

Д. т. н. К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, К. т. н. О. А. Филатова,
Д. т. н. Виктор В. Точилкин (✉)

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

УДК 621.746.047:669.054.2

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА ОТКРЫТОЙ СТРУЕЙ И КОНСТРУКЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИЕМНЫХ КАМЕР ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША СОРТОВОЙ МНЛЗ

Рассмотрены огнеупорное оборудование приемных камер сортовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и процессы управления потоками металла в них при разливке из сталеразливочного ковша открытой струей. Это обеспечивает эффективное формирование потоков стали в приемной камере промежуточного ковша сортовой МНЛЗ и создает условия для повышения качества металла и уменьшения брака непрерывно-литых заготовок.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), сталеразливочный ковш (СРК), промежуточный ковш (ПК), математическое моделирование, огнеупорные конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

В современной МНЛЗ жидкая сталь практически полностью защищена от вторичного окисления при номинальных режимах разливки [1] посредством применения высококачественных огнеупоров [2]: защитная труба [3] на пути жидкой стали из сталеразливочного ковша (СРК) в промежуточный ковш (ПК) [4], погружной стакан [5] и другие элементы МНЛЗ, обеспечивающие прохождение жидкого металла к кристаллизатору. В кристаллизаторах обеспечивают оптимальные режимы качания [6] (за счет использования гидропривода) и автоматическое поддержание уровня металла [7], осуществляют автоматическое предотвращение прорывов металла. Для улучшения качества внутренней структуры заготовки применяют методы электромагнитного перемешивания и мягкого обжата заготовки с жидкой сердцевиной и др. Для предотвращения окисления жидкая сталь в промежуточном ковше защищена от контакта с воздухом слоем шлака [8]. Структура потоков расплавленного жидкого металла в ПК при непрерывной разливке является основным фактором, влияющим на распределение неметаллических включений (НВ) в заготовке [9].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На сортовой пятиручьева МНЛЗ используют Т-образный промежуточный ковш (рис. 1). Разливку жидкого металла производят из СРК открытой струей стали, что характерно для начала разливки СРК, при его замене [10].

Цель работы — исследование структуры потоков [11] стали в процессе разливки и характера распределения скоростей потоков ее при истечении открытой струей из разливочного отверстия СРК, а также обоснование конструктивных изменений [12] огнеупорных изделий ПК. Изучены особенности движения струи металла из СРК в ПК [9]. Рассмотрено влияние различных факторов на стабильность процесса литья и на концентрацию НВ в ПК [13] применительно к разливке на сортовой МНЛЗ. Проведено математическое моделирование [9] сле-

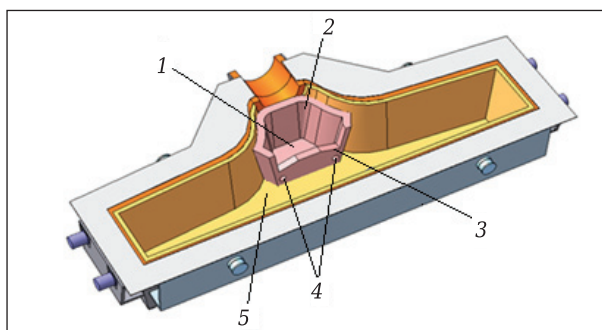


Рис. 1. Промежуточный ковш сортовой МНЛЗ: 1 — приемная камера; 2 — многогранный огнеупор (МО); 3 — порог; 4 — переливные отверстия; 5 — разливочная камера



Виктор В. Точилкин
E-mail: toch56@mail.ru

дующих процессов: движение потоков стали в объеме системы струя металла из СРК – ПК; распределение НВ при разливке стали в ПК.

Математическая модель основана на уравнении Навье – Стокса для жидкого металла и уравнении неразрывности потока для несжимаемой жидкости [9]. Соответствующие уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}, \\ \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{u}$ — вектор скорости жидкости; $\vec{F}$ — вектор объемных сил; p — давление жидкости; ∇p — градиент давления; ν — коэффициент кинематической вязкости; $\nabla^2 \vec{u}$ — лапласиан $\vec{u}$; ρ — плотность стали.

В математической модели были сделаны допущения [14]: плотность каждой фазы (металла и НВ) в модели постоянна; жидкий металл и НВ имеют одни и те же поля давлений; объем СРК изначально заполнен жидкостью; жидкость (сталь) является вязкой и несжимаемой.

Модель жидкого металла для анализа процесса разливки стали открытой струей из СРК в пятиручьевой ПК сортовой МНЛЗ показана на рис. 2. Было проведено математическое моделирование потоков жидкого металла при различных уровнях заполнения им ПК с целью оценки влияния высоты уровня металла в ковше на скорость истечения в зоне раздела структур металл – шлак над центральным разливочным отверстием [15].

Для представления рекомендаций по совершенствованию технологий разливки стали [16] и

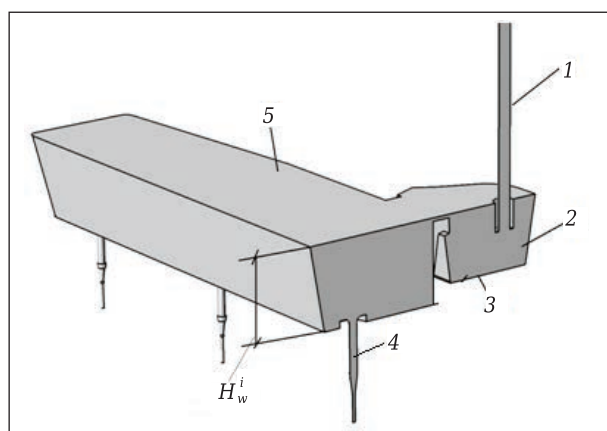


Рис. 2. Модель жидкого металла для анализа процесса разливки стали открытой струей из СРК в пятиручьевой ПК сортовой МНЛЗ: 1 — струя металла из СРК; 2 — плоскость симметрии пятиручьевого ПК сортовой МНЛЗ; 3 — металл в приемной камере ПК; 4 — металл, поступающий из разливочных стаканов ПК в кристаллизаторы; 5 — зеркало металла в ПК; H_w^i — рабочий уровень металла в ПК

огнеупорных конструкций [17] в периоды замены СРК и ПК в процессе цикла разливки стали на МНЛЗ при моделировании задавались значения высот уровня металла H_w : максимальный уровень $H_w^{\max}$ 670 мм, рабочие уровни H_w 600, 500, 400, 300 и 200 мм.

При анализе результатов моделирования оценивали изменение скорости металла [18] на зеркале металла в ПК, расположенного в центре ковша над центральным разливочным отверстием. Рост скорости выше предельно допустимой может привести к оголению поверхности металла и вторичному его окислению и, следовательно, ухудшению качества непрерывно-литой заготовки [19].

На рис. 3, а, б показаны поля скоростей потоков стали в продольном сечении ПК на зеркале металла при $H_w^{\max}$ в ПК (см. рис. 3, а) и при H_w в ПК, равном 600 мм. Для приведенных уровней стали в ПК характерно течение стали в основном через верх порога МО. При этом для приемной камеры ПК характерны высокие скорости по центру, в месте попадания струи металла из СРК и на верхней плоскости порога МО.

На рис. 3, в, г показаны поля скоростей потоков стали в продольном сечении ПК на зеркале металла при H_w в ПК 500 мм, что немного больше высоты порога МО (см. рис. 3, в), и при H_w в ПК 400 мм, что немного меньше высоты порога МК (см. рис. 3, г).

Анализ потоков при данном пограничном уровне стали в ПК, практически равном высоте порога МО, показал наличие скоростных потоков в месте стыка порога с боковыми поверхностями МО (см. рис. 3, в), а также увеличение скоростей потоков и стали из переливных отверстий МО (см. рис. 3, г) до 0,15 м/с, что больше допустимого 0,13 м/с. При уровне стали меньше высоты порога (см. рис. 3, г) увеличивается скорость потоков по дну ПК над боковыми разливочными отверстиями (разливочные отверстия 1, 2 и 4, 5) до величин 0,12–0,14 м/с.

На рис. 3, д, е показаны поля скоростей потоков стали в продольном сечении ПК на зеркале металла при H_w в ПК 300 мм (см. рис. 3, д) и 200 мм (см. рис. 3, е), что значительно меньше высоты порога МО. Анализ потоков при минимально возможных уровнях стали в ПК показал наличие скоростных потоков на дне МО приемной камеры ПК (см. рис. 3, д). Резкое увеличение скоростей потоков стали из переливных отверстий МО (см. рис. 3, е). Значения скоростей на поверхности зеркала жидкой стали при этом превышает 0,2 м/с, что значительно больше допустимого. При данных уровнях стали значительно увеличивается скорость потоков по дну ПК над боковыми разливочными отверстиями (разливочные отверстия 1, 2 и 4, 5) до величин 0,2 м/с и более.

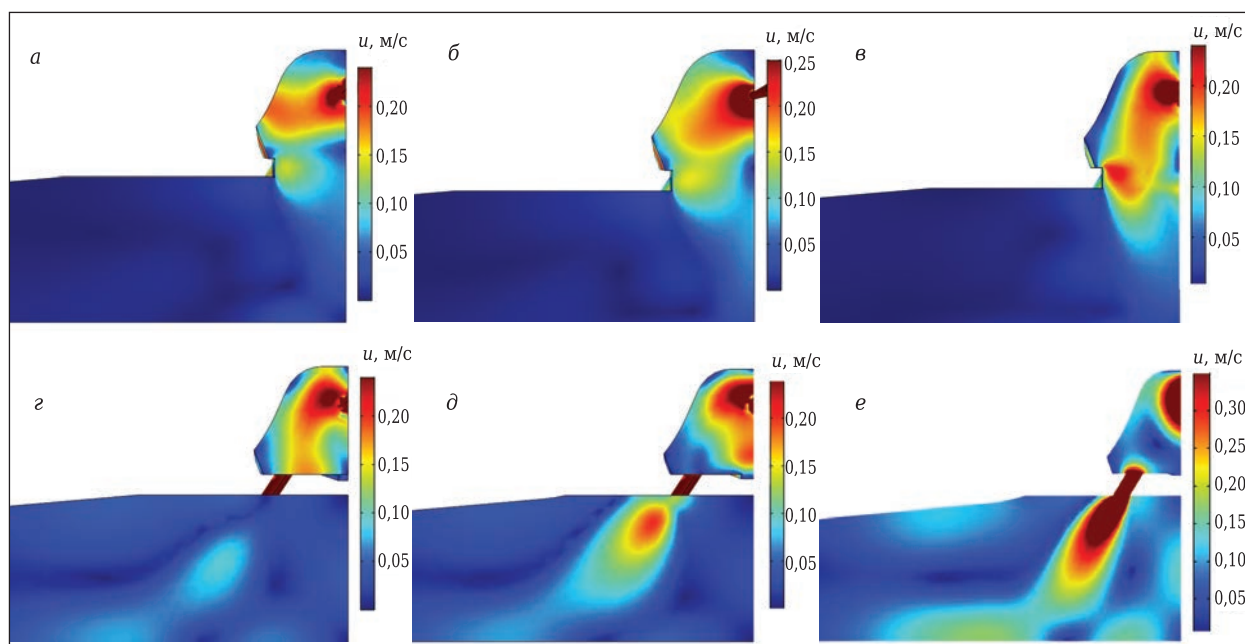


Рис. 3. Поля скоростей потоков стали в продольном сечении ПК на зеркале металла при H_w^i , мм: а — 670 ($H_w^{\max}$); б — 600; в — 500; г — 400; д — 300; е — 200

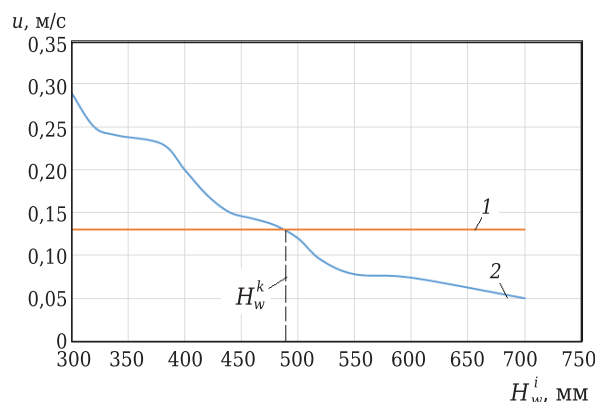


Рис. 4. Зависимость скорости u на зеркале металла в ПК над центральным разливочным отверстием от H_w^i : 1 — допустимая скорость потоков; 2 — скорости потоков стали на зеркале в зависимости от H_w^i ; H_w^k — критический уровень металла

На рис. 4 показаны зависимости скоростей потоков стали на зеркале металла в центре Т-образного ПК в районе центрального разливочного отверстия, где скоростные потоки наибольшие из-за его конструктивных особенностей. Чтобы не допустить оголения зеркала металла в ПК, H_w^i должен быть не ниже 500 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ работы системы открытая струя металла из СРК в ПК позволил установить, что в процессе разливки металла из ПК желательно поддерживать высоту уровня металла в ПК выше 500 мм, так как уменьшение уровня приводит к превышению скорости на зеркале металла ее предельного значения 0,13 м/с. Для обеспечения уменьшения скоростей на зеркале металла в период замены СРК и ПК необходимо использовать защиту струи металла [20].

Библиографический список

1. Odenthal, H.-J. Numerical and physical of tundish flow phenomena / H.-J. Odenthal, R. Bolling, H. Pfeifer // Steel Res. Int. — 2003. — Vol. 74, № 1. — P. 20, 44–55.
2. Кащеев, И. Д. Разработка огнеупорных бетонов алюмосиликатного и глиноземистого составов для тепловых агрегатов черной металлургии / И. Д. Кащеев, С. А. Поморцев, А. А. Ряплова // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 15–18.
3. Kashcheev, I. D. Developing refractory concretes of aluminosilicate- and alumina-based compositions for high-temperature equipment in ferrous metallurgy / I. D. Kashcheev, S. A. Pomortsev, A. A. Ryaplova // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 281–284. DOI: 10.1007/s11148-014-9708-x.

3. Вдовин, К. Н. Новые вставки из пластичных огнеупоров для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, О. А. Марочкин [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 41–43.

Vdovin, K. N. New plastic refractory linings for protecting a metal stream during pouring into a CBCM / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, O. A. Marochkin [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 318–320. DOI: 10.1007/s11148-014-9716-x.

4. Маки, Ж. Последние достижения в области разливочных огнеупорных систем / Ж. Маки, С. Задковски, Р. Брук // Достижения в области непрерывной разливки стали : Труды международного конгресса ; пер. с англ. Д. П. Евтеева, И. Н. Колыбанова. — М. : Металлургия, 1987. — С. 77–90.

5. **Вдовин, К. Н.** Создание имитатора рабочей среды для повышения износостойкости огнеупоров при разливке стали на сортовых МНЛЗ / К. Н. Вдовин, О. А. Марочкин, В. В. Точилкин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 11. — С. 10–13. DOI: 10.17073/1683-4518-2013-11-10-13.
- Vdovin, K. N.** Creating a stream simulator to improve the wear resistance of refractories during the casting of steel on continuous section casters / K. N. Vdovin, O. A. Marochkin, V. V. Tochilkin // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 435–437. DOI: 10.1007/s11148-014-9628-9.
6. **Сотников, А. Л.** Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / А. Л. Сотников // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2016. — Т. 59, № 5. — С. 334–338. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-334-338.
- Sotnikov, A. L.** Monitoring alignment of mold oscillatory motion with CCM process stream axis / A. L. Sotnikov, A. A. Sholomitskii // Metallurgist. — 2017. — Vol. 60, № 9/10. — P. 1046–1053. DOI: 10.1007/s11015-017-0406-z.
7. **Сотников, А. Л.** Контроль соосности колебательного движения кристаллизатора с технологической осью МНЛЗ / А. Л. Сотников, А. А. Шоломицкий // Металлург. — 2016. — № 10. — С. 45–50.
- Sotnikov, A. L.** Monitoring alignment of mold oscillatory motion with CCM process stream axis / A. L. Sotnikov, A. A. Sholomitskii // Metallurgist. — 2017. — Vol. 60, № 9/10. — P. 1046–1053. DOI: 10.1007/s11015-017-0406-z.
8. **Куклев, А. В.** Оптимизация гидродинамических характеристик промежуточного ковша УНРС с целью удаления экзогенных неметаллических включений / А. В. Куклев, В. В. Туняков, Ю. М. Айзин [и др.] // Металлург. — 2004. — № 4. — С. 47–49.
- Kuklev, A. V.** Optimization of the hydrodynamic characteristics of tundishes in order to remove exogeneous nonmetallic inclusions / A. V. Kuklev, V. V. Tynyakov, Yu. M. Aizin [et al.] // Metallurgist. — 2004. — Vol. 48, № 3/4. — P. 153–157. DOI: 10.1023/B:MELL.0000037176.66145.e8.
9. **Вдовин, К. Н.** Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок: монография / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков. — Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. — 348 с.
- Vdovin, K. N.** Modernization of refractory equipment of a continuous section caster / K. N. Vdovin, Vasilii V. Tochilkin, V. I. Umnov [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 4. — С. 349–353. DOI: 10.1007/s11148-017-0109-9.
10. **Вдовин, К. Н.** Модернизация огнеупорного оборудования сортовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, В. И. Умнов [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 8. — С. 3–7.
- Vdovin, K. N.** Upgrading of the refractory equipment of a continuous section caster / K. N. Vdovin, Vasilii V. Tochilkin, V. I. Umnov [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 4. — С. 349–353. DOI: 10.1007/s11148-017-0109-9.
11. **Вдовин, К. Н.** Разработка систем подачи аргона для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, С. Н. Ушаков, О. А. Марочкин [и др.] // Технология металлов. — 2013. — № 6. — С. 38–40.
- Vdovin, K. N.** Improving refractory constructions in the system «steel-pouring ladle – pouring basket» of CBCM / K. N. Vdovin, Vasilii V. Tochilkin, V. I. Umnov [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 255–258. DOI: 10.1007/s11148-017-0093-0.
12. **Гущин, В. Н.** Совершенствование технологии рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ / В. Н. Гущин, В. А. Ульянов // Сталь. — 2017. — № 5. — С. 16–20.
- Gushchin, V. N.** Designing refractories for the tundish of a continuous caster / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, I. M. Yachikov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 569–573. DOI: 10.1007/s11148-016-9889-6.
13. **Вдовин, К. Н.** Совершенствование огнеупорных конструкций системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, В. И. Умнов [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 6. — С. 29–32. DOI: 10.17073/1683-4518-2017-6-29-32.
- Vdovin, K. N.** Improving refractory constructions in the system «steel-pouring ladle – pouring basket» of CBCM / K. N. Vdovin, Vasilii V. Tochilkin, V. I. Umnov [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 255–258. DOI: 10.1007/s11148-017-0093-0.
14. **Вдовин, К. Н.** Разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков // Новые огнеупоры. — 2015. — № 11. — С. 3–7. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-11-3-7.
- Vdovin, K. N.** Designing refractories for the tundish of a continuous caster / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, I. M. Yachikov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 569–573. DOI: 10.1007/s11148-016-9889-6.
15. **Точилкин, В. В.** Методика расчета металлоприемника промежуточного ковша МНЛЗ / В. В. Точилкин // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2008. — № 6. — С. 44–47.
- Chislavlev, V. V.** Design engineering of refractory components for use in refining continuous – cast steel / V. V. Chislavlev, S. V. Feiler, D. V. Boikov, D. T. Neunyvakhina // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 58, № 6. — P. 603–607.
16. **Роглер, Ж. П.** Inclusion removal in a tundish by gas dubbing / J. P. Rogler, L. J. Heaslip, M. Mehrvar // Can. Met. Quart. — 2004. — Vol. 43, № 3. — P. 407–415.
- Rogler, J. P.** Inclusion removal in a tundish by gas dubbing / J. P. Rogler, L. J. Heaslip, M. Mehrvar // Can. Met. Quart. — 2004. — Vol. 43, № 3. — P. 407–415.
17. **Числавлев, В. В.** Разработка конструкции огнеупорных элементов для рафинирования стали при непрерывной разливке / В. В. Числавлев, С. В. Фейлер, Д. В. Бойков, Д. Т. Неунывахина // Новые огнеупоры. — 2017. — № 11. — С. 22–26. DOI: 10.17073/1683-4518-2017-11-22-26.
- Chislavlev, V. V.** Design engineering of refractory components for use in refining continuous – cast steel / V. V. Chislavlev, S. V. Feiler, D. V. Boikov, D. T. Neunyvakhina // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 58, № 6. — P. 603–607.
18. **Вдовин, К. Н.** Рафинирование металла в промежуточном ковше / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, М. В. Семенов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2007. — № 1. — С. 43–46.
- Vdovin, K. N.** Refining metal in the tundish of a continuous caster / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, M. V. Semenov [et al.] // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova. — 2007. — № 1. — С. 43–46.
19. **Гущин, В. Н.** Технические решения по управлению потоками расплава в промежуточных ковшах МНЛЗ / В. Н. Гущин, В. А. Ульянов, В. А. Васильев // Металлург. — 2010. — № 9. — С. 45–47.
- Gushchin, V. N.** Technical solutions for controlling flows of melts in the tundishes of continuous casters / V. N. Gushchin, V. A. Ul'yanov, V. A. Vasiliev // Metallurgist. — 2011. — Vol. 54, № 9/10. — P. 591–593. DOI: 10.1007/s11015-011-9344-3.
20. **Точилкин, В. В.** Электромеханические манипуляторы для транспортирования и ориентации устройств, обеспечивающих защиту струи стали при разливке / В. В. Точилкин, К. Н. Вдовин // Изв. вузов. Электромеханика. — 2004. — № 2. — С. 111, 112. ■
- Tochilkin, V. V.** Electromechanical manipulators for transporting and orienting devices ensuring protection of the steel stream at pouring / V. V. Tochilkin, K. N. Vdovin // Izv. vuzov. Elektromekhanika. — 2004. — № 2. — С. 111, 112. ■

Получено 19.03.18

© К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин,
О. А. Филатова, Виктор В. Точилкин, 2019 г.