.
28. Odiokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I., etc. *A device for supplying and mixing steel in CCM mold*. Patent RF 2741611. *Byulleten' izobretenii*. 2021, no. 3. (In Russ.)

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

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

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

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

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

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

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

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

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

Поступила в редакцию 02.11.2020  
 После доработки 07.12.2020  
 Принята к публикации 01.03.2021

Received 02.11.2020  
 Revised 07.12.2020  
 Accepted 01.03.2021