

на основе алюминия дисперсных порошков соединений титана для обработки железоуглеродистых сплавов.

### Литература

1. **Коротаева, З.А.** Получение ультрадисперсных порошков механическим способом и их применение для модифицирования материалов: автореф. дис. ... канд. хим. наук : 02.00.04 / З.А. Коротаева; КемГУ. – Кемерово, 2008. – 25 с.

2. **Применение** ультрадисперсных порошков для улучшения свойств металлов и сплавов / А.Н. Черепанов [и др.] // *Материаловедение*. – 2000. – № 10. – С. 45–53.

3. **Полубояров, В.А.** Получение ультрамикрорегетерогенных частиц путем механической обработки / В.А. Полубояров, Коротаева З.А., Андрушкова О.В. // *Неорганические материалы*. – 2001. – Т. 37. – № 5. – С. 592–595.

4. **Применение** механически активированных ультрадисперсных керамических порошков для улучшения свойств металлов и сплавов / В.А. Полубояров [и др.] // *Наука производству*. – 2002. – № 2. – С. 2–8.

УДК 669.27:519

**С.В. КОРНЕЕВ**, канд. техн. наук (БНТУ)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВДУВАНИЯ ПОРОШКОВ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫЙ КОВШ

**Введение.** Основными задачами, решаемыми при выборе и эксплуатации инжекционных установок, позволяющими повысить эффективность их работы, являются выбор:

- 1) оптимального соотношения транспортируемого газа и материала;
- 2) оптимального места ввода фурмы или струи инжектируемой газопорошковой смеси;
- 3) оптимальной глубины ввода фурмы;
- 4) оптимальных параметров фурмы и скорости смеси.

Если первая задача может отрабатываться на так называемых холодных моделях, то есть без использования металлургических агрегатов, то остальные задачи требуют длительных исследований и очень трудоемких способов контроля и измерения различных параметров жидкого металла, имеющего высокую температуру, в промышленных или лабораторных условиях. В этой связи замена натуральных испытаний компьютерным моделированием представляется актуальной задачей, призванной выявить основные закономерности процессов с целью их дальнейшего совершенствования применительно к технологиям продувки металла газом и порошками.

Среди ограничительных факторов, влияющих на технико-экономические показатели использования инжекционных установок, можно отметить следующие:

- 1) энергопотребление установки;
- 2) надежность работы (забывание просвета трубопроводов вдуваемым материалом, зарастание сопла);
- 3) выплескивание металла из ковша, увеличение брызгообразования;
- 4) угар вдуваемого материала и степень его усвоения.

Учитывая вышеперечисленные факторы, результаты моделирования могут отражать следующие элементы:

- поле скоростей в области расплава металла;
- время растворения частицы в расплаве;
- время от момента попадания частицы в расплав до ее выноса на поверхность;
- условия разрушения слоя шлака и др.

**Моделирование процесса инъекции** включает следующие этапы.

Циркуляция металла в ванне. В общем случае для описания движения вязкой ньютоновской жидкости применяются уравнения Навье-Стокса. Система состоит из уравнений движения и уравнения неразрывности. В векторном виде для несжимаемой ньютоновской жидкости они записываются следующим образом:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} + \eta \nabla^2 \vec{u} - \nabla p + \vec{f};$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0,$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\vec{u}$  – векторное поле скоростей, м/с;  $\tau$  – время, с;  $\eta$  – динамическая вязкость, Па·с;  $p$  – давление, Па;  $\vec{f}$  – векторное удельное силовое поле, Н/м<sup>3</sup>.

При инъекции различных сред и материалов в жидкий металл происходит его интенсивное перемешивание, поэтому при моделировании течений в жидком металле будем использовать модель, учитывающую турбулентность. Применим известную модель  $k$  –  $\varepsilon$  турбулентности. При этом уравнения гидродинамики запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot u &= 0; \\ \rho(u \cdot \nabla)u &= \nabla \cdot \left[ -pI + (\eta + \eta_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F; \\ \rho u \cdot \nabla k &= \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \eta_T P(u) - \rho \varepsilon; \\ \rho u \cdot \nabla \varepsilon &= \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \eta_T P(u)}{k} - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k}; \\ P(u) &= \nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T); \\ \eta_T &= \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}. \end{aligned}$$

Здесь  $k$  и  $\varepsilon$  – кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации.

Коэффициенты, входящие в систему уравнений, примем согласно Лаундеру и Сполдингу [1] следующими:

$$C_\mu = 0,09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1.$$

Модифицируем уравнения переноса  $k$  и  $\varepsilon$ , включив в уравнения члены  $\eta_T g \nabla \alpha$  и  $\frac{C_{\varepsilon 1} \eta_T g \nabla \alpha}{k}$ , которые представляют эффект плавучести, производимый изменением газосодержания в направлении действия гравитации.

Таким образом, система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\nabla \cdot u = 0;$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[ -pI + (\eta + \eta_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + \rho g \alpha;$$

$$\rho u \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \eta_T P(u) - \rho \varepsilon + \eta_T g \nabla \alpha;$$

$$\rho u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon \eta_T P(u)}{k} - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k} + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon \eta_T g \nabla \alpha}{k}.$$

Граничные условия определяются конструкцией и конфигурацией конкретного агрегата, использующего продувку газами или порошками, и определяются на основе следующих допущений:

- 1) на всех твердых поверхностях скорость потока обращается в нуль;
- 2) отсутствует перенос напряжения сдвига через свободную поверхность;
- 3) в зоне барботажа имеет место однородное распределение газа в жидкости.

Согласно этим допущениям, функция тока обращается в нуль на боковой поверхности ковша (или другой ванны с расплавом) и его днища.

Зону барботажа представим псевдооднофазной с плотностью  $\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l$ , а зону рециркуляции – с плотностью равной плотности жидкости (стали)  $\rho = \rho_l$ .

Газосодержание в зоне барботажа. Экспериментальные данные показывают, что газовая фракция в зоне барботажа имеет разновидность распределения Гаусса по радиусу зоны и соотносится с функцией модифицированного числа Фруда:

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left[ -\ln(2) \left( \frac{r}{b} \right)^2 \right].$$

Для стали значение  $b$  можно определить по следующей формуле [2]:

$$b = 0,28(z + H_0)^{0,583} \left( \frac{Q_1^2}{g} \right)^{0,083},$$

$$\text{где } H_0 = 4,5\sqrt{d_0} \left( \frac{Q_0^2}{g} \right)^{0,1}; \quad Q_1 = Q_g \frac{T_l}{T_g} \frac{\frac{P_a}{\rho_l g}}{\left( \frac{P_a}{\rho_l g} \right) + H - z}.$$

Здесь  $\alpha_0$  – газосодержание по осевой линии зоны барботажа;  $b$  – радиус, на котором  $\alpha = \frac{\alpha_0}{2}$ , м;  $Q_0 = Q_1$  при  $z = 0$ ;  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $\rho_l$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина емкости, м.

Движение частиц вдуваемого материала. Движение частиц материала определяется равновесием двух сил:

– связанной с движением частицы, вдуваемой газом-носителем с кинетической энергией  $E = \frac{m_p u^2}{2}$ ;

– флотационной силы, создающей сопротивление внедрению частицы

$$F = KL\sigma_{ж-г} \cos(\varphi - \alpha) \quad (\text{Н}),$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности;  $L$  – периметр соприкосновения трех фаз, м;  $\varphi$  – угол смачивания твердого тела жидкостью, град;  $\alpha$  – угол, образуемый равнодействующей с вертикалью, град.

При хорошем смачивании жидкостью твердого тела равнодействующая сила  $F$  стремится втянуть частицу вглубь жидкости, при плохом смачивании – вытолкнуть.

Первая сила увеличивается пропорционально кубу линейных размеров частицы, а вторая – первой степени этих размеров.

Если скорость потока жидкости больше или равна скорости всплывания частицы, то последняя увлекается этим потоком. Мак-

симальный размер частиц, которые могут быть захвачены потоком металла, или, с другой стороны, минимальную скорость, при которой поток может увлечь частицу определенного размера, можно оценить с помощью следующего упрощенного неравенства, учитывающего баланс архимедовой силы и сил сопротивления:

$$\frac{4}{3}\pi \cdot g \cdot r_p^3 \cdot (\rho - \rho_p) \leq 6\pi \cdot r_p \cdot \eta \cdot u,$$

где  $r_p$  – радиус частицы, м;  $\rho$ ,  $\rho_p$  – плотность металла и частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – динамическая вязкость металла, Па·с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $u$  – скорость металла, м/с.

$$\text{Отсюда: } u \geq \frac{2}{9} \frac{gr_p^2(\rho - \rho_p)}{\eta}.$$

В представленной модели учет инжекции частиц материала будем осуществлять заданием размера и массы частиц, начальной скорости и начального положения при соприкосновении с расплавом.

Уравнение движения частицы можно записать в виде:

$$m_p \frac{du_i}{dt} = F_{KR} - F_b,$$

где  $F_{KR}$  – сила Кана-Ричардсона [3];  $F_b$  – сила Архимеда;

$m_p = \frac{4}{3}\pi r_p^3 \rho_p$  – масса частицы.

Сила Кана-Ричардсона определяется по формуле:

$$F_{KR} = \pi r_p^2 \rho (u - u_p)^2 \left[ 1,84 \text{Re}_p^{-0,31} + 0,293 \text{Re}_p^{0,06} \right]^{3,45}.$$

Число Рейнольдса для частицы равно

$$\text{Re}_p = \frac{(u - u_p) 2r_p \rho}{\eta}.$$

Выталкивающая сила определяется в соответствии с выражением

$$F_b = \frac{4}{3} \pi r_p^3 (\rho_p - \rho) g.$$

В зависимости от цели решаемой задачи и компьютерных ресурсов представленная модель может быть дополнена уравнениями теплопроводности и диффузии, учитывающих время растворения вдуваемых частиц и усреднение металла по температуре.

Ниже представлен пример моделирования с использованием описанных выше положений. Для моделирования инъекции порошкообразных материалов в расплав металла принимаем типовой сталь-ковш, представленный на рисунке 1. Ковш может иметь различную емкость, достигающую 430 т жидкой стали и оснащается одним или несколькими продувочными узлами.

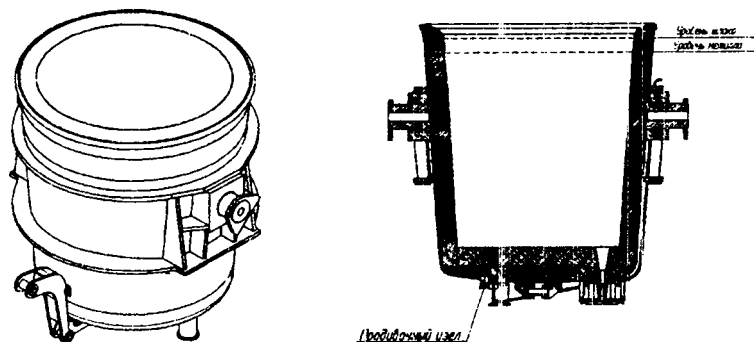


Рисунок 1 – Конструкция сталь-ковша

Для расчета принимаем объем металла  $3,7 \text{ м}^3$  (25 т), глубину от уровня металла равной 2 м, диаметр внутреннего пространства – 1,4 м. При глубине ванны жидкого металла 2 м глубину погружения фурмы принимаем равной 1 м.

Расположение погружной фурмы и продувочного устройства в днище ковша представлено на рисунке 2.

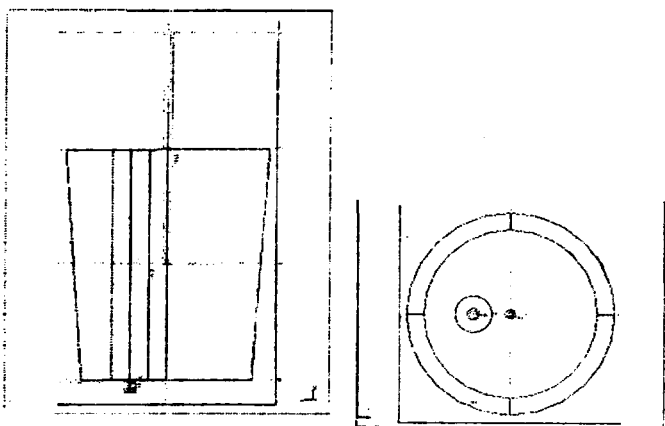


Рисунок 2 – Расположение погружной фурмы и продувочного устройства в днище ковша

Для анализа характера движения частиц вдуваемого материала рассмотрим инъекцию через погружную фурму для двух случаев: при наличии и отсутствии продувки расплава снизу.

Для вдувания в жидкий металл порошкообразного материала используют следующие газы: кислород, сжатый воздух, углекислый газ, азот, аргон и метан. Первые три газа применяют в процессах окисления, дефосфорации и десульфурации, а нейтральные – при раскислении и легировании.

Расход инертного газа составляет обычно  $0,1-3,0 \text{ м}^3$  на 1 т стали.

Продувка с расходом газа до  $0,5 \text{ м}^3/\text{т}$  стали достаточна для усреднения химического состава и температуры металла; сталь, обработанная с интенсивностью до  $1,0 \text{ м}^3/\text{т}$ , имеет пониженное содержание неметаллических включений, для эффективной дегазации необходим расход инертного газа на уровне  $2-3 \text{ м}^3/\text{т}$  металла.

Плотность газов при нормальных условиях приведена в таблице 1.



Таблица 1 – Плотность газов-носителей

Газ	воздух	кислород	углекис- лый газ	азот	аргон	метан
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1,293	1,429	1,977	1,25	1,784	0,717

При принятой емкости ковша (25 т) максимальный объем аргона составит  $3 \cdot 25 = 75 \text{ м}^3$ . При времени обработки 50 мин расход аргона составит  $1,5 \text{ м}^3/\text{мин} = 0,025 \text{ м}^3/\text{с} = 25 \text{ л/с}$ .

Вдуваемые в жидкую сталь материалы имеют значительный разброс по диапазону плотностей. В качестве порошкообразных материалов применяют как чистые металлы (кальций, магний, алюминий), так и другие материалы и соединения (кремний, ферросилиций (ФС75 и др.), известь (СаО), карбид кальция (СаС<sub>2</sub>), силикокальций (SiCa), РЗМ-содержащие лигатуры (ФС30РЗМ30 и др.), карбонаты (СаСО<sub>3</sub>) и др.).

Плотность материалов представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Плотность материалов, используемых при вдувании в жидкую сталь

Материал	Ca	Mg	Al	Si	CaO	CaC <sub>2</sub>	SiCa	ФС45	ФС75
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,542	1,737	2,698	2,33	3,37	2,22	2,5–3	5	3,5

Ограничимся рассмотрением инжекционных технологий в сталеплавильном производстве и примем для дальнейших расчетов плотность жидкой стали равной  $7000 \text{ кг/м}^3$ .

Как было показано выше, зону барботажа можно представить псевдоодноразной с плотностью  $\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l$ , а зону рециркуляции – с плотностью равной плотности жидкости (стали)  $\rho = \rho_l$ .

Газовая фракция в зоне барботажа имеет разновидность распределения Гаусса по радиусу зоны. Зависимость плотности среды в зоне продувки от относительного радиуса зоны на различной глубине ковша представлена на рисунке 3. Обозначения величин соответствуют принятым в сформулированной модели. Значение координаты  $z = 0$  соответствует глубине, на которой находится продувочное устройство. Величина  $H$  соответствует высоте слоя жидкости над продувочным устройством (при нахождении продувочной пробки на дне ковша  $H$  – это максимальная глубина от поверхности расплава до дна ковша).

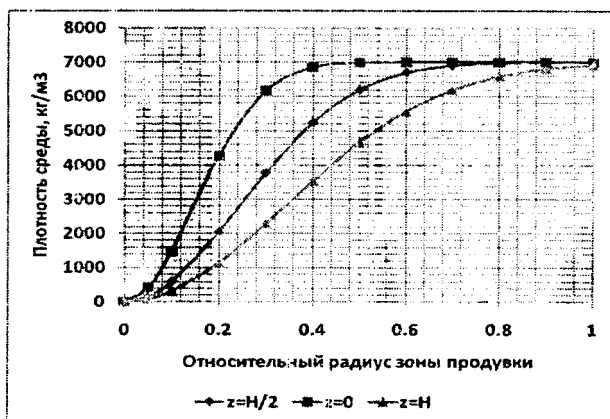


Рисунок 3 – Зависимость плотности среды от радиуса зоны продувки

На рисунке 3 представлено распределение плотности газожидкостной среды на различном расстоянии в относительных единицах от оси продувочного устройства. Абсолютные значения величин радиуса зоны продувки на различной глубине представлены на рисунке 4. Радиус зоны увеличивается при движении к поверхности расплава металла и также увеличивается при повышении расхода газа.

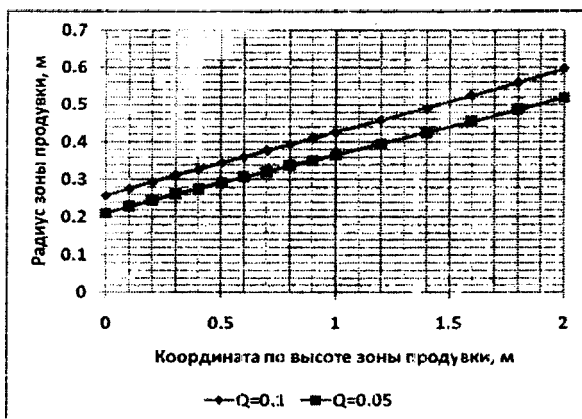


Рисунок 4 – Зависимость радиуса зоны продувки от координаты по высоте зоны продувки (то есть на различной глубине ковша)

Иллюстрация формы зоны продувки представлена на рисунке 5.

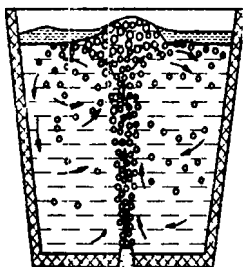


Рисунок 5 – Иллюстрация формы зоны продувки

Так как частицы вдуваемых материалов имеют различную плотность, рассмотрено влияние радиуса частицы на скорость всплывания частиц в неподвижном расплаве в зависимости от их природы и радиуса (рисунок 6). Необходимо отметить, что частицы из приведенных материалов ( $\text{Ca}$ ,  $\text{CaC}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FC45}$ ) не могут строго подчиняться этой зависимости, так как имеют различные температуры плавления и коэффициенты теплопроводности, а следовательно и различное время расплавления или растворения в расплаве. То есть для практических расчетов модель следует дополнить зависимостью радиуса частиц от времени.

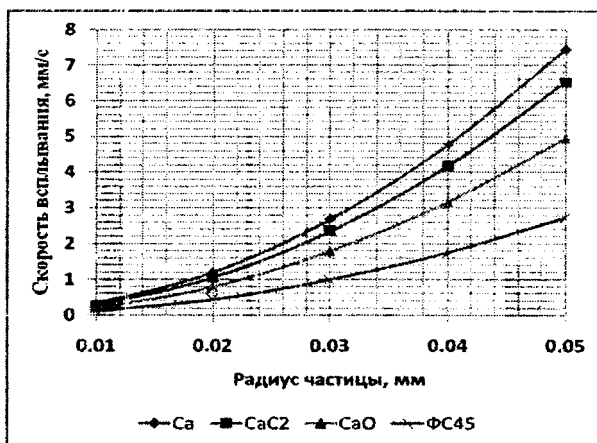


Рисунок 6 – Зависимость скорости всплывания частиц различных плотностей в зависимости от их радиуса

Для анализа характера движения частиц инжестируемого материала проведено моделирование движения частиц материала и расплава металла в ковше. Отметим, что для упрощения рассматриваемого случая зону барботажа задаем только для области продувки, а в области вдувания частиц задаем только начальную скорость частиц, а жидкость считаем однофазной.

На рисунке 7 представлен вариант расчета движения частиц при вдувании их через погружную фурму без продувки металла снизу. При этом в расплаве образуются циркуляционные зоны, в которые попадает большая часть вдуваемых частиц.

Характер движения частиц помимо поля скоростей движения расплава определяется также начальной скоростью, размером и плотностью частиц.

При использовании продувки снизу совместно с продувкой и инъекцией материала через погружную фурму максимальные скорости наблюдаются на оси зон продувки.

Характер движения инжестируемых через погружную фурму частиц при наличии продувки снизу представлен на рисунке 8. Попадание частиц в зону продувки способствует их быстрому перемещению и выносу к поверхности расплава, что может иметь как положительный эффект (в случае использования активных

раскислителей с удалением продуктов раскисления), так и отрицательный (в случае использования ценных легирующих компонентов).

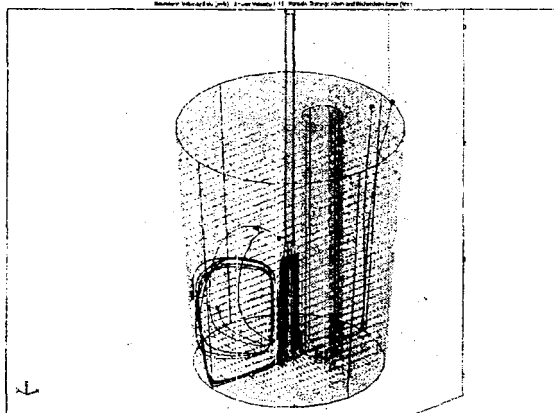


Рисунок 7 – Характер движения инжектируемых через погружную фурму частиц при отсутствии продувки снизу

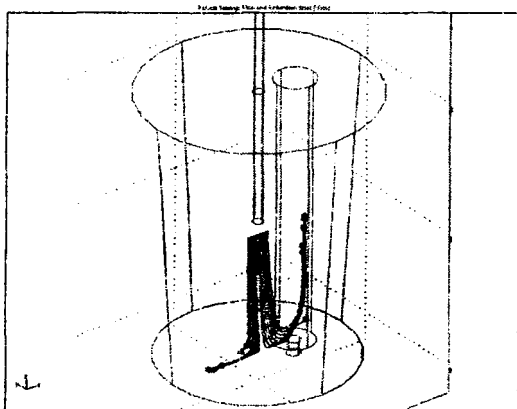


Рисунок 8 – Характер движения инжектируемых через погружную фурму частиц при наличии продувки снизу

## **Заключение**

Представленная модель и результаты расчетов процессов инжекции порошкообразных материалов показывают, что рассмотренные подходы позволяют исследовать характер движения частиц вдуваемого материала и определить наиболее эффективные способы ввода материалов в расплав.

## **Литература**

- 1. Launder, B.E.** The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder and D.B. Spalding // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1974. – V. 3. – P. 269–289.
- 2. Zhang, Z.** Prediction of fluid flow in gas stirred liquid Wood's metal / Z. Zhang, Y. Xie and F. Outers // *Memories et Etudes Scientifiques / Revue de Metallurgie*, 1991. – P. 145–158.
- 3. Coulson, J.M.** Particle Technology and Separation Processes / J.M. Coulson and J.F. Richardson // *Chemical Engineering*. – UK: Butterworth-Heinemann, 2002. – Vol. 2. – 788 p.

УДК 621.74

**С.В. КОРНЕЕВ**, канд. техн. наук,  
**В.А. РОЗУМ**, канд. техн. наук (БНТУ)

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СТАЛИ**

**Введение.** Известно, что себестоимость стали определяется затратами на сырье и на передел. При плавке легированной стали большая доля расходов связана со стоимостью шихты. Очевидно, что чем выше степень легированности шихты и чем дороже ферросплавы и металлы, которыми легируется сталь, тем большая доля расходов относится к шихтовым материалам. Например, шарикоподшипниковая сталь менее легирована, чем нержавеющая или жаропрочная хромоникелевая. Кроме того, шарикоподшипниковая сталь легируется углеродистым феррохромом, а многие марки легируются ферросилицием и другими относительно дешевыми ферро-