

УДК 669.189

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ И КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ\*

*Шипельников А.А., к.т.н., доцент кафедры «Металлургические технологии»  
Роговский А.Н., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Металлургические технологии»  
Бобылева Н.А., учебный мастер кафедры «Металлургические технологии»  
Скаков С.В., старший преподаватель кафедры «Металлургические технологии»*

Липецкий государственный технический университет  
(398600, Россия, Липецк, ул. Московская, 30)

**Аннотация.** На сегодняшний день системы инженерного анализа процессов благодаря высокой точности расчетов и степени сходимости их результатов с достигаемыми на производственной практике показателями все более широко применяются для исследования непрерывной разливки стали. Такие мощные системы, как ANSYS и ProCast, позволяют успешно решать различные гидро-, газодинамические и тепловые задачи, параллельное протекание которых составляет сущность большинства металлургических процессов. Авторским коллективом кафедры металлургических технологий Липецкого государственного технического университета был выполнен ряд компьютерных экспериментов по моделированию процессов, протекающих в промежуточном ковше и кристаллизаторе слябовой МНЛЗ. Исследованы возможности дальнейшего совершенствования конструкции модификаторов потока (перегородки, турбостопы, пороги) и режима продувки аргоном на параметры движения потоков расплава в рабочем пространстве 50-т промежуточного ковша. Изучено влияние конфигурации донной части погружных стаканов на движение расплава в кристаллизаторе при детерминированном динамическом режиме работы слябовой МНЛЗ. Результатом расчетов явились поля скоростей потоков и температуры расплава по объему промежуточного ковша и кристаллизатора, а также температурные поля в футеровке ковша. Получены выражения, описывающие изменение средней скорости первичного потока, формирующегося на выходе из отверстия погружного стакана в кристаллизаторе. Предварительно полученные результаты позволяют более полно оценить изменения скорости и направления движения потоков расплава, формирования объемов с различной температурой расплава при использовании в промежуточном ковше модификаторов потоков, в том числе при использовании приема «аргоновой завесы» в разливочной камере. Также получены данные по движению потоков расплава и смещению «пятен» размыва твердой «корочки» сляба, наличию градиентных температурных зон в различных областях пространства кристаллизатора, которые могут быть полезны инженерам-практикам, занимающимся выбором погружных стаканов для конкретных условий разливки стали на МНЛЗ. Эффективное управление движением потоков расплава в промежуточном ковше и кристаллизаторе МНЛЗ позволяет существенно повысить качество слябов и проката. Происходит снижение отсортировки металла по дефектам сталеплавильного происхождения, связанным с наличием шлака, неметаллических включений и трещин, образующихся из-за недостаточной толщины «корочки» заготовки на выходе из кристаллизатора.

**Ключевые слова:** непрерывная разливка стали, САЕ-системы, моделирование, промежуточный ковш, кристаллизатор, погружной стакан, модификаторы потока, гидродинамика потоков, расплав, МНЛЗ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-5-374-380

Сегодня в мировой инженерной практике в области металлургических технологий существуют две мощные САЕ-системы инженерного анализа процессов – ANSYS и ProCast, принцип работы решателя которых основан на применении метода конечных элементов. При этом исходную 3D-модель объекта моделирования (сталеразливочный ковш, промежуточный ковш, отливка, кристаллизатор МНЛЗ и др.) строят в среде САД-системы (AutoCAD, Компас 3D и др.). Область применения данных компьютерных систем в сталеплавильном производстве пока ограничивается тремя факторами:

– сложность представления начальных и граничных условий для конкретного вида металлургического агрегата или элемента конструкции, с которым контактирует металлическая, шлаковая или газовая фаза;

– ограниченность базы данных, в том числе отсутствие полноценной русифицированной версии интерфейса программных комплексов;

– отсутствие или весьма высокая стоимость мощных инженерных станций, позволяющих выполнять расчет достаточно быстро и с достаточно высокой степенью сходимости получаемых решений на каждом последующем шаге итераций, ракурсе сравнения расчетных и реально наблюдаемых значений параметров процессов.

Последнее хотя и проистекает из проблемы точности построения сеточной модели объекта, но также косвенно связано с точностью задания условий расчета, соответствующих реалиям производственной практики [1 – 5]. Тем не менее, сегодня в русскоязычном секторе интернет-источников появляются первые зарубежные публикации об успешном применении, в частности

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-48-480203р\_а.

ANSYS, для анализа и последующего совершенствования режима непрерывной разливки стали [6 – 14].

Авторским коллективом кафедры металлургических технологий Липецкого государственного технического университета был выполнен ряд компьютерных экспериментов по моделированию процессов, протекающих в промежуточном ковше и кристаллизаторе слябовой МНЛЗ. Исследования направлены на изучение возможности дальнейшего совершенствования конструкции модификаторов потока (перегородки, турбостопы, пороги) и влияния продувки аргоном на параметры движения потоков расплава в рабочем пространстве 50-т промежуточного ковша, а также влияния конфигурации донной части погружных стаканов на движение расплава в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ. Во многом идентичная реальному промежуточному ковшу МНЛЗ (промежуточные ковши и кристаллизаторы УНРС-4, 6 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»), 3D-модель сборки, построенная в САД-системе «Компас 3D V14», состояла из футеровки промежуточного ковша, защитной трубы диаметром 95 мм, перегородок и турбостопов различной конструкции, порогов и объема расплава. 3D-модель сборки кристаллизатора состояла из собственно модели кристаллизатора высотой 900 мм, моделей погружных стаканов с различной геометрией донной части и объема расплава при вертикальном участке примыкающей к кристаллизатору зоны вторичного охлаждения (ЗВО) в 1800 – 2000 мм.

Моделирование проводилось в лицензионных программах ProCast 2013.5 и ANSYS (расчет продувки расплава аргоном). В качестве аппаратного обеспечения моделирования использовалась инженерная станция на базе IntelCore i7, 3600 Гц, ОЗУ 64 Гб, HDD 1 Тб. Авторами была выбрана из базы данных сталь AISI1008, как наиболее подходящая для описания свойств группы низкоуглеродистых конструкционных марок сталей. Температура расплава на входе в защитную трубу принималась равной 1550 °С, начальная скорость выбиралась из условия обеспечения скорости разливки 1,1 м/мин на двухручьева МНЛЗ при сечении сляба 1320×250 мм. Теплоизолирующий эффект шлака был учтен путем

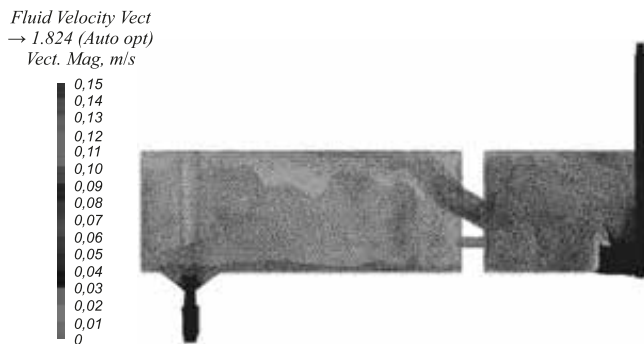


Рис. 1. Поле скоростей потоков металла в объеме промежуточного ковша

Fig. 1. Velocity field of liquid steel in tundish

уменьшения коэффициента теплоотдачи между жидкой сталью и воздухом. За критерий достижения сходимости решений принималось примерное постоянство температуры и скорости с отличием не более, чем на 1 % от среднего значения величины в каждой точке расчетной области модели на каждой последующей итерации. Результатом расчетов явились поля скоростей потоков и температуры расплава по объему промежуточного ковша, а также температурные поля в футеровке ковша (рис. 1, 2).

На рис. 3 представлено сопоставление расчетного поля температуры и скорости потоков расплава в прямоугольном промежуточном ковше с одной полнопрофильной перегородкой при совместном решении тепло-

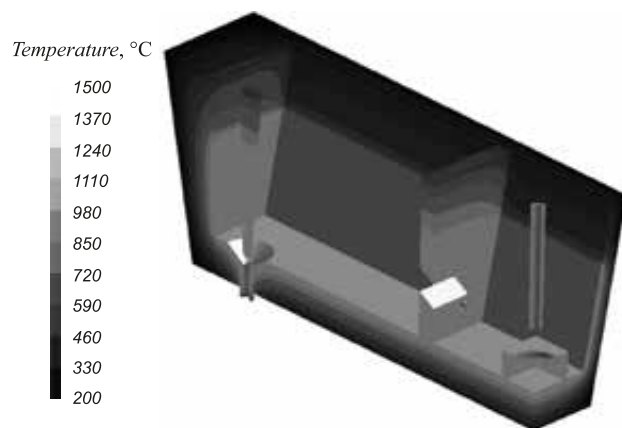


Рис. 2. Температурное поле футеровки промежуточного ковша

Fig. 2. Temperature field of tundish refractory lining

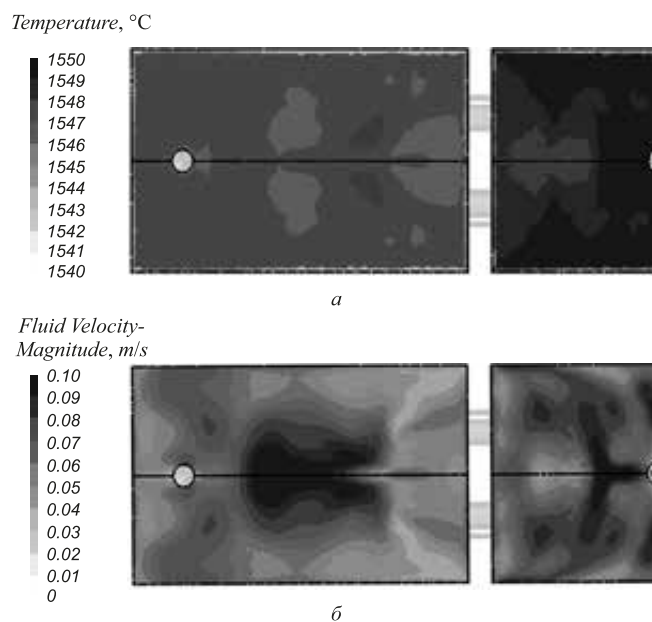


Рис. 3. Сопоставление поля температуры (а) и поля скоростей (б) потоков в подшлаковой зоне 50-т промежуточного ковша с одной полнопрофильной перегородкой

Fig. 3. Comparison of the temperature field (a) and velocity field (b) in the under-slag zone of 50-ton tundish with one full-profile baffle

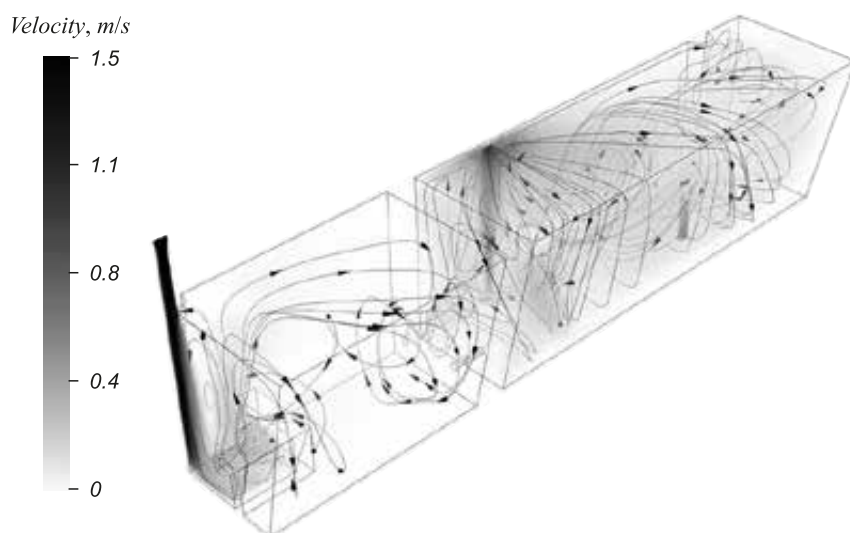


Рис. 4. Скорости потоков в промежуточном ковше (сечение) при продувке аргоном

Fig. 4. Flows velocities in the tundish (intersection) at argon blowing

вой и гидродинамической задачи в детерминированном динамическом режиме (ДДР) работы МНЛЗ [15].

На рис. 4 представлено векторное поле скоростей потоков расплава при использовании донных продувочных устройств в разливочных камерах для подачи аргона в так называемом «пузырьковом» режиме. Основной задачей было перенаправить движение шлаковых включений из вторичных потоков расплава к границе раздела «расплав – шлаковое покрытие» на поверхности промежуточного ковша. Несмотря на множество литературных данных по параметрам обработки расплава в промежуточном ковше аргоном, фундаментальной проблемой, реально сдерживающей применение продувки, является малая прогнозируемость всплытия и удаления включений при варьировании конфигурации продувочных пробок и расхода аргона [16 – 18].

Предварительно полученные результаты позволяют более полно оценить изменения скорости и направления движения потоков расплава, формирования объемов с различной температурой при использовании в рабочем пространстве промежуточного ковша различных модификаторов потоков, в том числе при использовании приема «аргоновой завесы» в разливочной камере.

При анализе процесса заполнения расплавом кристаллизатора гидродинамическая задача заключается в расчете поля скоростей (рис. 5) и траекторий движения формируемых микропотоков расплава и шлаковых частиц. Тепловая задача заключается в расчете поля нарастания твердой корочки вплоть до окончания участка ЗВО МНЛЗ, что ограничивается только аппаратными возможностями и временными факторами проведения моделирования [15, 19]. В процессе применения ProCast для анализа непрерывной разливки стали выявились два ограничения:

– отсутствие отечественного (русскоязычного) опыта применения комплекса для решения одновременно двух задач – гидродинамической и тепловой (фактор solid), соответственно получаемые промежуточные результаты расчетов практически не с чем сравнивать, перед тем как принять решение об опытно-промышленном испытании прототипов новых конструкций стаканов, оснасток и др.;

– ограниченность публичной информации о величине основных тепловых и рабочих параметров непрерыв-

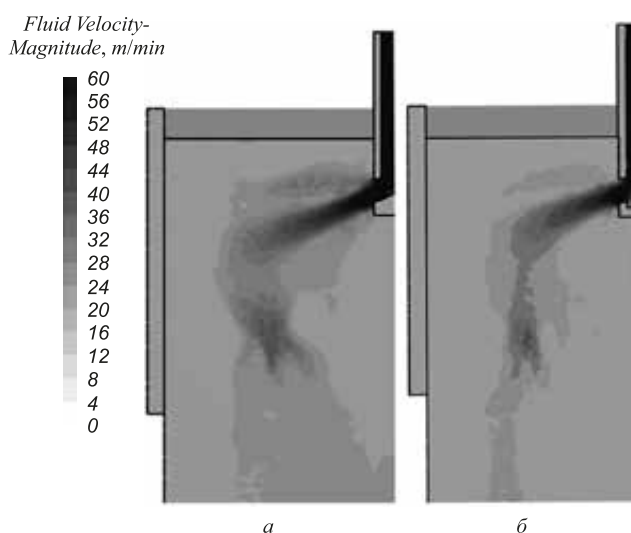


Рис. 5. Поле распределения скоростей потока вдоль широкой грани слитка:

*a* – при конструкции типа «ловушка»; *б* – при конструкции типа «рассекатель потока». Глубина погружения 250 мм, прямоугольные отверстия 70×40 мм под углом 25°, внутренний диаметр 74 мм

Fig. 5. Field of velocities extension along the wide face of the slab: *a* – with “flow divider” type, *b* – with “trap” type. Depth of immersion – 250 mm, rectangular holes 70×40 mm at angle of 25°, internal diameter – 74 mm

ной разливки стали на действующих УНРС: температура воздуха над поверхностью шлака в кристаллизаторе, фактическая толщина и степень черноты шлака, коэффициент теплоотвода с поверхности «корочки», величина воздушного зазора по высоте кристаллизатора и др.

Последнее подталкивает исследователей увязывать результаты промежуточных расчетов с точно фиксируемыми АСУ ТП НРС параметрами, например прогнозом толщины «корочки» на выходе из кристаллизатора, состоянием температурного поля по развертке поверхности кристаллизатора, показаниями датчиков температуры, начиная с датчика № «0» и т.п. [15, 20 – 25]. По результатам расчетов можно предположить, что при использовании «ловушки» и прочих равных условиях для кристаллизатора 250×1100×1400 мм, «пятно» размыва твердой «корочки» слитка находится на уровне около 350 мм по высоте от мениска расплава или 39 % от общей высоты кристаллизатора. В то же время при использовании «рассекателя» место удара струи о стенку смещается в нижнюю часть кристаллизатора – около 440 мм или 49 %. Иными словами, размыв еще весьма тонкой «корочки» сляба может происходить в зоне большей толщины твердой фазы, что должно снизить количество поверхностных трещин заготовки.

Получены уравнения зависимости средней скорости главного потока расплава, который формируется на выходе из отверстия стакана, частично ударяется об узкую грань кристаллизатора в зоне «корочки», формируя два главных потока: восходящий, закручивающийся в районе мениска – «зеркала» и нисходящий, который подвергается дальнейшей диссипации в вертикальной плоскости (рис. 6).

При учете вертикальной части ЗВО МНЛЗ необходимо учитывать влияние типа стакана на характер гидродинамики формируемых потоков на расстояниях до 1500 – 1800 мм от «зеркала» металла. Далее эффект влияния типа конфигурации как бы рассеивается и на-

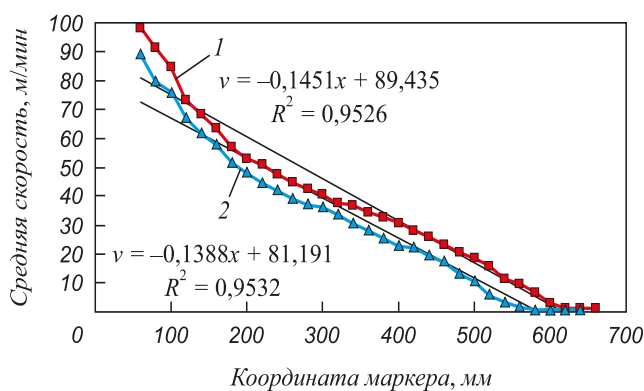


Рис. 6. Графики изменения средней скорости формируемого потока расплава вдоль широкой грани сляба от центра стакана: 1 – ловушка; 2 – рассекатель

Fig. 6. Graphs of changes in average velocity of forming melt flow along the wide slab face from the submerged nozzle center: 1 – ловушка; 2 – рассекатель

чинает преобладать фактор типоразмера слитка и толщины сформированной корочки при заданной скорости разливки [19 – 21].

Ниже представлена система регрессионных уравнений, описывающих изменение средней скорости первичного потока по двум координатам ( $x$  – координата вдоль широкой грани от центра стакана,  $z$  – по высоте кристаллизатора от «зеркала» расплава), которая получена путем статистической обработки данных более 30 маркеров для каждого типа стакана:

– для варианта с ловушкой:

$$v_{cp} = 89,44 - 0,15x, R^2 = 0,9526, \quad (1)$$

$$v_{cp} = 162,94 - 0,48z, R^2 = 0,9526; \quad (2)$$

– для варианта с рассекателем потока:

$$v_{cp} = 82,90 - 0,15x, R^2 = 0,9605, \quad (3)$$

$$v_{cp} = 127,14 - 0,31z, R^2 = 0,9603. \quad (4)$$

Полученные уравнения, в том числе и зависимости, представленные на рис. 6, хорошо согласуются с некоторыми ранее полученными выражениями для условий ДДР [10, 16]. Гипотеза линейной регрессии между скоростью потока и координатой точки-маркера может быть обоснована как частное следствие из известного уравнения Ньютона вязкого течения жидкости. При этом существует допущение, что члены уравнений, стоящие перед предикторами-координатами  $z$  и  $x$ , являются стохастическими выражениями отношения возникающей силы трения направленного потока о слои относительно малоподвижной массы расплава в периферийных зонах верхней части кристаллизатора к произведению вязкости расплава на площадь поверхности их соприкосновения. Полученные уравнения парной линейной регрессии (1) – (4) в рамках проведенных экспериментов следует воспринимать как стохастическую модель влияния координаты точек-маркеров на снижение скорости движения первичных потоков, организованных выходными отверстиями погружного стакана. Уравнения позволяют с высокой степенью достоверной аппроксимации ( $R^2$  более 0,90 при  $p$  менее 0,05) рассчитывать скорость поднимающегося потока на заданном удалении от центрального канала стакана, вплоть до зоны «зеркала металла» в кристаллизаторе. Подобная форма уравнений также обоснована количеством произведенных независимых экспериментов ( $n$  равно 30).

Как известно, роль сформированных в верхней части кристаллизатора вторичных потоков расплава состоит в основном в перемешивании металла и выравнивании температурного поля в наиболее холодной зоне – середине половины широкой грани кристаллизатора от центральной части стакана.

**Выводы.** В зарубежных публикациях, посвященных исследованию проблематики совершенствования технологии непрерывной разливки, имеются сообщения о высокой степени сходимости результатов численного моделирования с наблюдаемыми изменениями качества слэбов. В первую очередь, это касается критериев сталеплавильных дефектов, связанных с наличием шлаковых или неметаллических включений. К перспективным направлениям развития внедрения CAE-систем в инженерную практику технологов сталеплавильного производства можно отнести следующее:

– расчет тепловой и гидродинамической задачи и оптимизация конструкции промежуточных ковшей МНЛЗ, в том числе при варьировании толщины и состава футеровки, конфигурации и количества перегородок, строения разливочных камер, «турбостопов» и различных режимов донной продувки аргоном;

– расчет и оптимизация конфигурации погружных стаканов кристаллизаторов, в том числе при учете конструкции стакана-дозатора промежуточного ковша и толщины твердой «корочки» заготовки на выходе из кристаллизатора;

– расчет и оптимизация конструкции внутреннего пространства сталеразливочных ковшей при варьировании толщины и состава футеровки, количества и расположения донных продувочных блоков для подачи аргона и азота.

К перспективным направлениям также следует отнести возможное решение полной задачи истечения расплава из защитной трубы сталеразливочного ковша на стенде с учетом конфигурации внутреннего пространства промежуточного ковша, стакана-дозатора и погружного стакана, кристаллизатора и начала зоны вторичного охлаждения протяженностью до 2000 мм. Это актуально для условий разливки группы марок низкоуглеродистой и низколегированной стали на подавляющем большинстве слэбовых МНЛЗ вертикального и криволинейного типа, работающих на металлургических комбинатах России.

Полученные выражения для оценки изменения скорости движения потоков, данные по смещению «пятен» размыва «корочки» и наличию градиентных температурных зон в различных зонах пространства кристаллизатора могут быть полезны инженерам-практикам, занимающимся выбором погружных стаканов для конкретных условий производства и типов МНЛЗ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Верзилов А.П. Совершенствование методов моделирования и оптимизация параметров систем дозирования стали в кристаллизаторе слэбовой МНЛЗ // Науч. тр. Донецкого национального технического университета. Серия металлургия. 2011. Вып. 13 (194). С. 40 – 47.
2. Tathagata Bhattacharya, Andrew J. Brown, Christopher M. Muller etc. Development of next-generation impact pads for producing ultraclean steel using mathematical models and plant trials // AISTech 2016 Proceedings. P. 1547 – 1572.

3. Украинская ассоциация сталеплавыльщиков. [Электронный ресурс]. URL: <http://uas.su/books/mnlz/mnlz.php> (дата обращения: 30.10.2015 г.)
4. Винс О., Моснер В., Раффершайд М. и др. Повышение качества разливки путем использования оптимизированного погружного стакана // Черные металлы. 2012. № 8. С. 44 – 50.
5. Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Верзилов А.П. и др. Моделирование процессов поведения жидкой стали в кристаллизаторе слэбовой МНЛЗ // Процессы литья. 2010. № 5. С. 40 – 47
6. Solhed H., Jonsson L., Jönsson P. Modelling of the steel/slag interface in a continuous casting tundish // Steel Research International. 2008. Vol. 79. No. 5. P. 348 – 357.
7. Zhanga T., Luoa Z.G., Liub C.L. etc. A mathematical model considering the interaction of bubbles in continuous casting mold of steel // Powder Technology. 2015. Vol. 273. P. 154 – 164.
8. Liua Z.Q., Qia F.S., Lia B.K., Cheungb S.C.P. Modeling of bubble behaviors and size distribution in a slab continuous casting mold // International Journal of Multiphase Flow. 2016. Vol. 79. P. 190 – 201.
9. Ramirez Lopez P. E., Pooria Nazem Jalali, Björkvall J. etc. Recent developments of a numerical model for continuous casting of steel: model theory, setup and comparison to physical modelling with liquid metal // ISIJ International. 2014. Vol. 54. No. 2. P. 342 – 350.
10. Sen A., Prasad B., Sahu J.K., Tiwari J.N. Designing of sub-entry nozzle for casting defect-free steel // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2015. No. 75. P. 1 – 6.
11. Bielnicki M., Jowza J., Cwudzinski A. Multiphase numerical model of molten steel and slag behavior in the continuous casting mould // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 60. No. 1. P. 257 – 262.
12. Wu D.F., Cheng S.S. Effect of SEN design on surface fluctuation and solidifying shell in slab mold and its optimization // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2008. Vol. 21, No.10. P. 341 – 350.
13. Zhang L., Yang S., Cai K. etc. Investigation of fluid flow and steel cleanliness in the continuous casting strand // Metallurgical and Materials Transactions B. 2007. Vol. 38b. P. 63 – 68.
14. Meijie Z., Huazhi G., Ao H. etc. Numerical simulation and industrial practice of inclusion removal from molten steel by gas bottom-blowing in continuous casting tundish // Journal of Mining and Metallurgy Section B Metallurgy. 2011. Vol. 47. No. 2. P. 137 – 147.
15. Шипельников А.А., Роговский А.Н., Бобылева Н.А., Скаков С.В. Моделирование истечения расплава из погружных стаканов с учетом различной конфигурации донной части и вертикального участка МНЛЗ // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 7. С. 3 – 7.
16. Arcos-Gutierrez H., Barreto J. de J., Garcia-Hernandez S. etc. Mathematical analysis of inclusion removal from liquid steel by gas bubbling in a casting tundish // Journal of Applied Mathematics. 2012. Vol. 2012. P. 1 – 16.
17. Глебов В.П., Кононыхин Г.Н. Опробование погружаемых стаканов опытной конструкции на МНЛЗ в ОАО «НЛМК» // Современная металлургия начала нового тысячелетия: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 17 – 21 декабря 2014 г. Часть 1. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. С. 143 – 146.
18. Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Кравченко А.В. Исследование условий всплывания неметаллических включений при продувке аргоном жидкой ванны промежуточного ковша МНЛЗ. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 1. С. 19 – 25.
19. Шипельников А.А., Роговский А.Н., Бобылева Н.А. и др. Исследование и моделирование процесса непрерывной разливки стали с помощью современных CAE-и-CAD-систем // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2016. № 1. С. 38 – 45.
20. Бобылева Н.А., Шипельников А.А., Роговский А.Н. и др. Влияние конструкции погружного стакана на истечение расплава в процессе непрерывной разливки стали // Современная металлургия нового тысячелетия: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 8 – 11 декабря 2015 г. Часть 2. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2015. С. 208 – 215.

21. Rogotovskii A.N., Volodin I.M., Shipelnikov A.A. и др. Исследование взаимосвязи температуры со скоростью движения расплава на различных сечениях погружных стаканов в слабо-вом кристаллизаторе // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 10. С. 3 – 7.
22. Yokoya S., Takagi S., Ootani S., etc. Swirling flow effect in submerged entry nozzle on bulk flow in high throughput slab continuous casting mold // The Iron and Steel Institute of Japan International. 2001. Vol. 4. No. 10. P. 1208 – 1214.
23. Jowsa J., Bielnicki M., Cwudziński A. Numerical modelling of metal/flux interface in a continuous casting mould // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 60. No. 4. P. 2905 – 2912.
24. Гущин В.Н., Ульянов В.А. Исследование влияния внешних воздействий на развитие двухфазной зоны стальных заготовок // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 1(103). С. 200 – 204.
25. Бажуков Д.О., Тутарова В.Д., Сафонов Д.С. Математическое моделирование теплового состояния непрерывнолитой слабовой заготовки с учетом конструкционных особенностей МНЛЗ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 1. С. 3 – 5.

Поступила в редакцию 14 июня 2017 г.  
После доработки 27 марта 2019 г.  
Принята к публикации 3 апреля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 5, PP. 374–380.

## CURRENT PROBLEMS AND PERSPECTIVES OF COMPUTER SIMULATION OF CONTINUOUS STEEL CASTING

*A.A. Shipel'nikov, A.N. Rogotovskii, N.A. Bobyleva, S.V. Skakov*

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

**Abstract.** Nowadays we can see increase in using of engineering analysis systems in the field of continuous steel casting simulation due to their high accuracy and convergence with industrial experiments results. Such powerful systems as «ANSYS» and «ProCast» allows solving gas-, hydrodynamic and thermal problems, the parallel interaction of which constitutes the essence of most metallurgical processes. Group of authors from the LSTU Chair “Metallurgical technology” have successfully carried out computer experiments in tundish and continuous casting mold processes simulation. The experiments were aimed at first, on studying of further improving in liquid steel flow modifiers (partitions, turbo-stops, thresholds) design, at second, on influence of argon blowing regime on liquid steel flow parameters in the 50-ton tundish workspace, and, at third, on influence of submerged nozzles design on the liquid steel flow in crystallizer, assuming deterministic-dynamic operation mode. The results of calculations are velocity fields of liquid steel flow and flow temperatures fields in tundish and crystallizer, as well as temperature fields in the tundish refractory lining. An equation of primary flow average velocity change on exit from submerged nozzle was also formulated. These preliminary results allow us to assess the velocity changes and direction of the melt flow and formation of volumes with different melt temperatures when using flow modifiers in the ladle, including using of “argon curtain” in the casting chamber. Obtained data on melt flow motion and on location of erosion spots in crystallizing «crust», also on the presence of temperature gradient zones in various regions of crystallizer workspace may be useful to practice engineers engaged in choice of crystallizer submerged nozzle design. Effective control of melt flow in tundish and in crystallizer allows significant improvements in continuous cast slabs and rolled products quality in context of reducing metal products rejection due to defects associated with slag or nonmetallic inclusions presence and due to cracks formed as the result of insufficient thickness of crystallized «crust».

**Keywords:** continuous casting, CAE-system, modeling, tundish, continuous cast mold, submerged nozzle, flow modifier, liquid metal flows, melt, CCM.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-5-374-380

### REFERENCES

1. Smirnov A.N., Kravchenko A.V., Verzilov A.P. Improvement of modeling methods and optimization of the parameters of steel dosage systems in slab caster mold. *Nauchnye trudy Donetskogo*

*Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta, seriya metallurgiya.* 2011, Issue 13 (194), pp. 40–47. (In Russ.)

2. Tathagata Bhattacharya, Andrew J. Brown, Christopher M. Muller et al. Development of next-generation impact pads for producing ultraclean steel using mathematical models and plant trials. *AISTech 2016 Proceedings*, pp. 1547–1572.
3. *Ukrainskaya Assotsiatsiya Staleplavil'shchikov* [Ukrainian Steelmakers Association]. Available at: <http://uas.su/books/mnlz/mnlz.php> (Accessed: 30.10.2015 г.).
4. Wiens O., Mossner V., Rappershaide M etc. Improving casting quality by using an optimized immersion nozzle. *Cherneye metally*, 2012, no. 8, pp. 44–50. (In Russ.)
5. Smirnov A.N., Kravchenko A.V., Verzilov A.P. etc. Modeling of the behavior of molten steel in slab caster mold. *Protsessy lit'ya*. 2010, no. 5, pp. 40–47. (In Russ.)
6. Solhed H., Jonsson L., Jönsson P. Modeling of the steel/slag interface in a continuous casting tundish. *Steel Research International*. 2008, vol. 79, no. 5, pp. 348–357.
7. Zhanga T., Luoa Z.G., Liub C.L., Zhoua H., Zou Z.S. A mathematical model considering the interaction of bubbles in continuous casting mold of steel. *Powder Technology*. 2015, vol. 273, pp.154–164.
8. Liua Z.Q., Qia F.S., Lia B.K., Cheungb S.C.P. Modeling of bubble behaviors and size distribution in a slab continuous casting mold. *International Journal of Multiphase Flow*. 2016, vol. 79, pp. 190–201.
9. Ramirez Lopez P. E., Pooria Nazem Jalali, Björkvall J., Sjöström U., Nilsson Ch. Recent developments of a numerical model for continuous casting of steel: model theory, setup and comparison to physical modelling with liquid metal. *ISIJ International*. 2014, vol. 54, no. 2, pp. 342–350.
10. Sen A., Prasad B., Sahu J.K., Tiwari J.N. Designing of sub-entry nozzle for casting defect-free steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015, vol. 75, no. 1, pp. 1–6.
11. Bielnicki M., Jowsa J., Cwudzinski A. Multiphase numerical model of molten steel and slag behavior in the continuous casting mold. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015, vol. 60, no. 1, pp. 257–262.
12. Wu D.F., Cheng S.S. Effect of SEN design on surface fluctuation and solidifying shell in slab mold and its optimization. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2008, vol. 21, no. 10, pp. 341–350.
13. Zhang L., Yang S., Cai K., etc. Investigation of fluid flow and steel cleanliness in the continuous casting strand. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2007, vol. 38b, pp. 63–68.
14. Meijie Z., Huazhi G., Ao H., Hongxi Z., Chengji D. Numerical simulation and industrial practice of inclusion removal from molten steel by gas bottomblowing in continuous casting tundish. *Journal of Mining and Metallurgy Section B Metallurgy*. 2011, vol. 47, no. 2, pp. 137–147.
15. Shipel'nikov A.A., Rogotovskii A.N., Bobyleva N.A., Skakov S.V. Computational modeling of melt outflow from submerged nozzles

- assuming various configuration of nozzle bottom part and vertical section of CCM. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2016, no. 7, pp. 3–7. (In Russ).
16. Arcos-Gutierrez H., Barreto J. de J., Garcia-Hernandez S., etc. Mathematical analysis of inclusion removal from liquid steel by gas bubbling in a casting tundish. *European Journal of Applied Mathematics*. 2012, vol. 2012, pp. 1–16.
  17. Glebov V.P., Kononykhin G.N. Testing of submerged entry nozzle of experimental design on CCM at JSC “NLMK”. In.: *Sovremennaya metallurgiya nachala novogo tysyacheletiya. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 17-21 dekabrya 2014 g. Chast' 1. Lipetsk* [Modern metallurgy of the beginning of the new millennium. Proceedings of Int. Sci. Conf., December 17-21, 2014, Lipetsk]. Vol. 1. Lipetsk: izd. LSTU, 2014, pp. 143–146. (In Russ).
  18. Smirnov A.N., Efimova V.G., Kravchenko A.V. Study conditions of non-metallic inclusions flotation during argon injection of liquid bath in CCM tundish. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 1, pp. 19–25.
  19. Shipel'nikov A.A., Rogotovskii A.N., Bobyleva N.A. etc. Research and simulation of continuous casting process using modern CAE-i-CAD systems. *Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 1, pp. 38–45. (In Russ).
  20. Bobyleva N.A., Shipel'nikov A.A., Rogotovskii A.N. etc. Influence of submerged nozzle design on melt outflow during steel continuous casting. In.: *Sovremennaya metallurgiya novogo tysyacheletiya. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 8-11 December 2015. Chast' 1. Lipetsk* [Modern metallurgy of the new millennium. Proceedings of Int. Sci. Conf., December 8-11, 2015, Lipetsk]. Lipetsk: izd. LSTU, 2015, vol. 1, pp. 208–215. (In Russ).
  21. Rogotovskii A.N., Volodin I.M., Shipel'nikov A.A. etc. Study of the relation between temperature and melt flow velocity in various sections of submerged nozzles in slab mold. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2016, no. 10, pp. 3–7. (In Russ).
  22. Yokoya S., Takagi S., Ootani S., etc. Swirling flow effect in submerged entry nozzle on bulk flow in high throughput slab continuous casting mold. *The Iron and Steel Institute of Japan International*. 2001, vol. 4, no. 10, pp. 1208–1214.
  23. Jowsa J., Bielnicki M., Cwudziński A. Numerical modeling of metal/flux interface in a continuous casting mold. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015, vol. 60, no. 4, pp. 2905–2912.
  24. Gushchin V.N., Ul'yanov V.A. Effect of external influences on the development of two-phase zone of steel billets. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2014, no. 1(103), pp. 200–204. (In Russ).
  25. Bazhukov D.O., Tutarova V.D., Safonov D.S. Slab continuously cast semis heat state mathematical modeling with account for continuous casting machine construction peculiarities. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 1, pp. 3–5. (In Russ).
- Funding.** The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 17-48-480203r\_a.
- Information about the authors:**
- A.A. Shipel'nikov*, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgical Technology”
- A.N. Rogotovskii*, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Metallurgical Technology”
- N.A. Bobyleva*, Training Master of the Chair “Metallurgical Technology”
- S.V. Skakov*, Senior Lecturer of the Chair “Metallurgical Technology”

Received June 14, 2017

Revised March 27, 2019

Accepted April 3, 2019