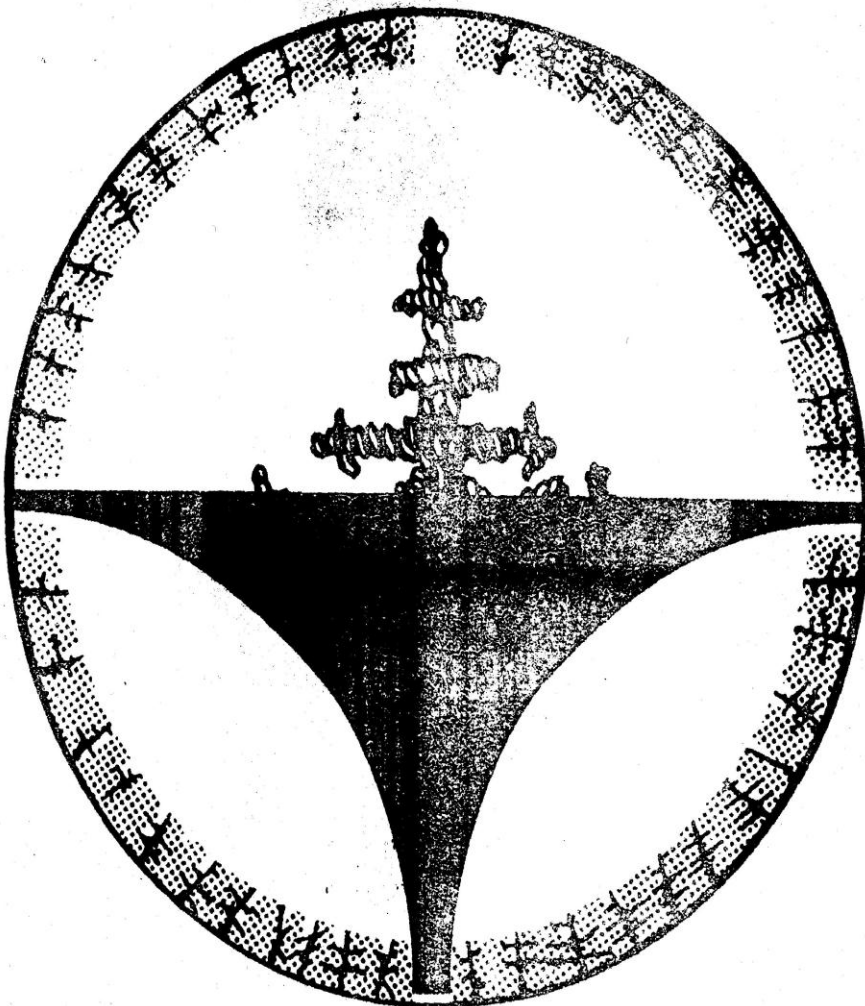


ISSN 0235-5884

ПРОЦЕССЫ ЛИТВА 5 • 2008



УДК 621.745.66:538.4

А. Н. Смирнов, Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш, В. М. Сафонов,
К. Е. Писмарев*

Донецкий национальный технический университет МОН Украины, Донецк
*ОАО «Алчевский металлургический комбинат», Алчевск

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ ПРОДУВКЕ МЕТАЛЛА В КОВШЕ
ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ. Сообщение 2***

Рассмотрены результаты физического моделирования процессов перемешивания жидкости в ковше при продувке через один или два продувочных узла. На основании экспериментальных данных предложены оригинальные формулы, позволяющие рассчитывать время перемешивания для всего диапазона параметров, используемых на практике и требующих оптимизации.

Розглянуто результати фізичного моделювання процесів перемішування рідини в ковші при продувці через один або два продувочних вузли. На підставі експериментальних даних запропоновані оригінальні формули, які дозволяють розраховувати тривалість перемішування для всього діапазону параметрів, що використовуються на практиці та потребують оптимізації.

Results of physical modeling mixing processes in the ladle for injection with one or two purging plugs had been presented. On basis of experimental dates original formulas had been obtained. These formulas gave possibilities to calculate mixing time for whole practical diapason parameters which can be optimizing.

В сообщении 1 обсуждены современные методы, применяемые для оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Показано, что известные из литературных источников выражения и зависимости не учитывают ряд весьма важных с точки зрения металлургической технологии параметров (например, расположение продувочного узла в днище ковша, количество продувочных узлов, уровень жидкости в ковше и пр.), что практически исключает их применение для конкретных металлургических ковшей.

Целью настоящей работы было получение оригинальных зависимостей для оценки эффективности перемешивания расплава на установке ковш-печь с помощью физического моделирования и последующей математической обработки полученных количественных результатов. В качестве показателя эффективности перемешивания жидкости в ковше было использовано время гомогенизации. Авторы разработали оригинальную методику исследований на физической модели, которая позволяет получить соответствующие эмпирические зависимости. Такие зависимости позволяют в значительной степени упростить процесс оптимизации режимов продувки металла в сталеразливочном ковше с учетом конкретных геометрических параметров ковша и расположения продувочных узлов.

В настоящей статье выполнена математическая обработка результатов исследования с использованием теории планирования эксперимента и методов регрессионного анализа [1, 2] с учетом того факта, что на время и интенсивность перемешивания жидкости в ковше влияет достаточно большое количество независимых факторов и их системное проявление весьма сложно проследить теоретически для более точной количественной оценки результатов физического моделирования.

На первом этапе исследований изучали процесс перемешивания жидкости в ковше при вдувании газа через один продувочный узел в зависимости от расхода газа и поло-

* Сообщение 1 опубликовано в журнале «Процессы литья», - 2008. - № 4. - С. 41-48.

жения
до 1,0
градн
где R
ванны
графи
зичес

Фаи

Га
О
К
О
пр
р

На
жение
полск
смец
вероя
торый
как бы
участ
ковш
в осе
4-5 ра
от рас
для в
шей п
На
перем
было
на не
ковш
дуюц

где С
моде
ния п
В
мето,
регр
усл

П
ческ
расс
В кач

ISSN

Получение и обработка расплавов

жения продувочного узла. В настоящих экспериментах расход газа (Q) изменяли от 0,2 до 1,0 л/мин, а положение продувочного узла (r_n), определяемое как расстояние от центра днища модели до центра продувочного отверстия, варьировали в диапазоне (0-0,95) R , где R - радиус модели ковша. Кроме того, в ходе экспериментов изменяли глубину ванны (H). В таблице приведены уровни варьирования факторов. На рис. 1 приведены графики изменения времени гомогенизации жидкости, построенные по результатам физического моделирования.

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Единица измерения	Обозначение	Шаг варьирования	Уровни варьирования		
				-1	0	+1
Расход газа Q	л/мин	X_1	0,4	0,2	0,6	1,0
Отношение глубины ванны H к диаметру модели ковша D	-	X_2	0,25	1,0	1,25	1,5
Относительное положение продувочного устройства $\rho = r_n/R$	-	X_3	0,475	0	0,475	0,95

На основании полученных данных (рис. 1) установили, что рациональное расположение продувочного узла r_n может быть определено как 0,4-0,6 радиуса ковша. При этом положение продувочного узла, обеспечивающее минимальное время гомогенизации, смещается ближе к центру при увеличении глубины ванны металла в ковше. Этот факт, вероятно, объясняется характером движения восходящего газожидкостного потока, который при несимметричном расположении и значительном смещении продувочного узла как бы «отжимается» к стенке. Соответственно, осевая зона жидкости практически не участвует в интенсивном перемешивании. Смещение продувочного узла к оси модели ковша способствует вовлечению в перемешивание объемов жидкости, расположенных в осевых зонах объема сосуда. Также следует отметить, что повышение расхода газа в 4-5 раз способствует уменьшению времени гомогенизации в 1,5-2,0 раза в зависимости от расположения продувочного отверстия. Установили, что эта тенденция соблюдается для всего диапазона глубины ванны, при этом увеличение параметра H требует большей продолжительности процесса гомогенизации.

На основании анализа структур построения известных формул для расчета времени перемешивания (см. табл. 2, сообщение 1) при продувке через один продувочный узел было установлено, что зависимость между временем перемешивания τ_m и влияющими на него факторами (расход газа Q , соотношение глубины ванны H и диаметра модели ковша D , относительное положение пробки ρ) может быть представлена в виде следующего выражения:

$$\tau_m = C_1 \cdot Q^\alpha \cdot (H/D)^\beta \cdot (1 - \rho + \rho^2)^\gamma, \quad (1)$$

где C_1 - константа уравнения; Q - расход вдуваемого газа, л/мин; H - глубина ванны модели ковша, м; D - диаметр модели ковша, м; ρ - относительный радиус расположения продувочного отверстия, $\rho = r_n/R$; α , β , γ - показатели степени.

Вычисление константы C_1 и показателей степени α , β , γ уравнения (1) выполнено методом наименьших квадратов [2], что позволило получить следующее уравнение регрессии, отражающее зависимость времени гомогенизации от влияющих факторов в условиях физической модели при продувке через один продувочный узел:

$$\tau_m = 53,5 \cdot Q^{-0,313} \cdot (H/D)^{1,016} \cdot (1 - \rho + \rho^2)^{1,129} \quad (2)$$

Полученная зависимость адекватно описывает ранее рассмотренные данные физического моделирования (рис. 1). Коэффициент корреляции между экспериментальными и рассчитанными по выражению (2) значениями времени гомогенизации составляет $r=93,7\%$. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены графики поверхностей, построенные с помо-

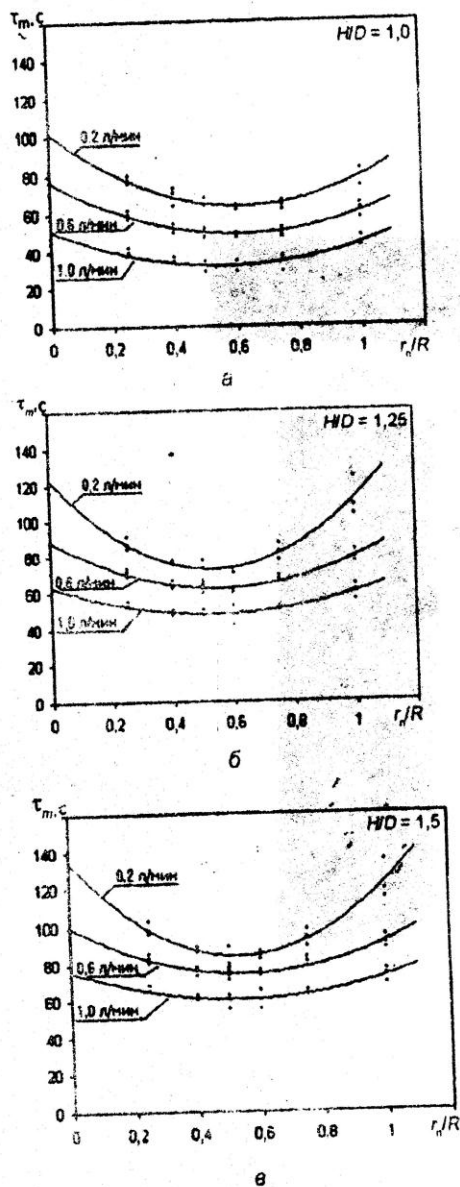


Рис. 1. Изменение времени гомогенизации τ_m от расположения продувочного устройства r_n при различных расходах газа Q и высотах жидкости H

стью выражения (2) для разных значений расхода газа. В целом приведенные графики зависимостей хорошо коррелируются с ранее сделанными выводами, а именно:

- при увеличении расхода газа время перемешивания уменьшается;
- при повышении глубины ванны жидкости время перемешивания увеличивается;
- минимальное время перемешивания соответствует расположению продувочного

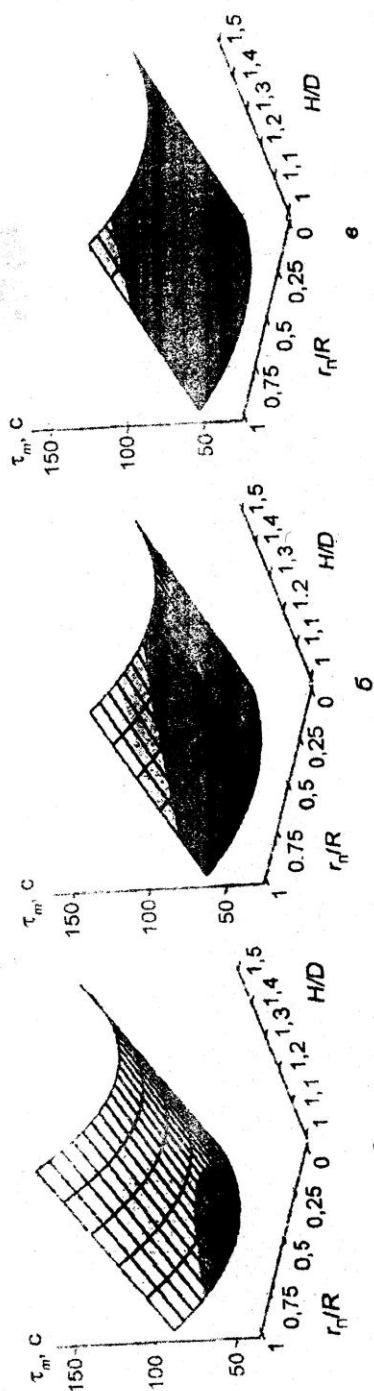


Рис. 2. Графики изменения времени перемешивания в зависимости от H/D и положения продувочного отверстия (ρ) для разного расхода газа Q , (л/мин): а - 0,2; б - 0,5; в - 1,0

УС
КО
ДС
СТ
КС
РЕ
УЗ
ДИ
ЦЕ
ЭЛ
ПС
И:
- (Г
Д П
Н М
Р З
В М
Д Р
С М
С М
Ч Б
С М
В Д
М У
Г Б
С К
С
У
Г
Г
Г

устройства на расстоянии 0,4-0,6 радиуса модели ковша.

Дальнейшее развитие экспериментальных исследований выполнялось для условий продувки жидкости в ковше с помощью двух продувочных узлов, которые располагались в различных точках днища ковша (рис. 3).

Для удобства исследований был принят равный расход вдуваемого газа через каждый продувочный узел. Замеры времени гомогенизации выполнялись для положения продувочных узлов относительно центральной оси ковша, равного 0,5 радиуса. При этом варьировались угол α , определяющий расположение пробок в днище ковша, расход вдуваемого газа и уровень жидкости в модели ковша. Угол изменялся в диапазоне 20-180° (рис. 3), расход газа - 0,2-1,0 л/мин, $H/D=1,0-1,5$.

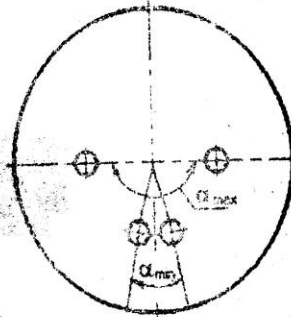


Рис. 3. Схема расположения продувочных узлов в модели ковша

В результате наблюдений установили, что для всего диапазона расхода вдуваемого газа и глубины ванны жидкости при сравнительно небольшой величине угла между продувочными пробками (менее 30-35°) наблюдается тенденция слияния двух восходящих потоков в один, а при большей - каждый восходящий поток (от продувочного узла) поднимается независимо друг от друга. При этом данные потоки частично сталкиваются между собой в верхней части ковша при движении вдоль горизонтальной плоскости. Результаты измерения времени гомогенизации представлены на рис. 4.

Обобщая полученные данные, можно выделить следующие характерные закономерности: при увеличении угла между продувочными узлами наблюдается некоторый рост времени гомогенизации, достигающий своего максимального значения при диаметрально противоположном расположении пробок. При этом следует отметить, что рост величины времени гомогенизации при увеличении величины угла между продувочными узлами в большей степени проявляется для ковшей с повышенным соотношением H/D . Минимальное время гомогенизации перемешивания, соответствующее углу между продувочными узлами в диапазоне 40-60°, отмечено для расположения продувочных узлов. Как показали наблюдения, для такого расположения продувочных узлов наблюдается формирование двух циркуляционных потоков, которые только соприкасаются друг с другом в верхней части жидкой ванны.

Соответственно, можно предположить, что повышение времени гомогенизации при увеличении угла между продувочными узлами является следствием столкновения циркуляционных потоков, которые формируются в жидкой ванне каждым продувочным узлом. В результате такого столкновения происходит гашение части энергии пе-

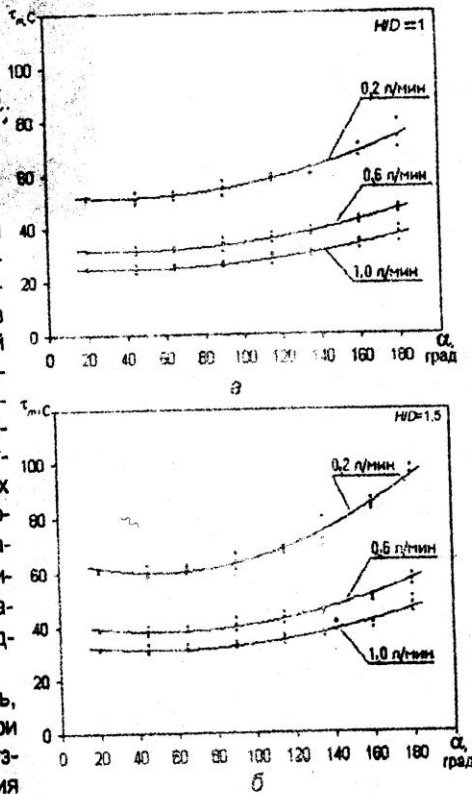


Рис. 4. Изменение времени гомогенизации в зависимости от угла между продувочными узлами и расхода газа для различного уровня жидкости: а - $H/D=1$; б - $H/D=1,5$

а

б

а

Рис. 2. Графики изменения времени перемешивания в зависимости от H/D и положения продувочного отверстия (r) для разного расхода газа Q , (л/мин): а - 0,2; б - 0,6; в - 1,0

ивается; одувочного

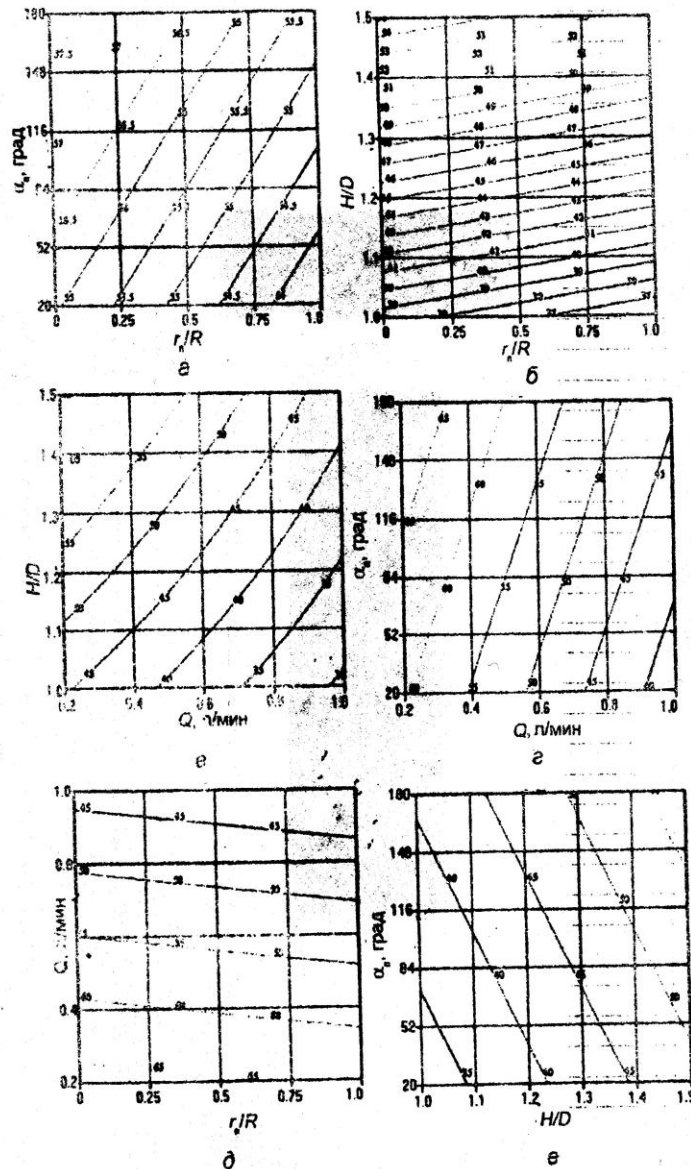


Рис. 5. Издания времени перемешивания в зависимости от сочетания факторов при: а - $Q=0,6$ л/мин, $H/D=1,5$; б - $Q=0,6$ л/мин, $\alpha_n=120$ град; в - $r/R=0,5$, $\alpha_n=120$ град; г - $H/D=1,5$, $r/R=0,5$; д - $H/D=1,5$, $\alpha_n=120$ град; е - $Q=0,6$ л/мин, $r/R=0,5$

ремешивания, что и приводит к увеличению показателя времени гомогенизации. Однако, рассматривая это явление в ракурсе организации эффективного проведения технологических операций внепечной обработки стали, нельзя не отметить, что динамичное столкновение циркуляционных потоков может способствовать интенсификации перемешивания жидкости в локальных объемах, важных с точки зрения ускорения экстракционных процессов (например, десульфурации или диффузионного раскисления). Вероятно, окончательное заключение об эффективности перемешивания жидкости в ковше двумя продувочными узлами можно сделать только при условии моделирования поведения

жидко
шлак,
Об
продув
2' [1] п
яние о
в 2 раз
 α (фак
(факто
вышен
чение
Пос
ределе
вочным

$$\tau_m = + 0,0$$

С пс
ремеш
линий
- уве
- ум
же уве
- уве
мени п
Таки
получе
технол
ход вду
жидкос
ческие
продув
подходи
шивани
сталелг

1. Бара - Кие
2. Тюрн 1998.
3. Физич Е. В. С
4. Mixing M. Ma
5. Krishn Bubbli
6. Optimi I. Kov Getm

Пост

жидкости, моделирующей металл, совместно с поведением жидкости, моделирующей шлак, расположенный на поверхности металла [3-6].

Обработка результатов физического моделирования продувки жидкой ванны двумя продувочными узлами с применением теории планирования эксперимента по плану типа 2^4 [1] позволила установить, что на величину времени перемешивания наибольшее влияние оказывают соотношение H/D (фактор x_2) и расход газа Q (фактор x_1). При этом почти в 2 раза меньшим оказывается влияние угла между расположением продувочных узлов α (фактор x_3). Наименьшее влияние оказывает положение продувочных устройств $\rho = r/R$ (фактор x_4). Причем, увеличение расхода газа уменьшает время перемешивания, а повышение глубины ванны и удаление пробок от вертикальной оси ковша вызывает увеличение времени перемешивания.

После перехода к записи в натуральных переменных получена зависимость для определения времени перемешивания при продувке жидкой ванны ковша двумя продувочными узлами

$$\tau_m = 8,1 - 3,44 \cdot Q + 43,32 H/D - 2,5 \cdot \rho - 0,083 \cdot \alpha - 16,575 \cdot Q \cdot H/D + 0,094 \cdot H/D \cdot \alpha. \quad (3)$$

С помощью полученной зависимости построены изолинии поверхностей времени перемешивания при различных сочетаниях факторов (рис. 5). Анализ представленных изолиний подтверждает высказанные ранее выводы, а именно:

- увеличение времени перемешивания наблюдается при повышении глубины ванны;
- уменьшению времени перемешивания способствуют повышение расхода газа, а также увеличение расстояния от вертикальной оси ковша до продувочного устройства;
- увеличение угла между продувочными устройствами приводит к возрастанию времени перемешивания.

Таким образом, в результате экспериментов, выполненных на физической модели, получен массив количественных данных, позволяющих проследить влияние основных технологических факторов (количество и место расположения продувочных узлов, расход вдуваемого газа, конфигурация ковша и т. п.) на интенсивность перемешивания жидкости в ковше. Математическая обработка этих данных позволила получить эмпирические выражения для расчета времени перемешивания жидкости для одного и двух продувочных узлов. Применение полученных выражений позволит более обоснованно подходить к вопросу оптимизации конструктивных и технологических параметров перемешивания расплава в сталеразливочном ковше от выпуска до разлива как в действующих сталеплавильных цехах, так и на стадии проектирования и реконструкции оборудования.

Список литературы:

1. Барабашук В. И., Креденцер Т., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике. - Киев: Техника, 1984. - 200 с.
2. Турин Ю. Н., Макаров А. А. Статистический анализ данных на компьютере. - М.: ИНФРА-Ф, 1996. - 528 с.
3. Физическое моделирование процесса перемешивания металла газом в ковше / А. Н. Смирнов, Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш, А. В. Яремко // Металл и литье Украины. - 2006. - № 3-4. - С. 7-30.
4. Mixing Time and Correlation for Ladle Stirred with Dual Porous Plugs / J. Mandal, S. Patil, M. Madan, D. Mazumdar // Metallurgical and Materials Transaction B. - 2005. - Vol. 36B, № 8. - P. 179-187.
5. Krishnaprihatody K., Irons G. A. Modeling of Satg Eye Formation over Metal Bath Due to Gas Bubbling // Metallurgical and Materials Transaction B. - 2006. - Vol. 37B, № 10. - P. 763-772.
6. Optimization Argon-Injection Process Parameters for Ladle Treatment Steel / A. Srimov, S. Eronko, I. Kovalenko, R. Giessen // 5-th European Steelmaking Conference, 26-28 June, 2006, Aachen, Germany. - Steel Institute VDEh, 2006. - P. 280-286.

Поступила 17.07.2007