

УДК 621.746.588

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ ПРИ ПРОДУВКЕ АРГОНОМ

Д. Н. АНДРИАНОВ, М. Н. НОВИКОВ, А. И. СТОЛЯРОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Качество непрерывнолитых заготовок в значительной мере зависит от характера гидродинамических процессов в кристаллизаторе. Разливка заготовок при высоких скоростях вытяжки слитка приводит к увеличению турбулизации струи расплава, увеличению эффекта несимметричного распределения потоков в кристаллизаторе, вызывает размывание корочки и неравномерную кристаллизацию слитка [1].

Одним из эффективных способов влияния на гидродинамические процессы в кристаллизаторе является продувка стали аргоном, который подается с определенной интенсивностью через канал стопора-моноблока или через стенки стакана-дозатора [2]. Наряду с перемешивающим эффектом продувка аргоном обеспечивает также защиту металла от вторичного окисления при разливке и создает положительные условия для удаления неметаллических включений [3].

Методом численного моделирования было исследовано влияние интенсивности продувки аргоном расплава на гидродинамические характеристики потоков расплава в кристаллизаторе и жидкой лунке слитка.

Для описания структуры турбулентного движения расплава в промковше использовали уравнения неразрывности и Навье-Стокса, которые позволяют вычислить среднее давление  $p$  и компоненты вектора средней скорости  $V = \{v_x, v_y, v_z\}$ .

В настоящей работе использовали двухпараметрическую  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности, которая поддерживает метод пристеночных функций и связывает параметры течения с расстоянием от стенки. Это позволяет избежать очень мелких сеток вблизи стенки.

### Расчетная модель

На рис. 1 показана расчетная модель разливки расплава из прямогочного погружного стакана в кристаллизатор.

Погружной стакан – прямогочный с внутренним диаметром 60 мм и наружным диаметром 110 мм. Глубина погружения стакана в расплав 220 мм при 100 % заполнении кристаллизатора.

Граничные условия задавали при следующих режимах разливки слитка: сечение – 250 × 300 мм, скорость вытяжки слитка – 0,5 и 0,8 м/мин. На входе в погружной стакан задавали массовый расход  $G$  металла, который при скорости вытяжки 0,5 м/мин составил 4,583 кг/с, при 0,8 м/мин – 7,333 кг/с. Свойства жидкой стали и аргона приведены в табл. 1 [2]. Диаметр пузырька приняли равным 0,5 мм. Расход аргона задавали в соответствии с данными табл. 2, вариант 1 соответствует условиям, при которых продувка аргоном не осуществляется. При построении геометриче-

ской модели расчетной области учитывали изменение поперечного сечения жидкой лунки в процессе кристаллизации слитка.

Таблица 1

Свойства жидкой стали и аргона

Сталь		Аргон	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Молекулярная вязкость, Па · с	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Молекулярная вязкость, Па · с
7021	$5,6 \cdot 10^{-3}$	0,559	$7,4 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Расход аргона

Скорость вдува аргона, м/с	Расход аргона, кг/с	
	Вариант 2	Вариант 3
0,1	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
0,2	$3 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$
0,4	$6 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$
0,6	$9 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$

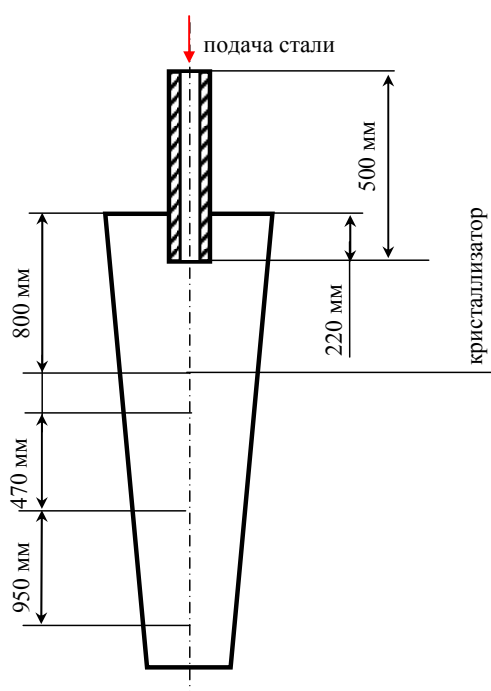


Рис. 1. Расчетная модель

Обсуждение результатов

В результате проведенных расчетов было установлено, что при разливке затопленной струей через прямоточный стакан (по варианту 1) вся масса жидкого металла разделяется на две основные зоны (рис. 2, а, рис. 3, а). Первая, вихревая, зона расположена в верхней части кристаллизатора. Направление потоков в этой зоне преимущественно вверх. Ниже выходного отверстия стакана наблюдается зона со сложной структурой восходяще-нисходящих потоков. Поскольку циркуляция потока в этой зоне препятствует всплыванию неметаллических включений, то такую организацию гидротоков

можно назвать неблагоприятной [4]. Вторая зона характеризуется нисходящими потоками, стабилизирующими струю металла, поступающую в жидкую лунку.

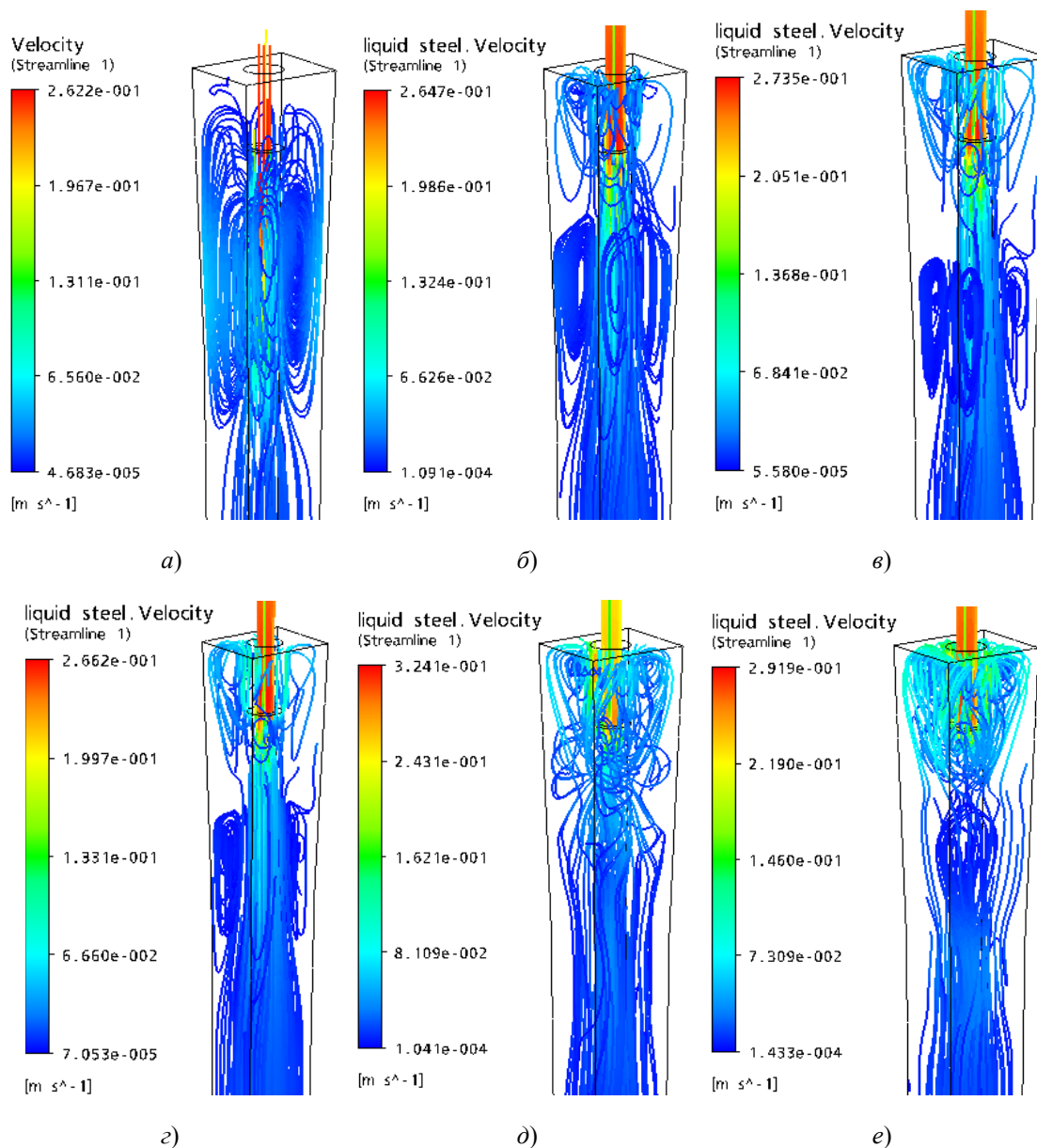


Рис. 2. Конвективные линии тока расплава в жидкой лунке слитка, м/с:  
 а – вариант 1; б – скорость вдува аргона 0,1 м/с (вариант 2); в – 0,1 м/с (вариант 3);  
 г – 0,2 м/с (вариант 2); д – 0,6 м/с (вариант 2); е – 0,6 м/с (вариант 3).  
 Скорость вытяжки слитка 0,5 м/мин

При использовании прямоточных стаканов в горизонтальной плоскости кристаллизатора направление движения потоков происходит от центра к стенкам. С увеличением расхода металла, проходящего через стакан, происходит увеличение протяженности циркуляционной зоны и увеличение скорости циркуляции потока металла. Значительная протяженность этой зоны также будет отрицательно влиять на рост корочки слитка – будет происходить подмывание кристаллизующейся корочки.

Применение продувки аргоном приводит к изменению гидродинамики потоков. На рис. 2, б–е и на рис. 3, б–е показаны конвективные линии тока расплава в жидкой лунке слитка при продувке аргоном при скорости вытяжки слитка 0,5 м/мин и 0,8 м/мин соответственно.

Из рисунков видно, что подача аргона со скоростью 0,1 м/с (вариант 2, 3) существенного влияния на характер движения расплава не оказывает, т. е. сохраняется достаточно интенсивная циркуляция расплава в жидкой лунке (рис. 2, б, рис. 3, б). Выше выходного отверстия стакана наблюдается перестройка потока расплава, на расстоянии 800 мм от мениска (граница кристаллизатора) область циркуляции сохраняется, однако ее протяженность значительно меньше, чем без продувки аргоном (рис. 2, в, рис. 3, в). Продувка со скоростью 0,2 м/с приводит к дальнейшему уменьшению циркуляционной зоны (рис. 2, г, рис. 3, г).

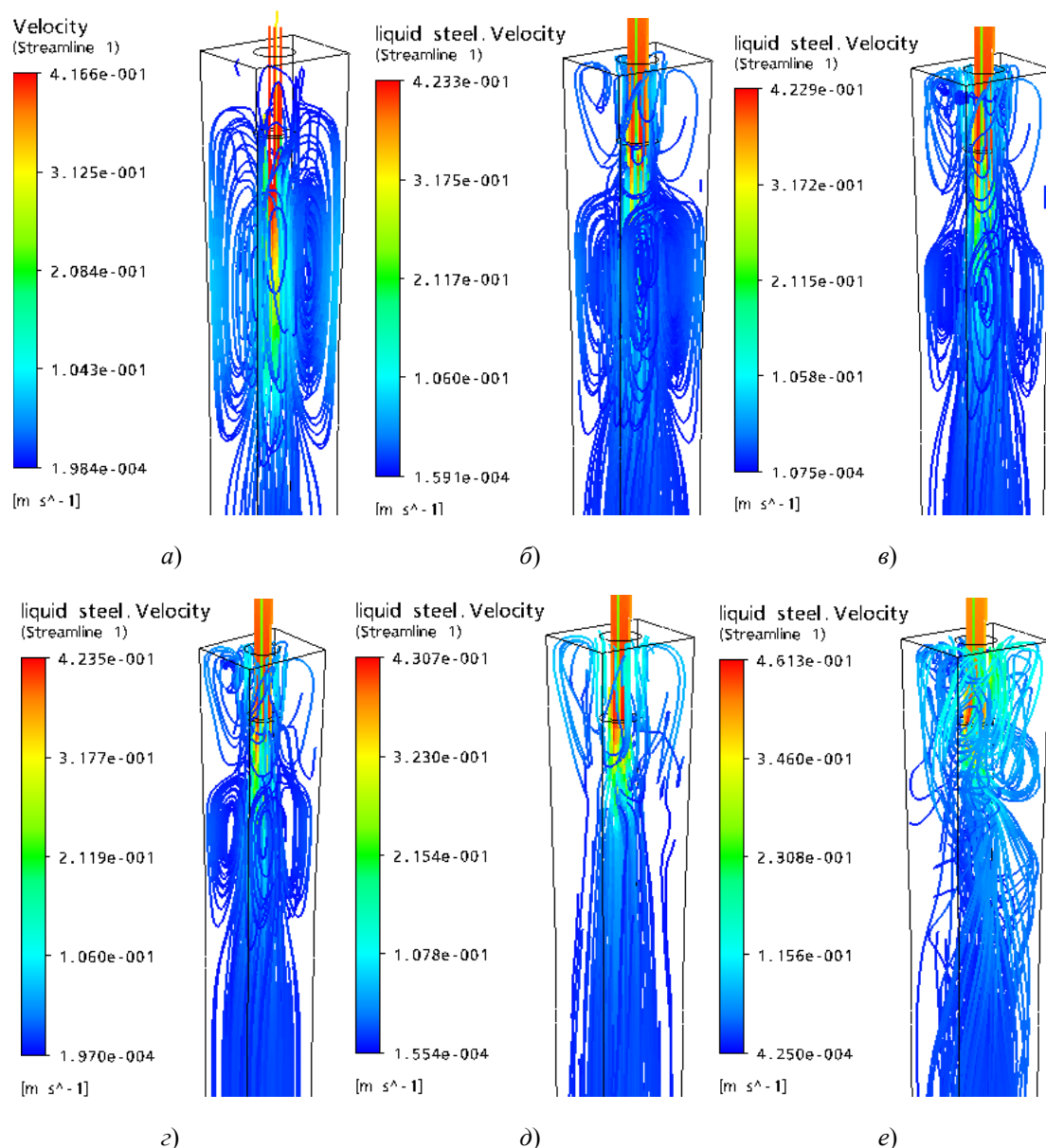


Рис. 3. Конвективные линии тока расплава в жидкой лунке слитка, м/с: а – вариант 1; б – скорость ддува аргона 0,1 м/с (вариант 2); в – 0,1 м/с (вариант 3); г – 0,2 м/с (вариант 2); д – 0,6 м/с (вариант 2); е – 0,6 м/с (вариант 3).  
Скорость вытяжки слитка 0,8 м/мин

Вдув аргона со скоростями 0,4 и 0,6 м/с полностью изменяет гидродинамику потоков. Ниже выходного отверстия циркуляция потока меняется на равномерный характер течения расплава в лунке; выше – создается вихреобразная зона с восходящими потоками вдоль стакана и нисходящими потоками по периметру кристаллиза-

тора (рис. 2, *д, е*, рис. 3, *д, е*). Такая организация потока создает условия всплытия неметаллических включений в защитный шлак.

Зависимость глубины проникновения струи расплава при различных расходах расплава и аргона представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что продувка аргоном по варианту 3 значительно уменьшает глубину проникновения струи. Однако на основании анализа движения потоков расплава наиболее приемлемым является продувка при скорости вытяжки 0,5 м/мин по варианту 3, со скоростью вдува 0,6 м/с; для 0,8 м/мин – по варианту 2, со скоростью вдува 0,6 м/с.

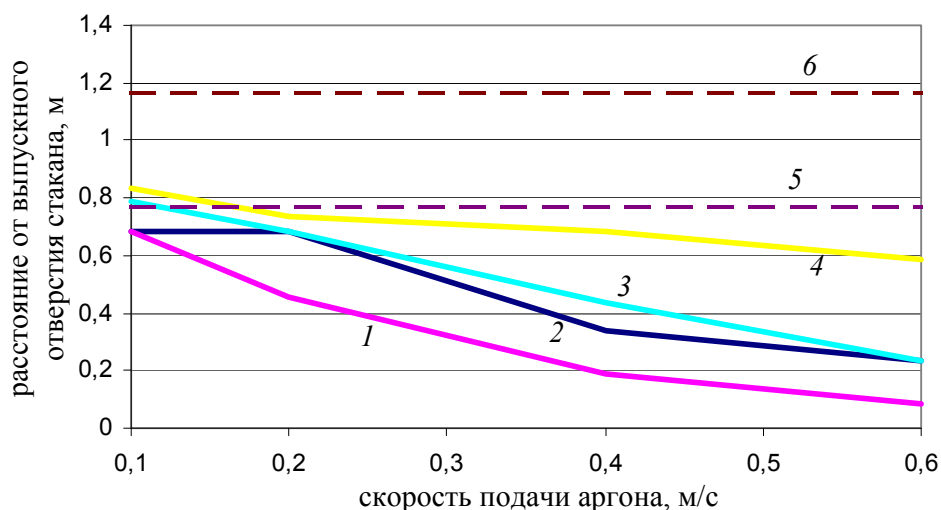


Рис. 4. Глубина проникновения струи расплава в жидкую лунку слитка, м:  
 1 – скорость вдува аргона 0,1 м/с (вариант 2); 2 – 0,6 м/с (вариант 2);  
 3 – 0,1 м/с (вариант 3); 4 – 0,6 м/с (вариант 3); 5, 6 – вариант 1; 1, 2, 5 – скорость вытяжки слитка 0,5 м/мин; 3, 4, 6 – 0,8 м/мин

### Заключение

Для формирования направленных принудительных потоков, способствующих выносу примесей и включений в верхние слои металла, необходимо, чтобы скорость вдуваемого аргона была в 1,5–2 раза выше скорости вытекающего из погружного стакана металла. С увеличением скорости продувки аргоном наблюдается изменение направления движения расплава в жидкой лунке кристаллизующейся заготовки с одновременным уменьшением скорости. Данная картина может свидетельствовать о вероятном снижении количества внутренних дефектов в непрерывнолитой заготовке, таких как осевая пористость и осевая ликвация.

### Литература

1. Совершенствование технологии непрерывной разливки коррозионностойкой стали / Коротков Б. А. [и др.] // *Металлург.* – 1986. – № 2. – С. 28–29.
2. Рафинирование стали инертным газом / К. И. Баканов [и др.] – Москва : *Металлургия*, 1975.
3. Совершенствование защиты стали от вторичного окисления при разливке на МНЛЗ / А. Н. Смирнов [и др.] // *Сталь.* – 1998. – № 11. – С. 19–23.
4. Управление потоками стали в кристаллизаторе МНЛЗ с помощью разливочных стаканов / В.И. Ильин [и др.] // *Изв. высш. уч. заведений. Черная металлургия.* – 2002. – № 9. – С. 19–22.

Получено 23.10.2008 г.