Д. т. н. **К. Н. Вдовин**[1], **Василий В. Точилкин**[1], к. т. н. **О. А. Филатова**[1], **В. И. Умнов**[2], д. т. н. **Виктор В. Точилкин**[1] (✉)

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

[2] *ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия*

УДК 621.746.047:669.054.2

СИНТЕЗ ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА И КОНСТРУКЦИЙ ОГНЕУПОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫЙ КОВШ – ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ СОРТОВОЙ МНЛЗ

Рассмотрено огнеупорное оборудование системы сталеразливочный ковш (СРК) – струя металла (СМ) – промежуточный ковш (ПК) сортовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Рассмотрены процессы управления потоками металла в указанной системе. Отмечены особенности конструкции элементов МНЛЗ, которые обеспечивают рациональное прохождение разливаемого металла в системе СРК – СМ – ПК. Это обеспечило эффективное формирование потоков стали в приемной камере ПК 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

Модернизация конструкций отдельных узлов и деталей МНЛЗ — актуальная задача современной металлургической промышленности, решение которой обеспечивает повышение качества выпускаемого металла [1, 2].

Система сталеразливочный ковш (СРК) – струя металла (СМ) – промежуточный ковш (ПК) — важнейший технологический элемент МНЛЗ, требующий совершенствования технологии и оборудования [1]. При разливке стали эта система в значительной степени определяет стабильность процесса, оказывая большое влияние на качество разливаемого металла и стабильную работу машины [3]. Металл из СРК в ПК поступает открытой струей (в момент наполнения ПК) и закрытой струей через устройства для подвода металла [4].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 1 показаны модель для анализа процесса разливки стали в системе СРК – СМ – ПК и комплект оборудования системы [2].

Сталь поступает в приемную камеру ПК из СРК:

1. Открытой струей (в начальный период разливки при первом открытии шиберного устройства СРК). При этом можно выделить два режима движения стали [2]:

– в момент открытия шиберного затвора, когда одновременно с металлом перемещается песок засыпки из разливочного отверстия СРК. В отверстии в начальный момент разливки находятся части корочки спеченной засыпки и настыли металла, что приводит к вихреобразованию в струе металла и к дефекту типа «веер», создающим аварийную ситуацию в начале разливки;

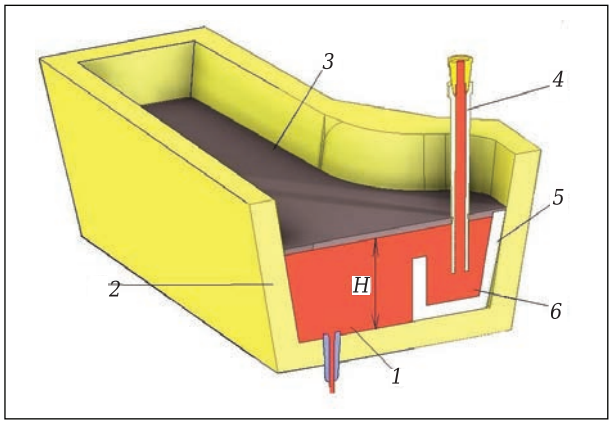

Рис. 1. Модель для анализа процесса разливки стали в системе СРК – защитная труба – ПК: *1* — жидкий металл; *2* — ПК; *3* — покровный шлак; *4* — защитная труба; *5* — металлоприемник; *6* — приемная камера ПК; *H* — уровень металла в ПК

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

– установившийся режим потока открытой струи. В этом случае интенсивно размывается боковая поверхность ПК, защищенная торкретмассой, и основной бетон стенки ковша [5]. Это может привести к нарушению целостности боковой поверхности ПК в приемной камере и аварийной ситуации.

При анализе работы системы СРК – ПК при движении стали из СРК открытой струей наиболее важно определить скорости движения потоков стали на поверхности и по всей структуре объема металла до дна, направление их векторов, линии тока [2]. Этот анализ позволит выбрать рациональные параметры конструкций агрегатов и узлов МНЛЗ [6] и огнеупорных изделий [5, 7] промежуточного ковша, а также дать рекомендации по организации разливки стали на МНЛЗ в начальный период (период запуска машины) [8].

2. Закрытой струей — через специальную защитную трубу, удерживаемую манипулятором [9]. В качестве защиты струи жидкого металла при разливке в номинальных режимах в системе СРК – ПК используют трубы с комплектом пластичных огнеупоров [10] и системой подачи аргона [11]. Трубу перемещают и удерживают специальным манипулятором [9]. Анализ существующей компоновки огнеупорных конструкций системы СРК – СМ – ПК [12] показал, что приемная камера ПК образована огнеупорным блоком в виде металлоприемника [13]. В начальный период разливки металла из СРК развиваются интенсивные течения в районе нижнего борта ПК и, как следствие, размывается поверхность борта ковша в районе его стыка с дном [14]. При анализе работы системы СРК – СМ – ПК [14] при движении стали из СРК закрытой струей наиболее важно определить скорости движения потоков стали на поверхности дна ПК и по всей структуре объема металла, перемещающихся от дна, направление их векторов, линии тока [15]. Данный анализ позволит выбрать рациональные параметры конструкций огнеупорных изделий [16], находящихся на дне приемной камеры ПК, в частности металлоприемников, а также дать рекомендации по организации разливки стали на МНЛЗ [17] через защитную трубу, уточнив при этом параметры и особенности конструкций огнеупорных изделий ПК [18].

Основные размеры и технологические параметры системы СРК – СМ – ПК сортовой МНЛЗ для получения непрерывнолитой заготовки квадратного сечения приведены ниже:

Размер разливаемой непрерывнолитой заготовки, мм	150×150
Высота рабочего уровня стали в ПК, мм	670
Масса стали в ПК, т	27
Масса стали в СРК, т	180
Высота защитной трубы, мм	1300
Высота нижнего отверстия защитной трубы над дном ПК, мм	300
Скорость разливки, м/мин	2,8

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СРК – СМ – ПК ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ

При составлении модели системы СРК – СМ – ПК [2] использовали следующие уравнения: в качестве уравнения, описывающего движение жидкости в области моделирования, принимаем уравнение Навье – Стокса для нестационарных потоков жидкости (жидкого металла) и неразрывности потока.

Геометрию модели определяют по особенности компоновки оборудования системы СРК – СМ – ПК. Масштаб модели составлял 1:1. Соответствующие уравнения имеют вид [19]:

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

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.

Вектор объемных сил с учетом действующего гравитационного поля Земли определяется в выбранной системе координат как

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \cdot g \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения.

Допущение о постоянной плотности металла ρ может быть сделано для системы СРК – СМ – ПК в случаях, когда разница температур жидкой стали в СРК и ПК не слишком велика.

При расчете турбулентных течений металла в системе СРК – СМ – ПК использовали (k – ε)-модель турбулентной вязкости [2]. При этом считается, что на основании гипотезы Буссинеска коэффициент вязкости, входящий в уравнения Навье – Стокса, включает молекулярную вязкость μ и турбулентную вязкость $\mu_т$.

В математической модели процесса разливки металла были сделаны следующие допущения [18]:

– моделируемый процесс протекает в объеме, ограниченном контуром области моделирования;

– объем, в котором происходит исследование (СРК и ПК), изначально заполнен жидкостью;

– жидкость является вязкой и несжимаемой;

– моделируются процессы разливки отрытой и закрытой струями;

– скорость истечения жидкости из СРК в ПК постоянна и задана;

– расход жидкости из ПК в кристаллизаторы равен расходу жидкости из СРК в ПК.

Математическое моделирование осуществляли с учетом начальных и граничных условий [19]. Начальные условия дополняют уравнения (1): температура металла в ПК 1555 °С, скорость вытягивания заготовки 2,8 м/мин, динамическая вязкость стали 0,006 Па·с.

Расчетная сетка

Каждую модель делили на конечные элементы. Количество элементов варьировалось в зависимости от типа разливки стали из СРК [2]. Сеточная математическая модель системы СРК – СМ – ПК показана на рис. 2. Параметры сетки: суммарное количество конечных элементов сетки варьируется от 42875 до 682714 при различных способах подачи струи стали из СРК.

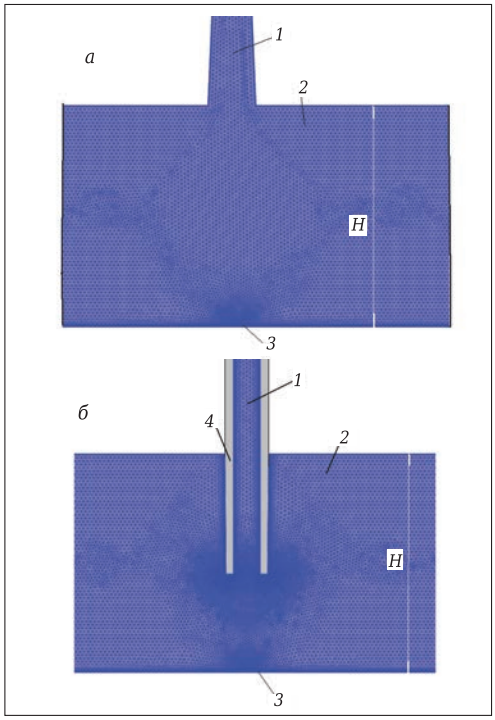

Рис. 2. Сеточные математические модели: *а* — модель подсистемы СМ (открытая струя) – ПК; *б* — модель подсистемы СМ (закрытая струя) – ПК; *1* — вход расчетной области — струя металла из СРК; *2* — жидкий металл в ПК; *3* — дно ПК; *4* — защитная труба; *H* — уровень металла в ПК

Граничные условия

На входе расчетной области системы (вход струи стали из СРК открытой или закрытой струей (через защитную трубу)) задана начальная скорость потока металла для сечения заготовок 150×150 мм: $\vec{u}$ = 1,11 м/с.

На жидкую сталь, находящуюся вблизи твердых поверхностей (стенок защитной трубы и ковша), действует пристеночное прилипание

$$\vec{u} = 0. \quad (3)$$

Принятые граничные условия устанавливают на все внутренние стенки ПК (боковые стенки защитной трубы и ПК и дно ПК) и поверхности защитной трубы.

Вдоль плоскости симметрии, проходящей через ось центрального ручья ПК, задано условие

$$\vec{n}\cdot\vec{u} = 0, \quad (4)$$

где $\vec{n}$ — орт, перпендикулярный к свободной поверхности или плоскости симметрии.

На свободной поверхности — зеркало металла в ПК (см. рис. 1) — также задано условие прилипания $\vec{n}\cdot\vec{u} = 0$.

На выходе расчетной области целесообразно задавать давление жидкости, как правило нулевое: $p = p_0 = 0$ Па.

Результаты моделирования потоков металла в системе

При представлении результатов численного моделирования [2, 20] в качестве параметров течения приняты векторы и поля скоростей в струе металла, перемещающегося из СРК в приемную камеру ПК. На рис. 3 показаны картины векторов потоков металла в поперечном сечении приемной камеры ПК. На рис. 4 представлены поля скоро-

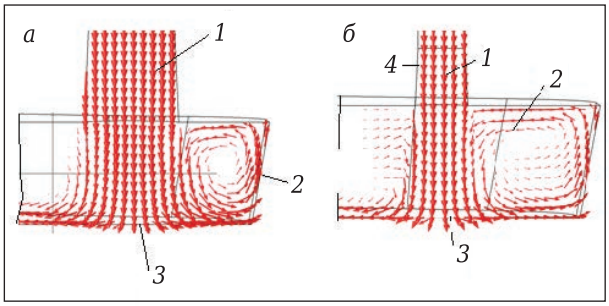

Рис. 3. Векторы потоков металла в поперечном сечении подсистемы СМ – ПК: *а* — подсистема СМ (открытая струя) – ПК; *б* — подсистема СМ (закрытая струя) – ПК; *1* — струя металла из СРК; *2* — жидкий металл в ПК; *3* — дно ПК; *4* — защитная труба

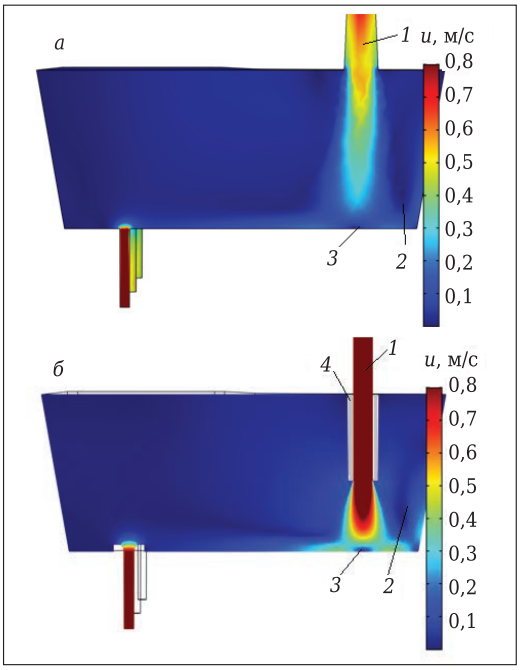

Рис. 4. Поля скоростей потоков стали в поперечном сечении подсистемы СМ – ПК: *а* — подсистема СМ (открытая струя) – ПК; *б* — подсистема СМ (закрытая струя) – ПК; *1* — струя металла из СРК; *2* — жидкий металл в ПК; *3* — дно ПК; *4* — защитная труба

стей потоков металла в поперечном сечении приемной камеры ПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа работы системы СРК – СМ – ПК установлено:

1. Открытая струя металла из СРК воздействует на боковую поверхность ПК. Это приводит к интенсивному размыву поверхности ПК по всей высоте.

2. Струя металла, поступающая через защитную трубу в приемную камеру ПК, создает скоростные (более 0,2 м/с) вертикальные восходящие и интенсивные боковые потоки металла в сторону борта ПК. Это приводит к интенсивному размыву торкрет-массы приемной камеры и увеличению количества неметаллических включений в металле.

3. В приемной камере ПК наблюдаются потоки металла со скоростью больше допустимой (до 0,16 м/с). Это приводит к захвату неметаллических включений на поверхности раздела шлак – сталь приемной камеры и даже оголению зеркала металла.

4. Применение защиты приемной камеры позволит снизить воздействие потоков жидкого металла на боковую поверхность ковша. Это будет способствовать снижению размыва торкрет-массы борта ПК, исключению аварийных ситуаций при разливке стали на МНЛЗ, стабильности процесса непрерывной разливки и повышению качества разливаемой жидкой стали [2].

Библиографический список

1. ***Точилкин, В. В.*** Модернизация промежуточного ковша МНЛЗ для обеспечения повышения качества разливаемой стали / *В. В. Точилкин* // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2007. — № 2. — С. 5–7.

2. ***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.

3. ***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.

4. ***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.

5. ***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.

Kashcheev, I. D. Developing refractory concretes of alumosilicate- 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.

6. ***Сотников, А. Л.*** Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / *А. Л. Сотников* // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2016. — Т. 59, № 5. — С. 334–338. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-334-338.

7. ***Куклев, А. В.*** Оптимизация гидродинамических характеристик промежуточного ковша УНРС с целью удаления экзогенных неметаллических включений / *А. В. Куклев, В. В. Тиняков, 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. Tinyakov, Yu. M. Aizin* [et al.] // Metallurgist. — 2004. — Vol. 48, № 3/4. — P. 153–157. DOI: 10.1023/B:MELL.0000037176.66145.e8.

8. ***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. Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines / *V. N. Gushchin, V. A. Ul'yanov* // Steel in Translation. — 2017. — Vol. 47, № 5. — P. 320–324. DOI: 10.3103/S0967091217050060.

9. ***Точилкин, В. В.*** Электромеханические манипуляторы для транспортирования и ориентации устройств, обеспечивающих защиту струи стали при разливке / *В. В. Точилкин, К. Н. Вдовин* // Известия вузов. Электромеханика. — 2004. — № 2. — С. 111, 112.

10. ***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, O. A. Marochkin, V. V. Tochilkin* [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 318–320. DOI: 10.1007/s11148-014-9716-x.

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.

12. ***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.

13. ***Точилкин, В. В.*** Методика расчета металлоприемника промежуточного ковша МНЛЗ / *В. В. Точилкин* // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2008. — № 6. — С. 44–47.

14. ***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.

15. ***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.

16. ***Числaвлев, В. В.*** Разработка конструкции огнеупорных элементов для рафинирования стали при непрерывной разливке / *В. В. Числaвлев, С. В. Фейлер, Д. В. Бойков, Д. Т. Неунывахина* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 11. — Р. 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. DOI: 10.1007/s11148-018-0153-0.

17. ***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.

18. ***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.

19. ***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.

20. ***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. ■

Получено 12.02.18
© К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, О. А. Филатова, В. И. Умнов, Виктор В. Точилкин, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ