

УДК 669.14.018.8

В.В. Стулов, А.И. Горнаков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЖИДКОЙ СТАЛИ
В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ**

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре

Приведены результаты течения в разные моменты времени окрашенной струи жидкости в горизонтальной плоскости на мениске модели кристаллизатора, а также картины перемешивания измельченных частиц в разные моменты времени. Моделирование на воде выполнено соблюдением равенства критерия Рейнольдса. В работе использована модель новой конструкции погружного разливочного стакана.

Ключевые слова: кристаллизатор МНЛЗ, погружной стакан, критерий Рейнольдса.

В настоящее время при разработке новых способов и устройств для непрерывной разливки стали в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [1] стоит актуальная задача исследования гидродинамики расплава и поведения наводимой шлакообразующей смеси на модели кристаллизатора.

В работе [2,3] приведены результаты моделирования гидродинамики жидкой стали на плоской модели при разливе расплава через стакан эксцентричными отверстиями. Недостаточная глубина расположения выходных отверстий стакана модели вносит существенную погрешность в полученные результаты.

В работе [4] приведены результаты моделирования разливки стали через два погружных стакана на прозрачной модели кристаллизатора.

В настоящей работе ставилась цель исследовать гидродинамику расплава в горизонтальной плоскости кристаллизатора, определить параметры истекающих струй в горизонтальной плоскости, состояние шлаковой смеси на поверхности мениска расплава.

Исходные данные

Параметры прозрачной модели кристаллизатора, м: высота $H_M = 0,3$; длина широкой стенки $L_M = 0,39$; длина узкой стенки $B_M = 0,05$.

В нижней части модели установлена перегородка с отверстиями в виде сот диаметром 4 мм для равномерного вытекания воды.

Параметры модели погружного разливочного стакана, м: диаметр наружный $d_M = 0,036$; диаметр внутренний $d_{M0} = 22 \cdot 10^{-3}$; размеры выходных отверстий – $9 \times 25 \cdot 10^{-3}$; смещение отверстий – 0,018; глубина погружения стакана в модель кристаллизатора – 0,05.

Параметры разливки стали Ст.3 в промышленный кристаллизатор: скорость разливки – 0,55 м/мин, температура разливки составляет 1530 °С.

Параметры рабочего пространства промышленного кристаллизатора, м: высота $H_{\Pi} = 1,2$; толщина $B_{\Pi} = 0,2$; ширина $L_{\Pi} = 1,55$.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки для моделирования истечения жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ.

Экспериментальная установка на рис. 1 состоит из прозрачной модели кристаллизатора 1 с перегородкой 2 и отверстиями 3, модели погружного разливочного стакана 4 с двумя выходными отверстиями 5, сливного коллектора 6 с патрубком 7 и краном 8, разливочной емкости 9 со стопором 10, дополнительной емкости 11 со сливной трубой 12 и краном 13, трубы 14 с краном 15, цифровой видеокамеры 16.

Работа экспериментальной установки на рис. 1 осуществляется следующим образом. Вода по трубе 14 через открытый кран 15 поступает в дополнительную емкость 11 и через сливную трубу 12 при открытом кране 13 поступает в разливочную емкость 9 и заполняет её.

После заполнения водой емкости 9 производится заполнение емкости 11. При заполненной емкости 11 и закрытых кранах 14 и 8 установка готова к разливке жидкости в модель кристаллизатора 1.

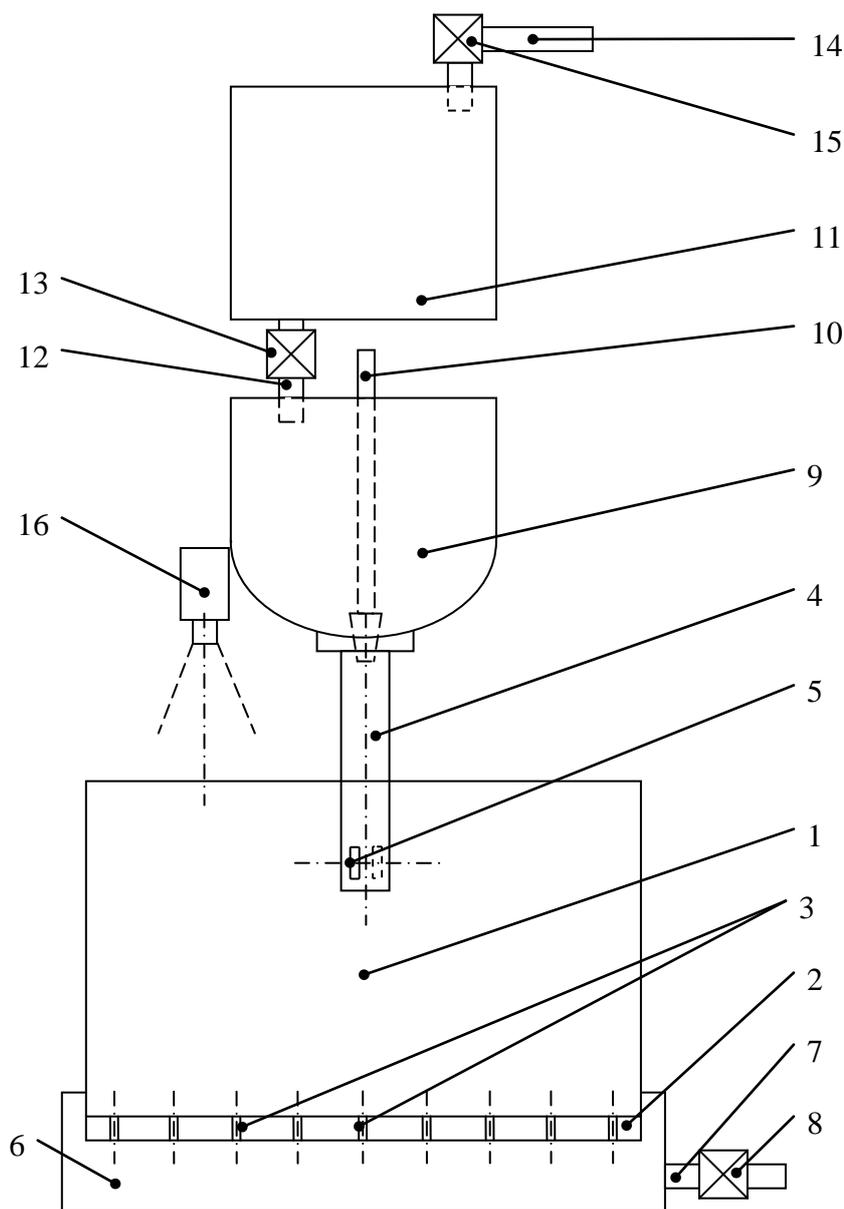


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для моделирования гидродинамики жидкой стали и шлакообразующей смеси в кристаллизаторе МНЛЗ:

1 – прозрачная модель кристаллизатора; 2 – перегородка; 3 – отверстия; 4 – модель погружного разливающего стакана; 5 – выходные отверстия; 6 – сливной коллектор; 7 – патрубок; 8, 13, 15 – кран; 9 – разливающая емкость; 10 – стопор; 11 – дополнительная емкость; 12 – сливная труба; 14 – труба; 16 – цифровая видеокамера

Затем поднимается стопор 10 и вода из разливающей емкости 9 через погружной разливающий стакан 4 с двумя выходными отверстиями 5 поступает в прозрачную модель кристаллизатора 1 и заполняет её.

Одновременно открывается кран 15 и вода по трубе 14 поступает в дополнительную емкость 11. После погружения выходных отверстий 5 разливающего стакана 4 в воду производится впрыскивание через насадки окрашивающей жидкости в отверстие 5 с окрашиванием истекающих струй. Одновременно открывается кран 8 и вода через отверстия 3 в перегородку

родке 2 поступает в сливной коллектор 6 и через патрубок 7 удаляется из модели кристаллизатора 1. Перемещением стопора 10 в разливочной емкости 9 добиваются одинакового погружения выходных отверстий 5 в воду в прозрачной модели кристаллизатора 1. Процесс истечения окрашенных струй жидкости в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также перемешивание мелких частичек размером 1-2 мм на мениске жидкости в кристаллизаторе записываются на цифровую видеокамеру 16.

Методика исследований

Варианты визуализации течений моделирующей жидкости в модели кристаллизатора:

1. Впрыскивание окрашивающей жидкости в модель погружного стакана.
2. Подача (наведение) на поверхность мениска жидкости нетонущих частичек размером 1-2 мм с плотностью 350 кг/м^3 .

Процесс истечения жидкости записывается на цифровую камеру EX-F1(CASIO) со скоростью съемки 30-300 кадр/с при эффективном количестве пикселей – 6 млн.

В качестве основного параметра, характеризующего степень турбулентности струи расплава в кристаллизаторе, является критерий Рейнольдса [4] $Re = \omega \cdot l / \nu$.

Обозначения: ω – скорость расплава в кристаллизаторе, м/с; l – характерный размер, м; ν – кинематическая вязкость расплава, $\text{м}^2/\text{с}$. В качестве l выбираем половину длины широкой грани кристаллизатора.

При разливке стали Ст.3 в промышленный кристаллизатор с параметрами $\omega = 0,1-1 \text{ м/с}$, $l = L/2 = 0,75 \text{ м}$ и $\nu = 0,86 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ получаем значение $Re_{\text{п}} = (0,872-8,72) \cdot 10^5$.

Теплофизические свойства разливаемой стали Ст.3 [5]: $t_{\text{п}} = 1508 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{с}} = 1465 \text{ }^\circ\text{C}$; $C_1 = 718$ и $C_2 = 832 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, где C_1 , C_2 – теплоемкость стали соответственно в твердом и жидком состояниях; $t_{\text{л}}$, $t_{\text{с}}$ – температура стали соответственно в жидком и твердом состояниях.

В качестве моделирующей жидкости в прозрачной модели кристаллизатора выбрана вода [4]. Теплофизические параметры воды [6] при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$: $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$; $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $C_p = 4183 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; $\lambda = 0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$.

Результаты исследований

1. Впрыскивание окрашивающей жидкости в выходные отверстия модели погружного стакана.

При скорости истечения окрашенной струи воды $\omega = 0,8-1,2 \text{ м/с}$ в прозрачную модель кристаллизатора получены в разные моменты времени картины течения жидкости на мениске в горизонтальной плоскости кристаллизатора, представленные на рис. 2. На рис. 2 цифрами 5–15 показано нарастание прозрачности течений в разные моменты времени. В момент времени $\tau = 0 \text{ с}$ (рис. 2, а) окрашенная струя 5, вытекающая из отверстия 4 погружного стакана 3, распространяется вдоль широкой стенки 1 модели кристаллизатора в сторону узкой стенки 2, являющейся преградой. В момент времени $\tau = 2-2,2 \text{ с}$ (рис. 2, б, в) поток окрашенной жидкости 5 распространяется на противоположную широкую стенку 1. В момент времени $\tau = 5 \text{ с}$ (рис. 2, д) основной поток окрашенной жидкости 8 переходит на противоположную широкую стенку 1, за которым следует поток 9 осветленной жидкости. В момент времени $\tau = 6-7 \text{ с}$ (рис. 2, е, з) характерно появление более светлых перемешанных областей 11 (рис. 2, е) и 13 (рис. 2, з) в районе противоположной широкой стенки 1 кристаллизатора в результате образования вихря с центром в точке O . Центр вихря (т. O) расположен на расстоянии $(1/3) \cdot (L_M/2)$ от узкой стенки 2 со смещением на $(1/4) \cdot B_M$ от широкой стенки 1. Вихрь может изменяться в размерах: сжиматься и растягиваться. В момент времени $\tau = 11 \text{ с}$ (рис. 2, и) осветленная область 13 в виде вращающегося вихря увеличивается в своих размерах практически на все сечение кристаллизатора. Менее светлые области 12 остаются вдоль узкой стенки 2 модели кристаллизатора и в районе модели погружного стакана 3. В момент времени $\tau = 15 \text{ с}$ (рис. 2, к) менее светлая область 14 сохраняется только у модели погружного стакана 3.

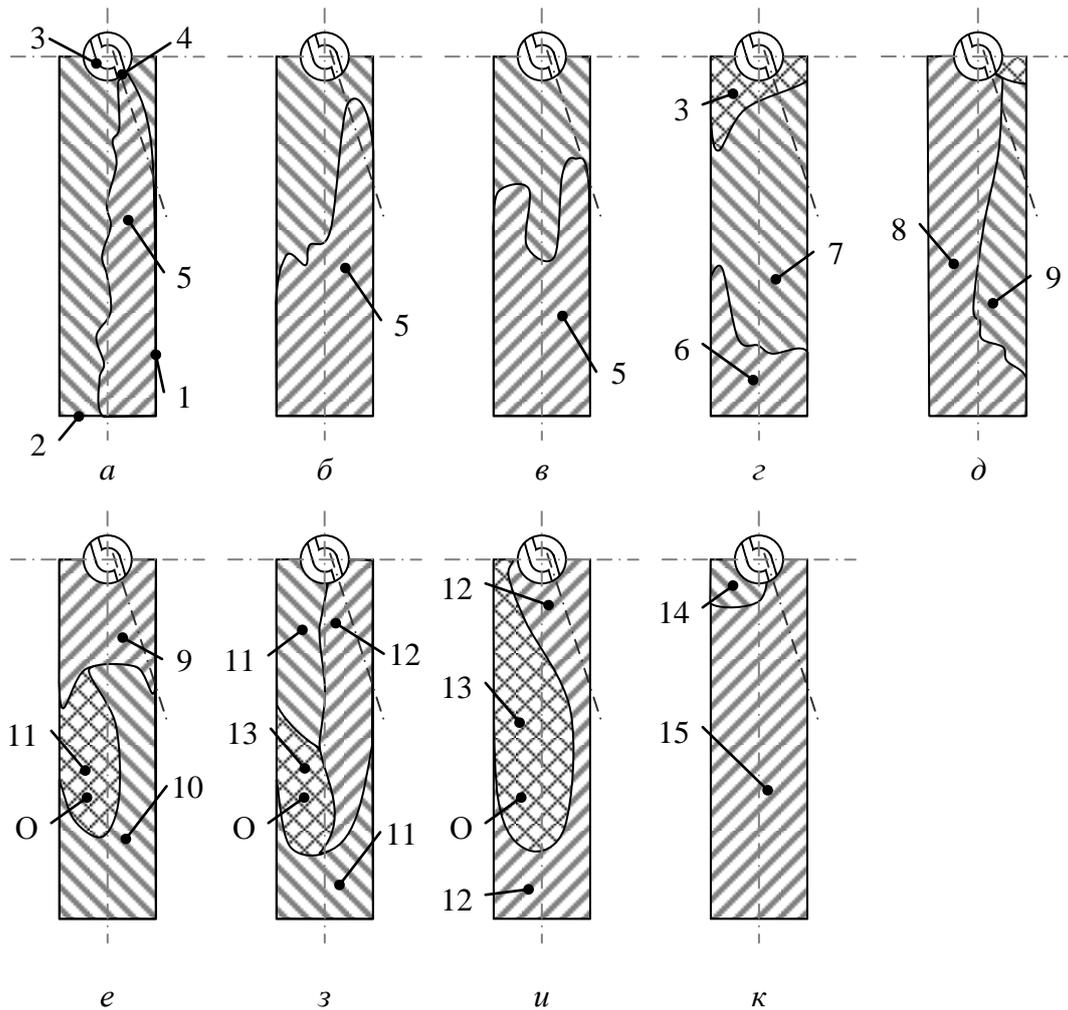


Рис. 2. Картины течений окрашенной жидкости на мениске в горизонтальной плоскости модели кристаллизатора в разные моменты времени:

a – $\tau = 0$ с; *б* – $\tau = 2$ с; *в* – 2,2; *г* – 3,3; *д* – 5; *е* – 6; *з* – 7; *и* – 11; *к* – 15;

1 – половина широкой стенки модели кристаллизатора; *2* – узкая стенка; *3* – модель погружного разливающего стакана; *4* – выходное отверстие; *5* – *15* нарастание прозрачности течений в разные моменты времени; точка *O* – центр вихря

Из результатов проведенных исследований с окрашиванием струи истекающей из модели погружного стакана, можно сделать следующие выводы:

- в области широкой стенки через время 7 с с противоположной стороны струи располагается наиболее перемешиваемая первоначально осветляемая область вихря;
- наименее перемешиваемая (в последнюю очередь) область располагается левее выходного отверстия модели стакана. Весь процесс перемешивания и осветления течения жидкости происходит за время не более 15 с.

С целью подтверждения полученных результатов с окрашенной струей жидкости выполним исследование поведения измельченных частичек на поверхности мениска жидкости (рис. 3).

2. В процессе исследования с мелкими частицами обнаружено поочередное образование двух вихрей интенсивно разбивающих слой из частичек.

Центры образующихся вихрей №1 и №2 смещены под противоположную широкую стенку от середины кристаллизатора. Первоначально образуется вихрь №1 в момент $\tau = 1-1,4$ с (рис. 3, б, в) с центром удаленным на $(1/3) \cdot (L_M/2)$ от узкой стенки.

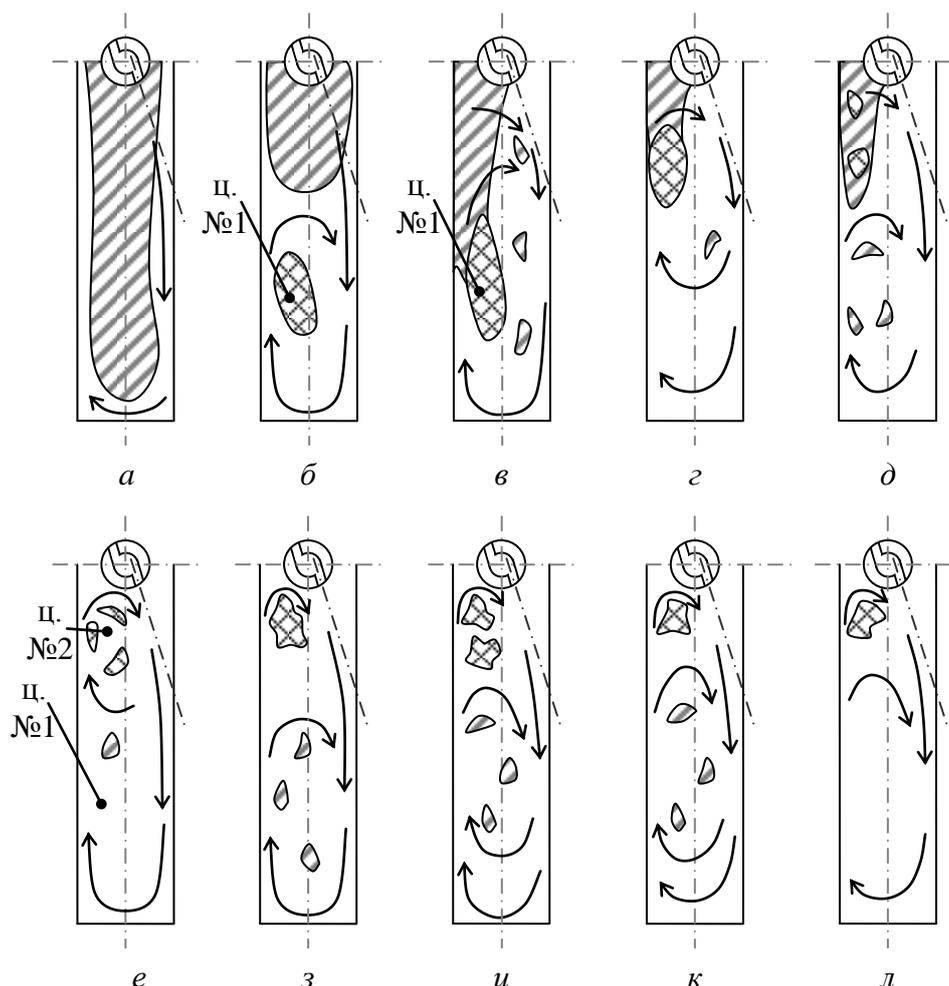


Рис. 3. Картины перемешивания измельченных частичек на мениске в горизонтальной плоскости модели кристаллизатора в разные моменты времени:

$a - \tau = 0$ с; $b - \tau = 1$ с; $в - 1,4$; $г - 2,4$; $д - 3,4$; $e - 5$; $з - 6$; $и - 8$; $к - 10$; $л - 14$

Вихрь изменяет свою форму, но центр его приходится на одну точку. Вихрь может распадаться на “островки” из частичек ($\tau = 1,4$ и $3,4$ с) (рис. 3, *в*, *д*), а потом вновь образуется из уже уменьшенных “островков”. То есть слой покрытия из частичек дробится и разрушается образующимися вихрями.

В момент $\tau = 3,4$ с (на рис. 3, *д*) образуется второй вихрь №2, центр которого расположен левее модели стакана. В момент $\tau = 5$ с (рис. 3, *e*) в вихре №1 не наблюдается “островков” из мелких частичек, а вихрь №2 разбивается на мелкие вращающиеся “островки”. В дальнейшем интервале времени $\tau = 6-14$ с (на рис. 3, *з-л*) происходит измельчение “островков” из частичек в вихре №2, которые потом попадают в вихрь №1.

По полученным результатам исследований с измельченными частичками можно сделать следующие выводы:

1. Разрушение покрытия жидкости из частичек начинается со стороны узкой стенки с образованием вращающегося смещенного к широкой стенке вихря №1, распадающегося на мелкие “островки”.

2. Образование вращающегося вихря №2 в районе модели погружного стакана с дроблением оставшегося покрытия из слоя частичек за время $\tau = 14$ с.

3. Разрушение слоя частичек на поверхности жидкости в результате образования вращающихся с частицами двух вихрей подтверждает поведение потока окрашенной жидкости за время $\tau = 15$ с.

4. При средней скорости в струе жидкости $\overline{\omega}_c = 0,8-1,2$ м/с средняя скорость частичек в вихрях составляет 0,5–0,8 м/с.

5. Сопоставление значения критерия Рейнольдса при разливке стали в промышленный кристаллизатор $Re = (87,2-872) \cdot 10^3$ со значением критерия Рейнольдса воды в модели кристаллизатора $Re = (160-230) \cdot 10^3$ показывает, что полученные результаты поведения струи в кристаллизаторе и поведение измельченных частиц (шлакообразующей смеси) сопоставимы.

6. Полученные результаты разрушения слоя размельченных частиц на поверхности мениска воды за время $\tau_m = 14$ с подтверждаются результатами промышленных исследований разогрева и расплавления шлакообразующей смеси на поверхности мениска жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ за $\tau_n = 120$ с [1]. При этом в процессе разливки временной масштаб ($M_t = \tau_n/\tau_m$) равен 8,6.

7. Результаты моделирования поведения струи расплава в модели кристаллизатора используются при разработке математической модели гидродинамики с перемешиванием расплава в кристаллизаторе МНЛЗ.

Библиографический список

1. Разработка нового способа разливки слябовых заготовок на МНЛЗ / В.В. Стулов [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2008. – 158 с.
2. **Стулов, В.В.** Совершенствование процесса непрерывной разливки стали на основе исследования гидродинамики и теплообмена в кристаллизаторе / Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. – М. МИСиС, 1992. – 17 с.
3. **Стулов, В.В.** Исследование гидродинамики расплава в кристаллизаторе МНЛЗ / В.В. Стулов [и др.]. // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: сб. ст. ИМиМ ДВО РАН / Комсомольск-на-Амуре. 2009. Вып. 3. Ч. 2. С. 39-43.
4. Экспериментальное исследование гидродинамики непересекающихся плоских струй в емкости кристаллизатора / В.В. Стулов [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. №11. С. 50–52.
5. **Островский, О.И.** Свойства металлических расплавов / В.А. Григорян, А.Ф. Вишкарев. – М.: Металлургия, 1988. – 304 с.
6. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / В.А. Григорьев [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512 с.

*Дата поступления
в редакцию 20.05.2010*

V.V. Stulov, A.I. Gornakov

STUDY OF HYDRODYNAMICS OF LIQUID STEEL IN THE MOLD CONTINUOUS CASTER

The results of flow at different times colored liquid jet in a horizontal plane at the meniscus model of the mold, as well as pictures of mixing crushed particles at different points in time. Simulation of the water holds equality of the Reynolds number. We used a model of the new construction submersible glass bottling.

Key words: continuous casting crystallizer, submersible glass, the Reynolds number.