

Одинок В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Карпенко В. А., Петров В. В.
V. I. Odinokov, A. I. Evstigneev, E. A. Dmitriev, V. A. Karpenko, V. V. Petrov

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ ОКНАХ В ГЛУХОДОННОМ СТАКАНЕ

MODELING OF FORCED PROCESS OF LIQUID METAL MIXING IN THE CRYSTALLIZER OF CONTINUOUS STEEL CASTING UNIT WITH SYMMETRICAL WINDOWS IN A DEEP-DRAWN BEAKER

Одинок Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Valery I. Odinokov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Research and Development Management Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: diss@knastu.ru.

Alexey I. Evstigneev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Research and Development Management Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

Eduard A. Dmitriev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rector@knastu.ru.

Карпенко Владимир Анатольевич – соискатель Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: volodya.karpenko.89@mail.ru.

Vladimir A. Karpenko – Postgraduate Degree Seeker at Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: volodya.karpenko.89@mail.ru.

Петров Виктор Викторович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Viktor V. Petrov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Research and Development Management Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Предложена новая технология процесса заполнения кристаллизатора УНРС жидким металлом и его перемешивания. Приведена оригинальная конструкция устройства. Исследования проведены математическим моделированием численным методом. Представлены результаты вычислительных расчётов течения расплава в объёме кристаллизатора. Приведён пример расчёта разлива стали в кристаллизатор прямоугольного сечения, схемы потоков расплава по различным сечениям кристаллизатора. Результаты численного решения задачи представлены в виде полей скоростей потоков жидкого металла и их температуры по различным сечениям кристаллизатора.

Summary. A new technology of filling the UNRS crystallizer with liquid metal and mixing is proposed. The original design of the device is given. The research was carried out by mathematical modeling by numerical method. The results of computational calculations of the melt flow in the crystallizer volume are presented. An example of calculating the casting of steel into a mold of rectangular cross-section, melt flow diagrams for different sections of the mold is given. The results of the numerical solution of the problem are presented in the form of velocity fields of liquid metal flows and their temperature over various sections of the mold.

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

Key words: modeling, crystallizer, liquid metal, melt flows, mathematical model, numerical scheme, flow velocity.

УДК 519.677

Введение. Теоретический процесс перемешивания жидкой стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали (УНРС) [1; 2] математически описан и проанализирован в работах [3; 4; 5]. В этих публикациях процесс заполнения кристаллизатора жидкой сталью ведётся с помощью глухонного стакана с эксцентрично расположенными выходными отверстиями. Эксцентричные окна в глухонном стакане были эффективны, когда отсутствовало принудительное перемешивание жидкого металла.

В работе [6] также присутствует глухонный стакан с эксцентричными выходными окнами, но возникает вопрос: насколько это эффективно при принудительном перемешивании? Ответ на этот вопрос и поставлен в настоящей работе, где моделируются потоки жидкой стали в кристаллизаторе при принудительном перемешивании, когда выпуск стали осуществляется из глухонного стакана с симметрично расположенными выходными окнами. Ведь изготовление глухонного стакана с симметричными окнами проще и дешевле, чем с эксцентрично расположенными.

На рис. 1 изображена схема данного процесса. Из ковша 1 через глухонный стакан 2, имеющий симметрично расположенные окна 3, металл поступает в кристаллизатор 4. По наружной поверхности глухонного стакана выше его выходных отверстий установлена с зазором разъёмная огнеупорная рубашка 5, соединённая с механизмом вращения 6. Имеем квазистационарный процесс. При постановке задачи было принято, что огнеупорная рубашка 5 и глухонный стакан 2 имеют одинаковое квадратное сечение (см. рис. 1).

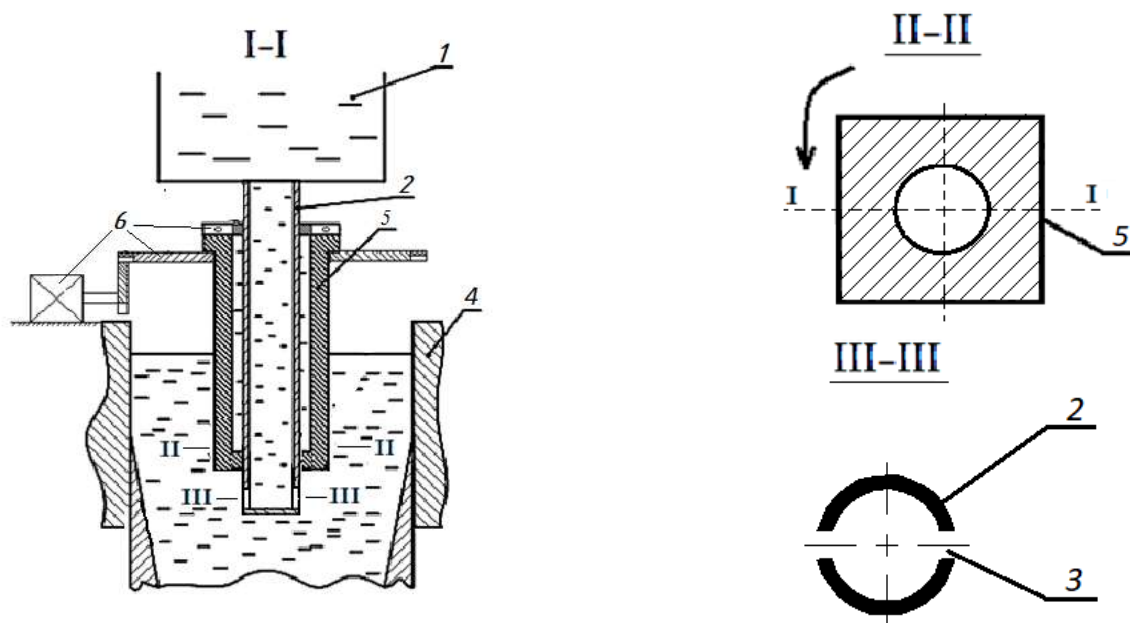


Рис. 1. Схема процесса подачи металла через глухонный стакан с симметричными окнами принудительного перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе при вращении разъёмной рубашки

При заданном направлении вращения одна половина грани квадрата как бы выталкивает жидкий металл от себя, а вторая половина грани втягивает металл. В этом случае можно считать рубашку неподвижной, а через её грани втекает и вытекает металл со скоростями, пропорцио-

нальными скорости вращения и геометрическим размерам квадратного сечения огнеупорной рубашки. Такая идеализация подробно описана в работе [6] и позволяет рассматривать данный процесс как стационарный. Кроме того, не будем учитывать появляющуюся на гранях кристаллизатора корочку затвердевшего металла.

Постановка задачи. Итак, рассматривается стационарный процесс течения несжимаемой жидкости, для которого справедливы уравнения

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

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

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

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

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; δ_{ij} – символ Кронекера; σ – гидростатическое напряжение; μ – коэффициент вязкости ($\text{г} \cdot \text{сек} / \text{см}^2$); v_i – проекция скоростей перемещений по координатным осям x_i ($i = 1, 2, 3$); ρ – плотность жидкого металла; F_i^* – проекция удельной объёмной силы на координатные оси x_i ($i = 1, 2, 3$); τ – время; Δ – Лапласа оператор; θ – температура; a – коэффициент температуропроводности $a = \lambda / (c \cdot \gamma)$, здесь λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоёмкость; γ – удельный вес; все коэффициенты принимаются постоянными константами. Для стационарного процесса

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

Граничные условия задачи (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{\Gamma_2} = p_1; \quad (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 1 \dots 3; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 5, 6, 7, 8; \quad \sigma_{31} = \sigma_{32}|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 9, 10, 11; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma'_8} = 0; \quad (\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{\Gamma''_8} = 0; \\ v_2|_{\Gamma_5} = v^*; \\ v_3|_{\Gamma''_8} = V_t; \\ v_2|_{\Gamma'_8} = V'_t; \\ v_1|_{\Gamma_1} = v_u; \\ v_1|_{\Gamma_3} = 0; \\ v_2|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 6, 7, 8; \\ v_3|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 9, 10, 11, \end{aligned} \quad (5)$$

где V_t, V'_t – скорости течения металла через грани Γ''_8, Γ'_8 ; v_u – скорость вытягивания слитка (см. рис. 2).

При решении уравнения теплопроводности (4) использовались граничные условия:

$$\begin{aligned} \theta|_{\Gamma_i} = \theta_i^*, \quad i = 1 \dots 10; \\ q|_{\Gamma_i} = q_i^*, \quad i = 6, 7, 9, 10, \end{aligned} \quad (6)$$

где v^* – скорость выхода жидкого металла из окон погружного стакана; θ_i^* – заданные функции распределения температуры металла на поверхностях Γ_i ; q_i^* – заданные из экспериментальных данных тепловые потоки через поверхности Γ_i ; θ_5^* – заданная температура выхода металла из окон Γ_5 .

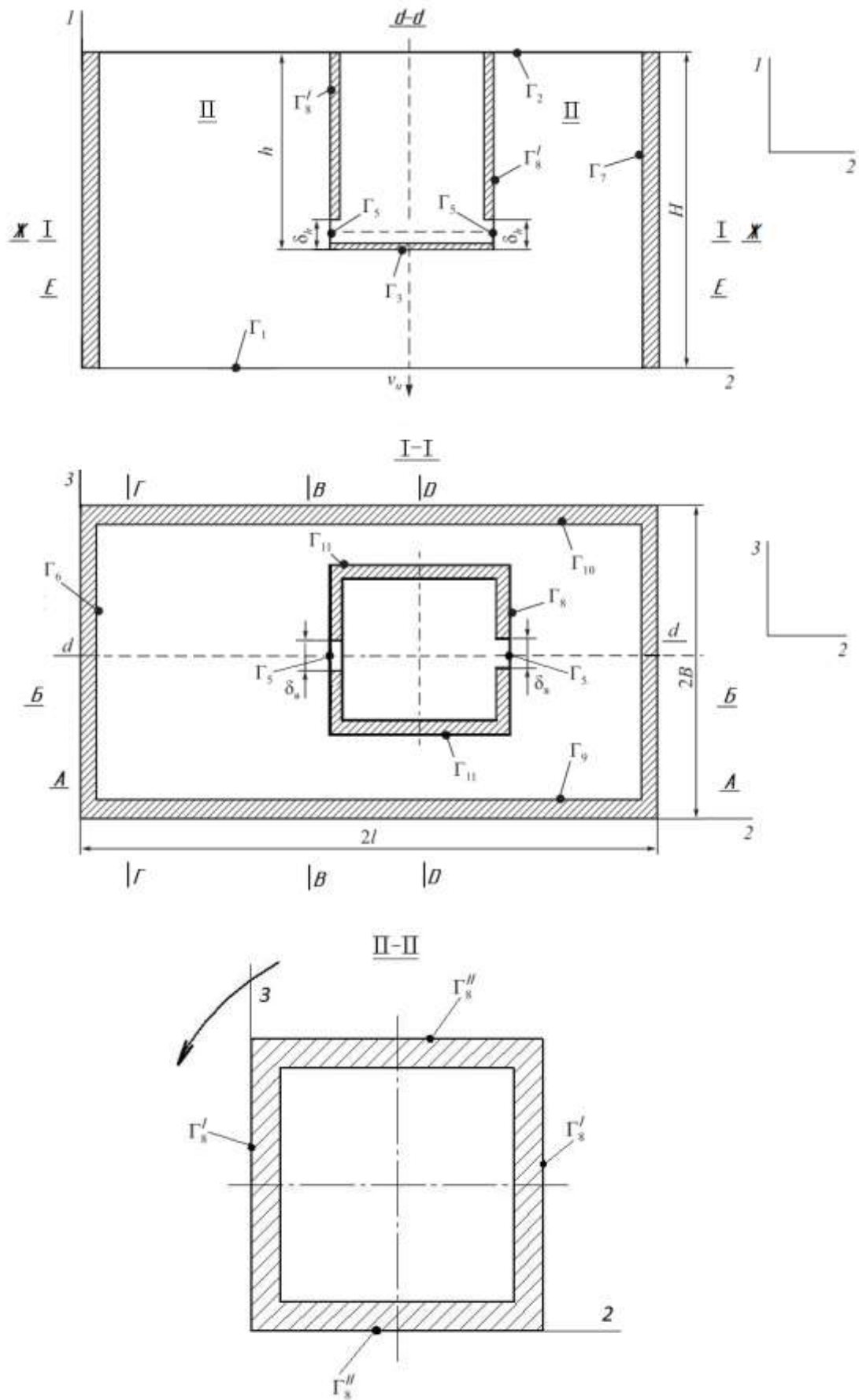


Рис. 2. Расчётная схема процесса разливки металла в кристаллизатор

Численная схема и алгоритм решения системы уравнений (1) – (4) при граничных условиях (5), (6) подробно описаны в работе [6] с использованием численного метода [7].

Результаты решения задачи. Задавались существующие размеры кристаллизатора: $H = 100$ см, $B = 12,5$ см, $l = 100$ см, $h = 20$ см, $b = 7,5$ см, $\delta_n = 8,5$ см, $\delta_B = 1,5$ см, $\delta_1 = 1,5$ см, $v_u = 1$ м/мин = $1,66\dots$ см/с. Для стационарного процесса v^* определялось из равенства секундных объёмов:

$$v_u \cdot B \cdot l = v^* \cdot \delta_n \cdot \delta_B; \Rightarrow v^* = \frac{v_u \cdot B \cdot l}{\delta_n \cdot \delta_B}.$$

Температура истекания жидкой стали из окна (Γ_5) принималась $\theta^*|_{\Gamma_5} = 1600$ °С. Температуры на поверхностях стакана и вращающейся рубашки (см. рис. 2) Γ_i $i = 3, 8, 8', 11$ принимались $\theta^*|_{\Gamma_i} = 1550$ °С, $i = 3, 8, 8', 11$. На поверхности Γ_2 (см. 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/см³. Коэффициент вязкости μ в уравнениях (2) принимался по работе [8]: $\mu = 2,1 \cdot 10^{-4}$ кг · с/м².

На рис. 3 показаны потоки металла в сечении А-А при вращении рубашки $n = 30$ об/мин. Величина вращения $n = 30$ об/мин взята исходя из результатов расчётов, показавших, что при большей степени вращения ($n = 50$ об/мин) происходит значительный «заброс» металла в шлаковую рубашку, что негативно влияет на качество получаемого непрерывного слитка.

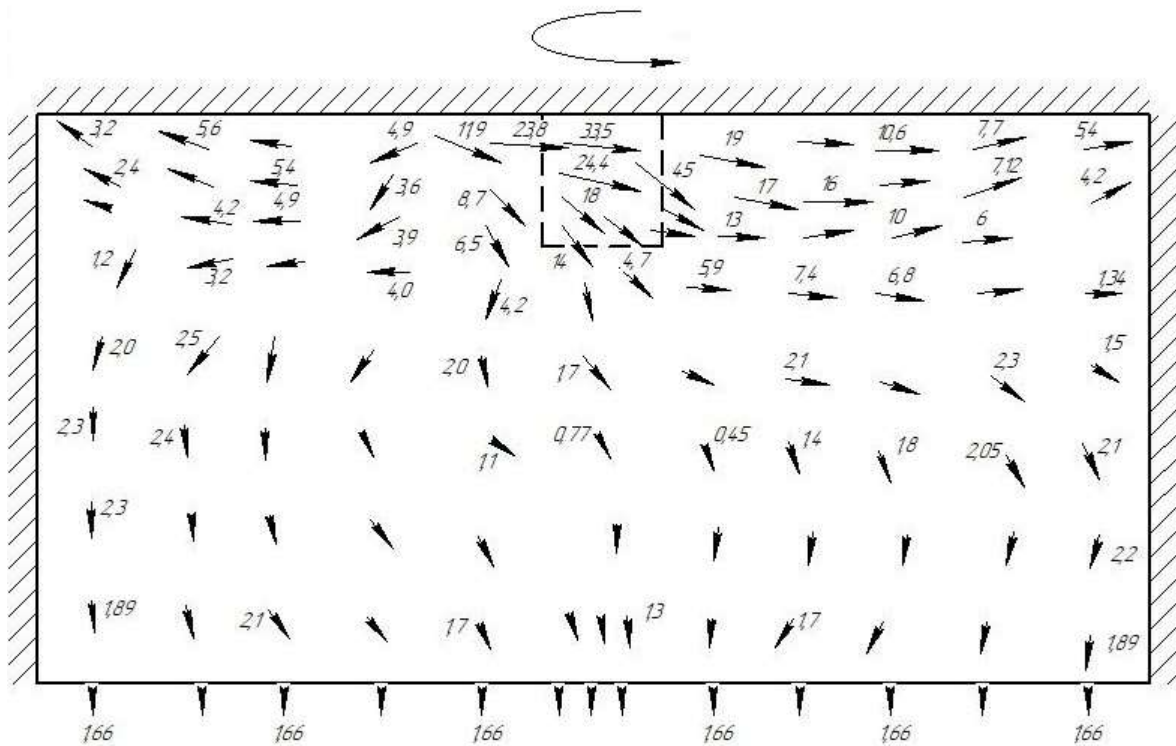


Рис. 3. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении А-А при $n = 30$ об/мин

Картина потоков в этом сечении показывает менее интенсивное проникновение жидкого металла в шлаковую область.

На рис. 4 приведены потоки металла в сечении Б-Б. Видим примерно тот же рисунок, что и в сечении А-А (см. рис. 3), но под стаканом наблюдаются вихревые потоки металла.

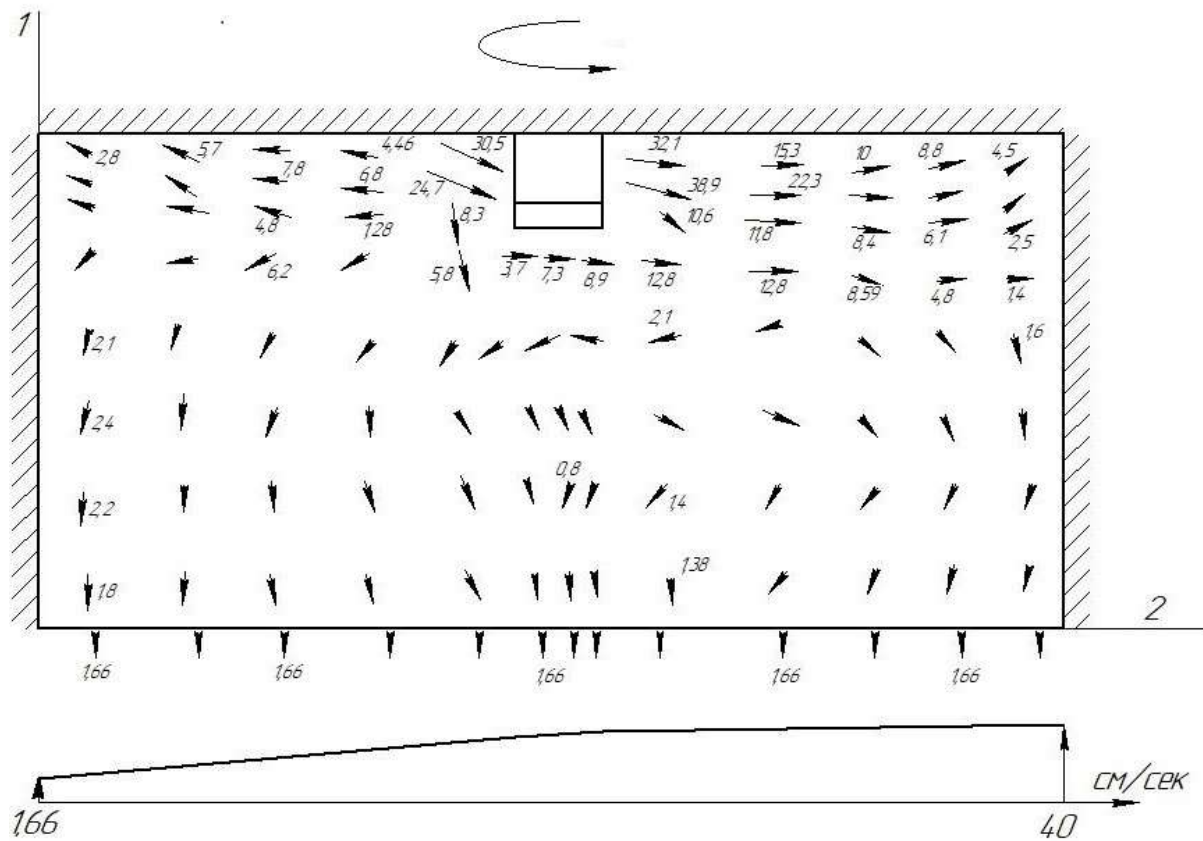


Рис. 4. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Б-Б при $n = 30$ об/мин

На рис. 5 приведены потоки металла в сечении Ж-Ж. Наблюдается практически та же картина, что и в работе [7] при эксцентричном выпуске металла из глухдонного стакана.

На рис. 6 – 8 показаны потоки металла соответственно в поперечных сечениях Г-Г, В-В, D-D. В периферийном сечении Г-Г (см. рис. 6) металл в верхней части (на глубине погружного стакана) идёт вверх и изменяет направление при приближении к вращающейся рубашке (см. рис. 7, 8). Следует отметить, что скорость потока металла вверх (см. рис. 6) значительно ниже скорости течения (≈ 3 см/с), чем в случае с эксцентричным выходом металла (≈ 10 см/с), а значит, и меньше вероятность заноса шлака в непрерывный слиток.

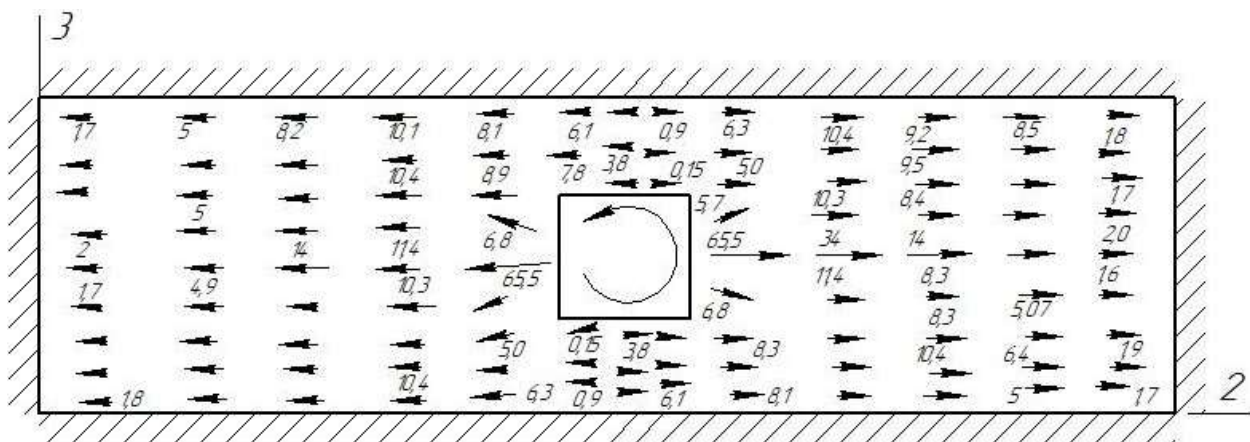


Рис. 5. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Ж-Ж при $n = 30$ об/мин

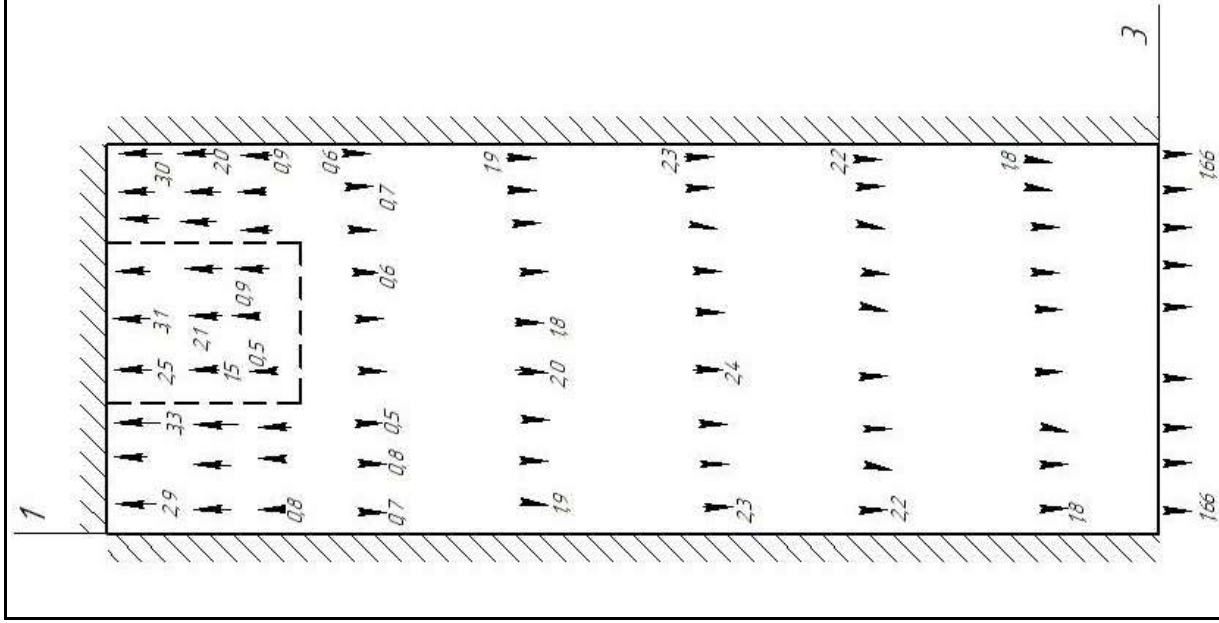


Рис. 6. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Г-Г при $n = 30$ об/мин

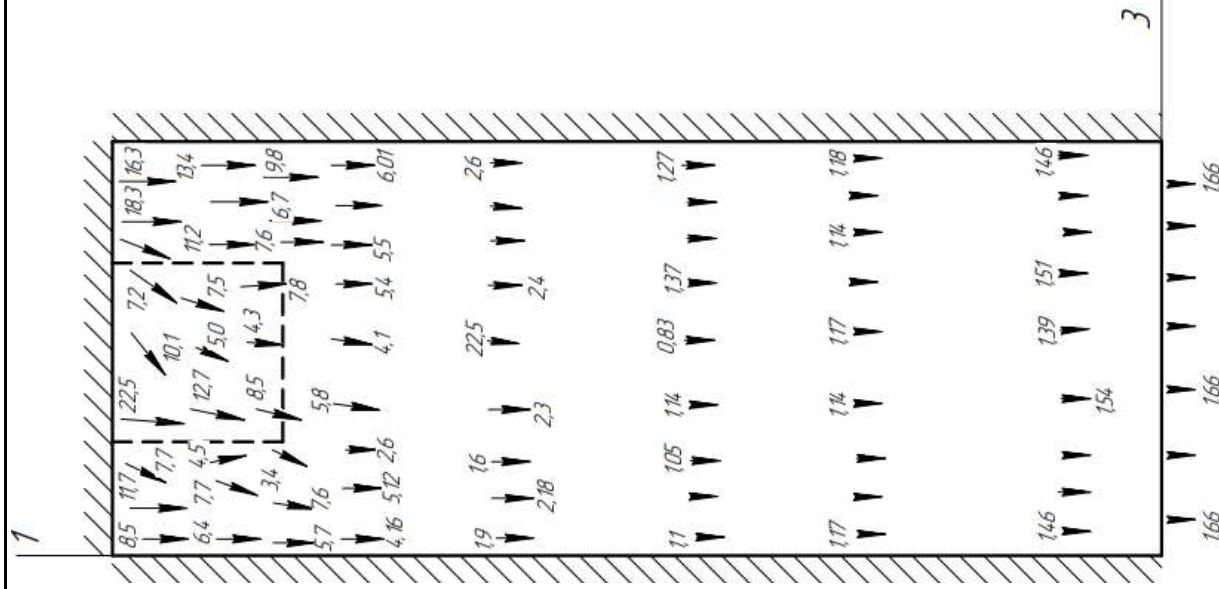


Рис. 7. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении В-В при $n = 30$ об/мин

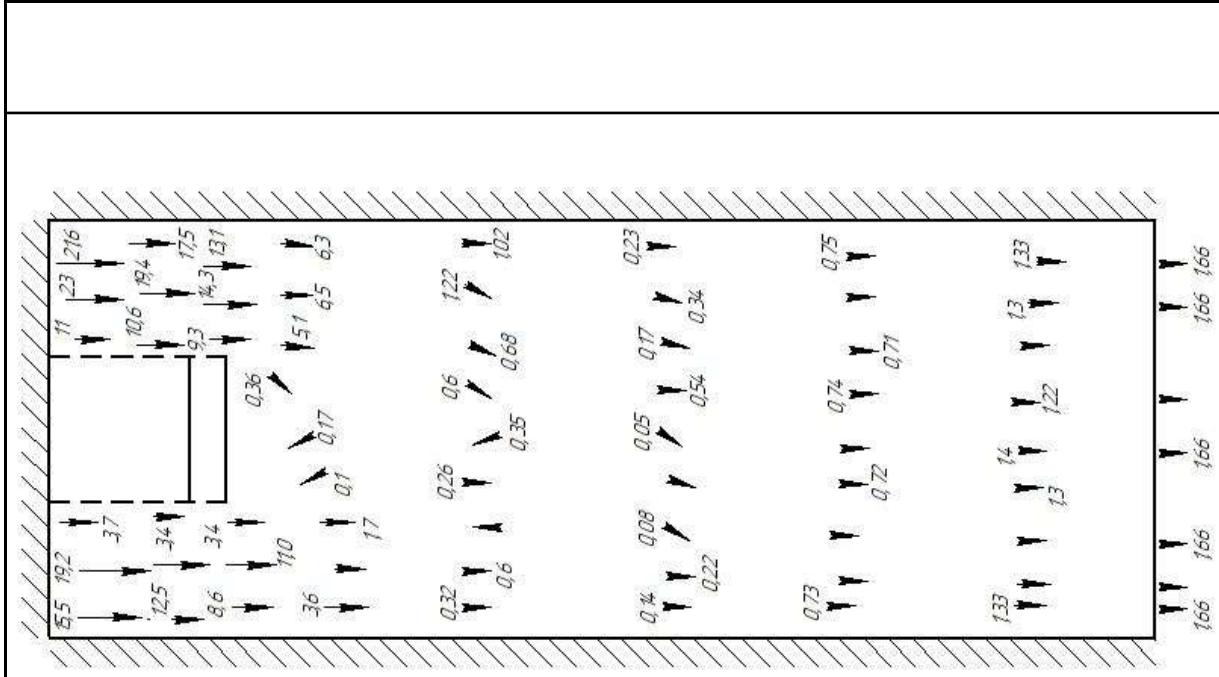


Рис. 8. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении D-D при $n = 30$ об/мин

Выводы:

1. Разработана математическая модель процесса заполнения и перемешивания жидкой стали в кристаллизаторе прямоугольного сечения с симметричным выходом металла из глухдонного погружного стакана.

2. Анализ результатов показал эффективность применения глухдонного погружного стакана с симметричными выходными окнами по сравнению со стаканом с эксцентричными выходными окнами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка нового способа разлива слябовых заготовок на МЛНЗ / В. В. Стулов, В. А. Матысик, Т. В. Новиков, С. В. Щербаков, И. В. Чистяков, А. П. Плотников. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 156 с.
2. Патент № 196254 Российская Федерация, МПК В22D 11/10 (2006.01). Устройство для подачи жидкого металла в вертикальный кристаллизатор УНРС через погружной прямооточный стакан: № 2019128247: заявлено 12.03.2018; опубликовано 21.02.2020 / Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – Бюл. № 6.
3. Совершенствование устройств по заполнению кристаллизатора УНРС жидким металлом / В. И. Одинокое, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, С. А. Кузнецов, А. И. Горнаков // *Металлург.* – 2021. – № 4. – С. 33-35.
4. Одинокое В. И. Численное моделирование процесса заполнения металла кристаллизатора с отражателем УНРС / В. И. Одинокое, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 2019. – № 10. – С. 747-755.
5. Одинокое В. И. Математическое моделирование процесса течения металла в кристаллизаторе при его подаче из погружного стакана с эксцентричными отверстиями / В. И. Одинокое, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 2018. – Т. 61. – № 8. – С. 606-612.
6. Математическое моделирование процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установке непрерывной разлива стали / В. И. Одинокое, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев, В. А. Карпенко // *Математическое моделирование и численные методы.* – 2023. – № 3. – С. 63-87.
7. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокое, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. А. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
8. Kim, W. S. A Simplified Phenomenological Theory of Viscosity for Liquid Metals / W. S. Kim, T. S. Chair // *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2001, V. 22, No. 1, p. 43-45.