



The calculations of hydrodynamic characteristics of steel in liquid cup of uninterruptedly-casted ingot are examined. The influence of argon blow on the steel circulation in crystallizer is shown.

Д. Н. АНДРИАНОВ, М. Н. НОВИКОВ, А. И. СТОЛЯРОВ, ГГТУ им. П.О. Сухого

УДК 621.746.588

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ ПРИ ПОДАЧЕ СТАЛИ ЧЕРЕЗ ПРЯМОТОЧНЫЙ СТАКАН

Организация потоков расплава в кристаллизаторе существенно влияет на качество непрерывнолитой заготовки, связанное, в частности, с чистотой стали по неметаллическим включениям [1]. Проблема повышения чистоты стали связана с тем, что 70% неметаллических включений образуется уже после внепечной обработки вследствие вторичного окисления струи в процессе разлива. Стремление достичь максимального измельчения кристаллической структуры привело в последние годы к необходимости применения внешних воздействий на затвердевающий металл. Общим для большинства методов внешних воздействий на кристаллизующийся слиток, позволяющих улучшить его качество, является интенсификация тепло- и массообмена в жидком ядре слитка и на фронте кристаллизации, что создает благоприятные условия для расширения центральной зоны равноосных кристаллов и снижения осевой структурной и химической неоднородности [2].

Влияние на гидродинамические процессы в кристаллизаторе в настоящее время оказывают с помощью электромагнитного воздействия на разливаемый металл, применением специальных разливочных стаканов, вдуванием в жидкую ванну кристаллизатора аргона, подаваемого с определенной интенсивностью через канал стопора-моноблока или через стенки стакана-дозатора [2–5].

Методом численного моделирования было исследовано влияние скорости вытяжки слитка на гидродинамические характеристики потоков в жидкой лунке непрерывнолитых заготовок.

Наиболее отработанным и хорошо согласующимся с экспериментальными данными методом является метод, основанный на совместном решении уравнений переноса импульса, кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации. Для описания структуры турбулентного движения расплава в жидкой лунке кристаллизующегося непрерывнолитого слитка использованы концеп-

ция коэффициента турбулентной вязкости и осредненные уравнения неразрывности и Навье–Стокса, которые позволяют вычислить среднее давление  $p$  и компоненты вектора средней скорости  $V = \{v_x, v_y, v_z\}$ .

При таком подходе с вычислительной точки зрения турбулентное движение эквивалентно ламинарному течению с довольно сложной зависимостью для коэффициента вязкости. В результате осредненные по времени уравнения для турбулентного течения имеют тот же вид, что и уравнения для ламинарного течения, с той лишь разницей, что коэффициент вязкости  $\mu$  заменяется на эффективный  $\mu_e$ . В настоящей работе турбулентную вязкость определяли из двухпараметрической  $k-\epsilon$ -модели турбулентности. Определяющие уравнения записывали в трехмерной форме, позволяющей реализовать метод одновременного расчета полей давлений и компонент вектора скорости.

Для численного решения системы уравнений, описывающих турбулентное движение вязкой несжимаемой жидкости, применяли метод конечных элементов.

Основные уравнения, сформулированной математической модели.

Уравнения движения, полученные из уравнения Навье–Стокса [6]:

для жидкой фазы

$$\begin{aligned} \frac{\partial [(v_i)_i f_i]}{\partial x_i} &= 0, \\ \rho_l \frac{\partial [(v_i)_j (v_i)_i f_i]}{\partial x_j} &= -f_i \frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} &\left[ f_i (\mu_t + \mu_l) \left( \frac{\partial (v_i)_i}{\partial x_j} + \frac{\partial (v_i)_j}{\partial x_i} \right) \right] + \\ + f_i \rho_l g_i &+ c_{l,g} [(v_g)_i - (v_l)_i], \end{aligned}$$

для газа

$$\frac{\partial [(v_g)_i f_g]}{\partial x_i} = 0,$$

$$\rho_l \frac{\partial [(v_g)_j (v_g)_i f_g]}{\partial x_j} = -f_g \frac{\partial p_g}{\partial x_i} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ f_g \mu_g \left( \frac{\partial (v_g)_i}{\partial x_j} + \frac{\partial (v_g)_j}{\partial x_i} \right) \right] +$$

$$+ f_g (\rho_l - \rho_g) g_i + c_{l,g} [(v_l)_i - (v_g)_i],$$

где индексы  $i$  и  $j=1,2,3$  соответствуют осям  $x, y, z$ ;  $v_i = \{u, v, w\}$  – компоненты вектора скорости в направлении соответствующих осей; индексы  $l$  и  $g$  соответствуют жидкой фазе и газу;  $f$  – объемное содержание фазы;  $\mu$  – молекулярная вязкость;  $\mu_t$  – турбулентная вязкость;  $g$  – ускорение свободного падения. Учитывая, что плотность газа 3–4-го порядка меньше плотности жидкости и что доля газа незначительна ( $f_g \rho_g \ll f_l \rho_l$ ), то турбулентностью в газовой фазе можно пренебречь. Для жидкой фазы выбрана  $k$ - $\epsilon$ -модель турбулентности, которая требует решения двух дополнительных уравнений движения для определения кинетической энергии  $K$  и диссипации  $\epsilon$  [7]. С учетом объема жидкой фазы

$$\rho_l \frac{\partial (f_l (v_l)_j K)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( f_l \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) +$$

$$+ \mu_l f_l \frac{\partial (v_l)_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial (v_l)_i}{\partial x_j} + \frac{\partial (v_l)_j}{\partial x_i} \right) - \rho_l f_l \epsilon,$$

$$\rho_l \frac{\partial (f_l (v_l)_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( f_l \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) +$$

$$+ C_1 \frac{\epsilon}{K} \mu_l f_l \frac{\partial (v_l)_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial (v_l)_i}{\partial x_j} + \frac{\partial (v_l)_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho_l f_l \frac{\epsilon^2}{K}.$$

Турбулентная вязкость вычисляется по формуле

$$\mu_t = C_\mu \rho_l \frac{K^2}{\epsilon}.$$

Предыдущие уравнения содержат пять констант, которые для получения адекватного поведения течения были приняты стандартными [8]:

$$C_1=1,44, C_2=1,92, C_\mu=0,09, \sigma_k=1,00, \sigma_\epsilon=1,30.$$

Сумма фракций жидкости и газа должна удовлетворять условию

$$f_l + f_g = 1.$$

Для замыкания системы используем  $p_l = p_g = p$ .

Коэффициент межфазного взаимодействия  $c_{l,g}$  зависит от относительных скоростей расплава и пузырька газа:

$$c_{l,g} = \frac{3}{4} \frac{C_D}{D} f_g \rho_l |(v_l)_i - (v_g)_i|,$$

где  $D$  – диаметр пузырька. Значение безразмерного коэффициента подъемной силы пузырька газа  $C_D$  является функцией числа Рейнольдса пузырька  $Re_{bub}$ :

$$Re_{bub} = \frac{\rho_l |v_l - v_g| D}{\mu_l},$$

и может быть определен экспериментально или по следующей формуле (при  $0 \leq Re_{bub} \leq 500 - 1000$ ) [6]:

$$C_D = \frac{24}{Re_{bub}} (1 + 0,15 Re_{bub}^{0,687}).$$

Модель

На рис. 1 показана расчетная модель разливки расплава из погружного стакана в кристаллизатор. Погружной стакан – прямоточный с внутренним диаметром 60 мм и наружным диаметром 110 мм. Глубина погружения стакана в расплав 220 мм при 100%-ном заполнении кристаллизатора.

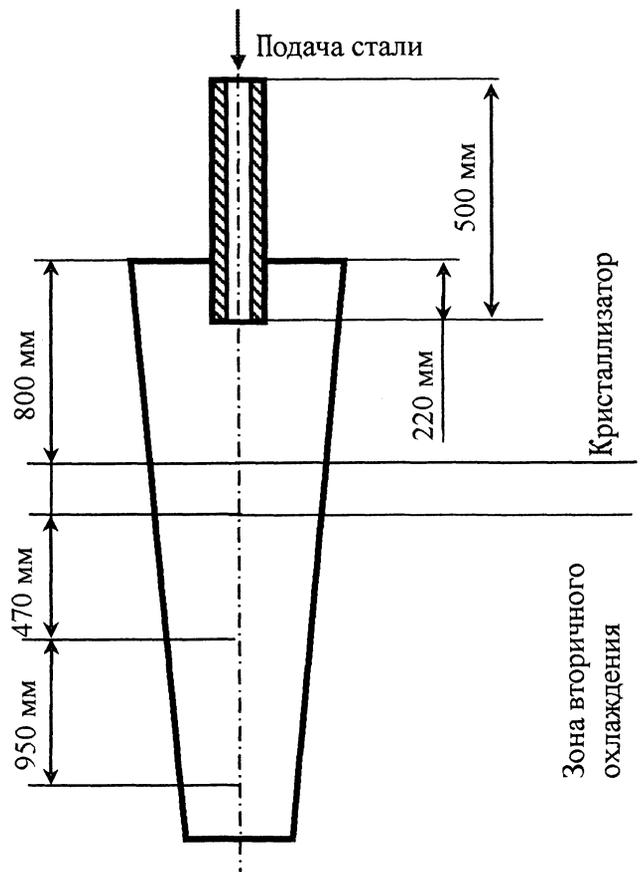


Рис. 1. Расчетная модель

Граничные условия. Скорость на входе в погружной стакан  $v_z$  задавали в соответствии с массовым расходом металла. В табл. 1 приведены данные о массовом расходе стали на ручей. Свой-

ства жидкой стали и аргона приведены в табл. 2 [9]. При построении геометрической модели слитка учитывали изменение поперечного сечения жидкой лунки в процессе кристаллизации заготовки.

Таблица 1. Расход стали

Скорость вытяжки слитка, м/мин	Массовый расход стали на один ручей $G$ , кг/с	
	сечение слитка, мм	
	250x300	300x400
	горячий формат	
0,5	4,583	7,340
0,6	5,500	8,808
0,7	6,417	10,277
0,8	7,333	11,745

Таблица 2. Свойства жидкой стали и аргона

Показатель	Сталь	Аргон
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7021	0,559
Молекулярная вязкость, кг/(м·с)	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент поверхностного натяжения газ–металл, Н/м	0,0096	
Диаметр пузырька, мм	0,5	

На рис. 2, 3 показаны конвективные линии тока и распределение скоростей расплава в жидкой лунке слитка.

Расчеты показали, что при разливке затопленной струей через прямоточный стакан вся масса жидкого металла разделяется на две основные зоны. 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. Протяженность этой зоны до 750–1100 мм. Поскольку циркуляция потока в этой зоне препятствует всплыванию неметаллических включений, то такую организацию гидротоков можно назвать неблагоприятной [3]. Вторая зона характеризуется нисходящими потоками, сопровождаемыми расширяющейся струей металла, поступающего в жидкую лунку (рис. 2).

Разливка прямоточным стаканом под уровень с заглублением 220 мм дает каплевидной формы нисходящий поток, глубина проникновения которого зависит от скорости истечения расплава из металлопровода (рис. 3).

Нижняя граница зоны перестройки гидротоков, перехода к чисто естественной форме конвекции и устойчивого удержания примесных образований, располагается на глубине 800–950 мм; максимальные скорости восходящих гидротоков вдоль стенок кристаллизатора в пределах 0,05–0,11 м/с.

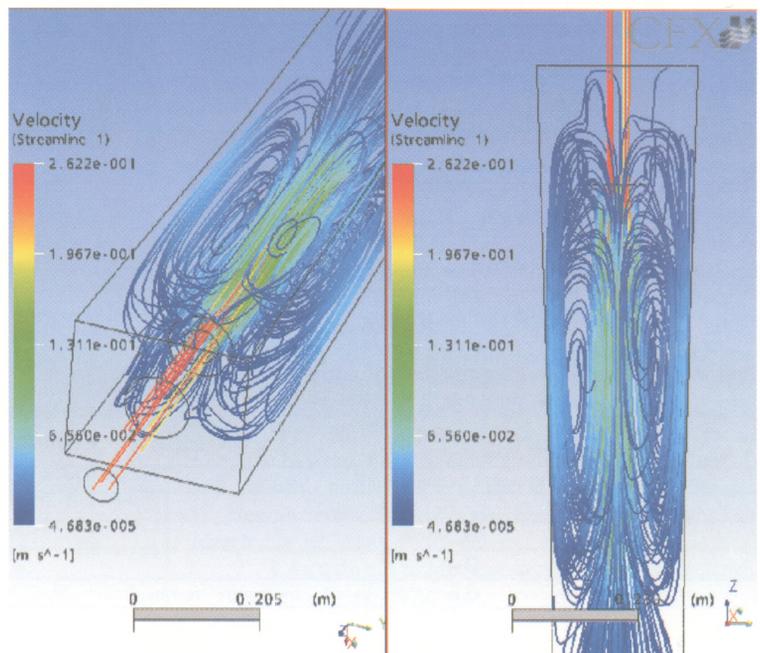


Рис. 2. Конвективные линии тока расплава в жидкой лунке слитка (формат заготовки 250x300 мм, скорость вытяжки слитка 0,5 м/мин)

Из рис. 2, 3 следует, что при использовании прямоточных стаканов в горизонтальной плоскости кристаллизатора направление потоков происходит от центра к стенкам. С увеличением расхода металла, проходящего через стакан, происходит увеличение протяженности циркуляционной зоны и скорости циркуляции потока металла. Значительная протяженность этой зоны также будет отрицательно влиять на рост корочки слитка, возможно, будет происходить подмывание кристаллизующейся корочки.

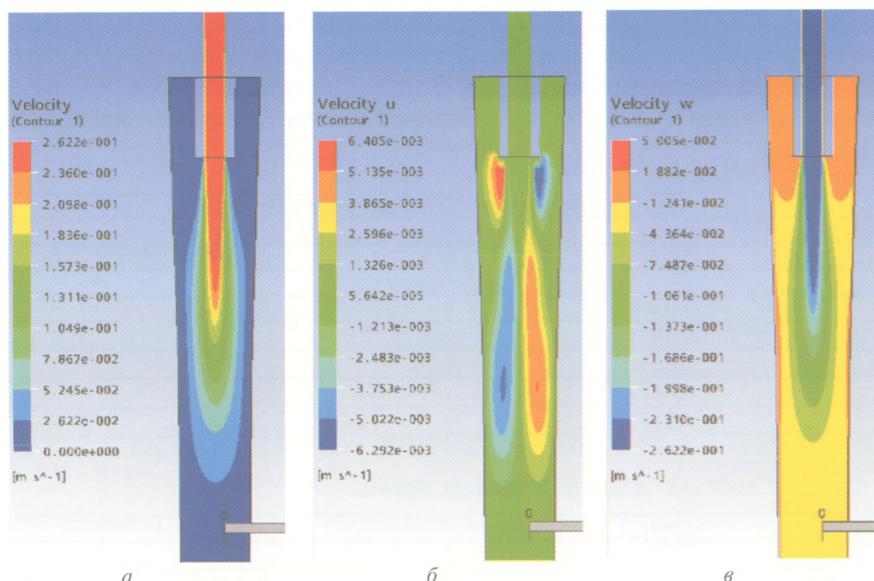


Рис. 3. Распределение полей скоростей жидкого металла в жидкой лунке слитка, м/с: а – суммарные скорости; б – в горизонтальном направлении; в – в вертикальном направлении (формат заготовки 250x300 мм, скорость вытяжки слитка 0,5 м/мин)

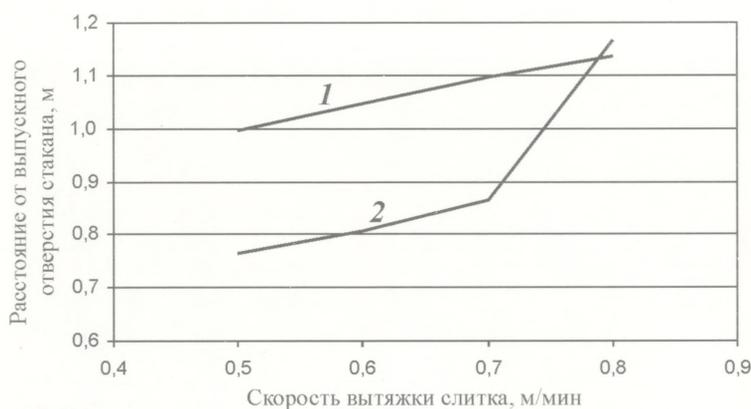


Рис. 4. Глубина проникновения струи расплава в жидкую лунку слитка: 1 – формат заготовки 300x400 мм; 2 – 250x300 мм

Таблица 3. Расход аргона

Скорость подачи, м/с	Расход аргона, кг/м <sup>3</sup>
0,1	1,6•10 <sup>-6</sup>
0,2	3•10 <sup>-6</sup>
0,4	6•10 <sup>-6</sup>
0,6	9•10 <sup>-6</sup>

вает, т.е. сохраняется циркуляция потока в жидкой лунке. При увеличении скорости истечения аргона до 0,2 м/с выше выходного отверстия стакана наблюдается перестройка потоков расплава, на расстоянии 800 мм от мениска (граница кристаллизатора) область циркуляции сохраняется, однако ее протяженность значительно меньше, чем без продувки аргоном. Вдув аргона со скоростью 0,4 и 0,6 м/с полностью изменяет гидродинамику потоков. Ниже циркуляция потока меняется на спокойный характер течения расплава в лунке. Выше выходного отверстия создается вихреобразная зона с восходящими потоками вдоль стакана и нисходящими потоками по периметру кристаллизатора. Такая организация потока создает условия всплытия неметаллических включений в защитный шлак.

Зависимость глубины проникновения струи расплава со скоростью свыше 0,05 м/с при различных расходах расплава приведена на рис. 4.

Уменьшить глубину проникновения струи жидкости в лунку можно, вдувая газ через стопор-моноблок, при этом струя становится более компактной, снижается уровень колебания мениска [4]. В условиях промышленной разливки это приводит к снижению нежелательного воздействия потоков металла на корочку заготовки, уменьшению вторичного окисления стали вследствие устранения оголенных от шлака участков мениска металла в кристаллизаторе, организации оптимальных условий всплытия неметаллических включений в шлак [5].

Влияние расхода аргона на динамику гидротока рассматривали для вариантов, приведенных в табл. 3.

На рис. 5 показаны конвективные линии тока расплава и распределение вертикальной составляющей скорости потока расплава  $v_z$  в кристаллизаторе и жидкой лунке.

Из рисунка видно, что вдув аргона со скоростью 0,1 м/с существенного влияния на характер движения расплава не оказы-

вает, т.е. сохраняется циркуляция потока в жидкой лунке. При увеличении скорости истечения аргона до 0,2 м/с выше выходного отверстия стакана наблюдается перестройка потоков расплава, на расстоянии 800 мм от мениска (граница кристаллизатора) область циркуляции сохраняется, однако ее протяженность значительно меньше, чем без продувки аргоном. Вдув аргона со скоростью 0,4 и 0,6 м/с полностью изменяет гидродинамику потоков. Ниже циркуляция потока меняется на спокойный характер течения расплава в лунке. Выше выходного отверстия создается вихреобразная зона с восходящими потоками вдоль стакана и нисходящими потоками по периметру кристаллизатора. Такая организация потока создает условия всплытия неметаллических включений в защитный шлак.

С увеличением скорости продувки аргоном наблюдается изменение направления движения расплава в жидкой лунке кристаллизующейся заготовки с одновременным уменьшением скорости (рис. 5). Данная картина может свидетельствовать о вероятном снижении количества внутренних дефектов в непрерывнолитой заготовке, таких, как осевая пористость и осевая ликвация.

Для разрушения неблагоприятной зоны циркуляции потока расплава в кристаллизаторе для заготовки форматом 250x300 мм и скорости вытяжки 0,8 м/мин скорость подачи аргона должна быть более 0,4 м/с.

Продувка стали при заданном расходе аргона при литье заготовки форматом 300x400 мм характер потока расплава в кристаллизаторе значительно не изменяет.

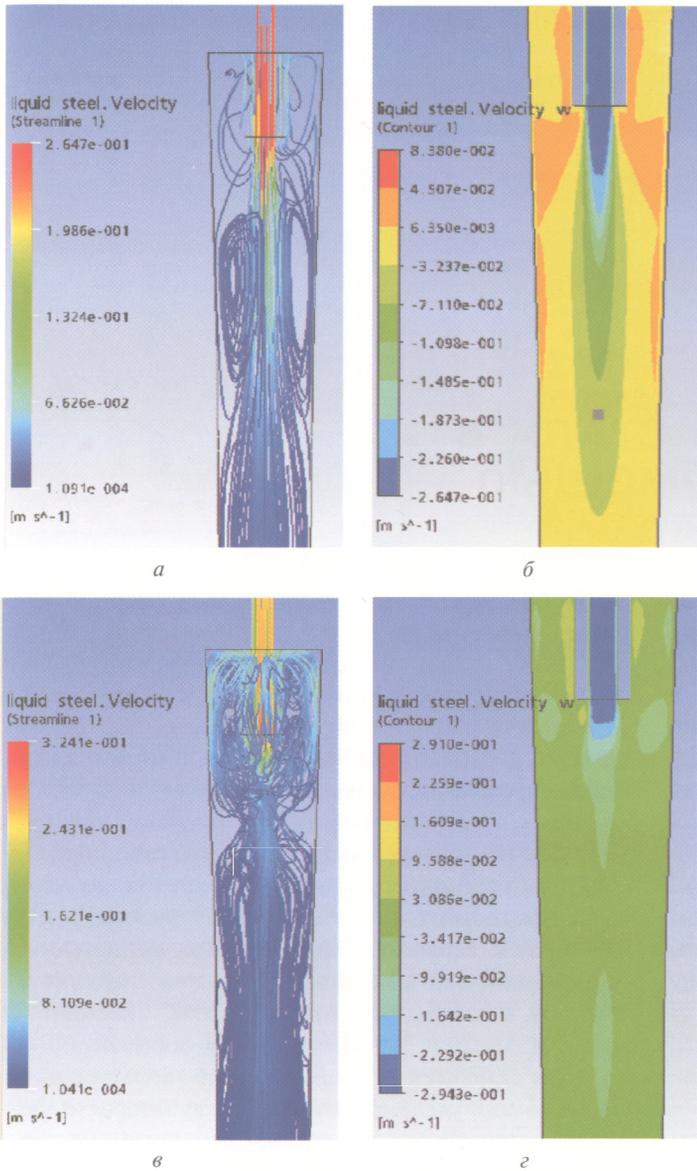


Рис. 5. Конвективные линии тока расплава в кристаллизаторе (а, в) и распределение вертикальной составляющей скорости потока расплава  $v_z$  (б, г) (формат заготовки 250x300 мм, скорость вытяжки 0,5 м/мин; а, в – скорость подачи аргона 0,1 м/с; б, г – 0,6 м/с)

### Выводы

В результате проведенных расчетов установлено, что:

1. В ходе обработки аргоном определены граничные значения скоростей вдува газа

для конкретных условий разлива слитка, при которых удается достигнуть перемешивания всей жидкой ванны с формированием направленных принудительных потоков, способствующих выносу примесей и включений в верхние слои металла. При этом зона металла у поверхности расплава остается практически не вовлекаемой в перемешивание.

2. Так как основным условием ограничения максимальной скорости разлива является повышение вероятности появления осевых дефектов в слитке, то применение аргонной продувки, вероятно, позволит увеличить максимальную скорость разлива без реконструкции существующей МНЛЗ.

### Литература

1. Скворцов А.А., Акименко А.Д., Ульянов В.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок. М.: Metallurgy, 1991.
2. Коротков Б.А., Кукарцев В.М., Молчанов О.Е. и др. Совершенствование технологии непрерывной разлива коррозионностойкой стали // Metallurg, 1986. С. 28–29.
3. Ильин В.И., Федоров Л.К., Коротков Б.А. и др. Управление потоками стали в кристаллизаторе МНЛЗ с помощью разливочных стаканов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2002. №9. С. 19–22.
4. Еронько С.П., Штепан Е.В., Зуб В.В. Физическое моделирование процессов перемешивания металла в кристаллизаторе МНЛЗ // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. 2002. С. 92–93.
5. Либерман А.Л., Дубровин И.В., Коржавин В.А. и др. Снижение содержания неметаллических включений в блюмах // Сталь. 2003. №1. С. 26–26.
6. Bai H., Thomas B.G. Two Phase Flow in Tundish Nozzles During Continuous Casting of Steel // Materials Processing in the Computer Age III, V. Voller and H. Henein, eds., TMS Annual Meeting, Nashville, TN, March 12–16, 2000. P. 85–99.
7. Launder B.E. Mathematical Models of Turbulence. London: Academic Press, 1972.
8. Launder B.E. Numerical computation of turbulent flows, 1974.
9. Баканов К.И., Бармотин И.П., Власов Н.И. и др. Рафинирование стали инертным газом. М.: Metallurgy, 1975.