

© Белоусов В.В., Бондаренко В.И., Недопекин Ф.В.,
Бодряга В.В., Павлов Я.В., Габеляя Д.И., 2017

Белоусов Вячеслав Владимирович

Доктор технических наук, профессор,
Донецкий национальный университет
(Донецк, Украина)

E-mail: v.v.bilousov@gmail.com

Belousov Vyacheslav Vladimirovich

Doctor of technical sciences, professor,
Donetsk national university
(Donetsk, Ukraine)

E-mail: v.v.bilousov@gmail.com

Бондаренко Виталий Иванович

Старший преподаватель,
Донецкий национальный университет
(Донецк, Украина)

E-mail: vitbond@gmail.com

Bondarenko Vitaly Ivanovich

Senior lecturer,
Donetsk national university
(Donetsk, Ukraine)

E-mail: vitbond@gmail.com

Недопекин Федор Викторович

Доктор технических наук, профессор,
Донецкий национальный университет
(Донецк, Украина).

E-mail: f.nedopekin@gmail.com

Nedopekin Fedor Victorovich

Doctor of technical sciences, professor,
Donetsk national university
(Donetsk, Ukraine)

E-mail: f.nedopekin@gmail.com

Бодряга Виктор Викторович

Старший преподаватель,
Донецкий национальный университет
(Донецк, Украина)

E-mail: vvbod@yandex.ru

Bodryaga Victor Victorovich

Senior lecturer,
Donetsk national university
(Donetsk, Ukraine)

E-mail: vvbod@yandex.ru

Павлов Ярослав Владимирович

Аспирант, Донецкий национальный
университет (Донецк, Украина)

E-mail: yaroslavvl@ya.ru

Pavlov Jaroslav Vladimirovich

Post graduate student
Donetsk national university
(Donetsk, Ukraine)

E-mail: yaroslavvl@ya.ru

Габеляя Давид Ивлериевич

Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкий государственный
университет (Череповец, Россия)

E-mail: MMiTO@chsu.ru

Gabelaya David Ivlerievich

PhD (Technology), Associate professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)

E-mail: MMiTO@chsu.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
И ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ В АГРЕГАТЕ
КОВШ – ПЕЧЬ**

**A MATHEMATICAL MODEL OF
HYDRODYNAMIC AND HEAT AND
MASS TRANSFER PROCESSES IN THE
LADLE FURNACE UNIT**

Аннотация. В статье рассматривается математическая модель и вычислительный алгоритм гидродинамических и тепломассообменных процессов в агрегате ковш-печь. Математическая модель учитывает турбулентный тепломассообмен и двухскоростную модель газообмена. При работе с математической моделью используется

Abstract. In the article we provide the mathematical model and numerical algorithm of hydrodynamic and heat and mass transfer processes in the ladle – furnace unit. The mathematical model considers turbulent heat and mass transfer, and a two-speed model of gaseous exchange. When dealing with the mathematical model an expert system with input data

экспертная система с входным потоком данных: температура расплава, скорость поступления газовой фазы в ванну, температура нагрева шлака и т.д.

stream (melt temperature, gas phase arrival rate in the bath, heating the slag temperature, etc.) is used.

Ключевые слова. Агрегат ковш-печь, турбулентный тепломассообмен, двухскоростная модель газообмена, экспертная система.

Key words. Ladle – furnace unit, turbulent heat and mass transfer, two-speed of gaseous exchange model, expert system.

Введение

В современной металлургии технология ковш-печь наиболее рационально обеспечивает возможность гибкого управления процессом формирования физико-химического состояния расплава для достижения поставленной цели: получения высококачественной стали с заданным химическим составом и свойствами. Агрегат ковш-печь (АКП) позволяет осуществлять следующие операции:

- снижение содержания серы в стали до необходимого уровня;
- производить сталь с содержанием легирующих элементов в заданных узких пределах;
- осуществлять отдачу металла на разливку в заданном интервале температур;
- обрабатывать сталь активными элементами (кальций, титан, бор и др.) с максимальным и стабильным усвоением;
- усреднять металл в ковше по температуре и химическому составу;
- изменять за счет микролегирования морфологию и количество неметаллических включений;
- в случае работы с машиной непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) агрегат ковш-печь является буферной емкостью, позволяющей при серийной разливке стали подавать металл строго в необходимое время;
- в случае выпуска металла с превышением химического состава по вредным примесям за счет разбавления чистым металлом другой плавки исключить брак по химическому составу.

Основная часть

Агрегаты ковш-печь находятся в стадии непрерывного развития, что связано не только с появлением новых устройств, таких как трайбаппараты, устройства для порошковой продувки и др., но и с непрерывным расширением ассортимента марок стали, обрабатываемой в АКП. Это приводит к необходимости непрерывного совершенствования технологии обработки расплава стали и интеграции новых технологических приемов в существующие системы управления технологическим процессом.

Одной из проблем при работе АКП является взаимосвязь между подводом тепла и интенсивностью перемешивания расплава. Несогласованность этих двух процессов может привести к существенным потерям тепла и даже в аварийной ситуации – прогара стенки ковша. Поэтому важное значение для обеспечения потребностей рынка имеет выбор рациональных режимов, которые приведут к существенному снижению энергозатрат. Определение этих режимов возможно лишь на основании математического моделирования, которое позволяет исследовать взаимообусловленность гидродинамических и теплофизических процессов и процессов барботажа.

В силу сложности рассматриваемых процессов наиболее перспективны для их описания математические модели смешанного типа. Для построения таких моделей экспериментальные данные целесообразно привлекать лишь по тем звеньям и характеристикам процессов продувки жидкого металла инертным газом, теоретический расчет которых затруднителен. Однако большинство экспериментов в металлургии провести невозможно из-за высокой температуры и агрессивности металла, поэтому предпочтение отдается математическому моделированию.

Авторы предлагают для учета газозахвата воздуха при разливке стали сверху использовать односкоростную математическую модель. В нашем случае вместо воздуха можно использовать инжестируемый в металл газ.

Математическая модель для этих сложных взаимообусловленных процессов описывается уравнением движения, неразрывности, переноса тепла, массы, газовой фазы, турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации [2].

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \nabla v_s \nabla \vec{V} + \vec{g} \beta_T (T - T_0) + \vec{g} \beta_D (C - C_0) + f_v + \frac{3}{8} \frac{\beta \xi (V_{zz} - V_{zz})^2}{R_0} - \frac{1}{\rho} \nabla p; \quad (1)$$

$$\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) T \right] = \nabla \lambda_s \nabla T; \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) C = \nabla D_s \nabla C; \quad (3)$$

$$\nabla \vec{V} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \vec{V}_s \cdot \text{grad} \beta = f_\beta; \quad (5)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) k = \nabla v_s \nabla k + C_\mu G - \vec{g} \beta_T (T - T_0) - \vec{g} \beta_T (C - C_0) - \varepsilon; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \varepsilon = \nabla v_s \nabla \varepsilon + C_1 v G - \frac{\varepsilon v_i}{k \sigma_i} \vec{g} \beta_T (T - T_0) - C_2 \varepsilon^2 / k; \quad (7)$$

где $\vec{V}$ – скорость расплава, $v = v_i + v$ – эффективная, v – кинематическая, $v_i = k^2 / \varepsilon$ – турбулентная вязкости; β_T , β_D – тепловой и диффузионный коэффициенты объемного расширения; C – концентрация примеси (углерода), C_T – концентрация газовой фазы; $\lambda_s = \lambda + \lambda_i$ – эффективная, λ – молекулярная и $\lambda_i = v_i / 0,9$ – турбулентная теплопроводности; G – диссипативный член; T_0 , T_L – температуры начальная и ликвидус; k – турбулентная энергия, ε – скорость диссипации турбулентной энергии, β – содержание газовой фазы, C_μ , C_1 , C_2 – эмпирические коэффициенты, необходимые для решения уравнений (6) и (7).

Начальные условия для скорости равны нулю, а для температуры в ванне ковша – начальной температуры расплава. Скорость на ограничивающей жидкость твердой поверхности равна нулю (условие «прилипания и непроницаемости»).

Начальные условия задаются из соображения предварительного прогрева внутренней полости ковша до 800 °С, распределение начальной температуры в многослойной конструкции ковша представлено на рис. 1. Это распределение получено в ходе решения уравнения теплопереноса в стенке ковша в период прогрева полости.

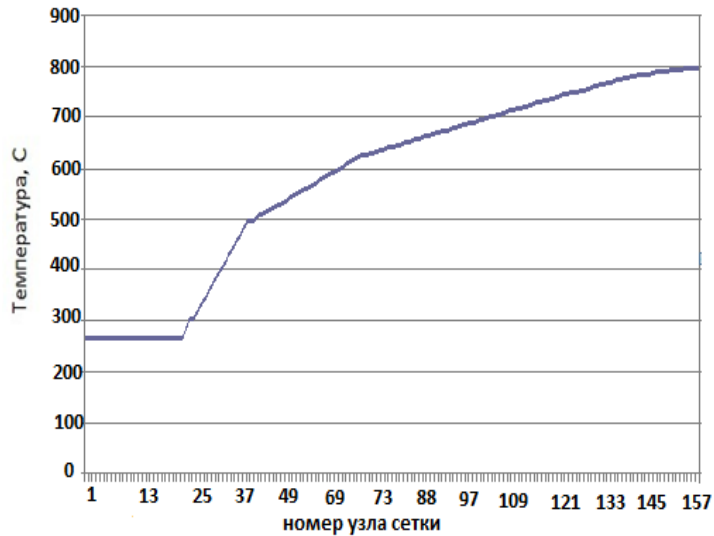


Рис. 1. Распределение температуры в футеровке нового сталь-ковша после 24 часового прогрева на сушке

Уравнение (2) решается на всей области ковша-печи с граничными условиями четвертого рода с идеальным контактом на границе сред «расплав – боковая стенка», «расплав – днище», «расплав – шлак», «шлак – боковая стенка» «футеровка стенки – металлическая рубашка»:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial X} \right|_1 = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial X} \right|_2, \quad T_1 = T_2.$$

Сверху ковш-печь накрывается крышкой, служащей для снижения потерь тепла металлом в период нагрева и обработки, для создания безопасных условий работы и для защиты металла от окисления и газонасыщения. Таким образом, для уравнения (2) сверху ставится условие идеальной теплоизоляции.

На границах агрегата («боковая стенка – окружающая среда» и «днище – окружающая среда») ставятся условия третьего рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial X} = -\alpha \cdot (T_{\Gamma} - T_{\text{ср}}),$$

где α – коэффициент теплоотдачи, T_{Γ} – температура на границе расчетной области, $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды.

Коэффициент α может быть определен с помощью формулы М.А. Михеева [2]: $Nu_{\text{ср}} = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$, и коэффициент теплоотдачи определяется как: $\alpha = 0,5\lambda/d$.

Значения коэффициентов представлены в таблице.

Численная реализация граничных условий в случае турбулентных течений весьма затруднительна из-за больших градиентов турбулентных характеристик у стенки. Турбулентный пограничный слой вблизи стенки состоит из очень узкого вязкого подслоя, инерционного слоя и внешней области течения. Профиль скорости представляет со-

бой линейную зависимость в вязком подслое, логарифмическую в инерционном слое и быстро меняющуюся функцию во внешней области. Для подробного описания течения в вязком подслое необходим чрезвычайно малый шаг сетки, что нереально с точки зрения ресурсов памяти и быстродействия современных ЭВМ. Поэтому одним из способов задания граничных условий является закон «стенки» [3].

Таблица

Значения постоянных C и n

№	$(Gr \cdot Pr)$	C	n
1	от 0 до $1 \cdot 10^{-3}$	0	0
2	от $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
3	от $5 \cdot 10^2$ до $2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
4	от $2 \cdot 10^7$ до $1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

Для описания поведения течения на стенке учитывались эффекты неизотропной диссипации (значения диссипации задаются на стенке нулевыми). Причем последнее учитывается через молекулярную вязкость, входящую в диффузионные члены во всех уравнениях переноса. Рекомендованная в [3] модификация модели заключается во включении члена уничтожения в k – уравнение (6):

$$-2\nu \left[\left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} \right)^2 \right];$$

и члена порождения в ε – уравнение (7):

$$2\nu_t \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 \right];$$

C_μ замещается на $C_\mu \cdot [-2,5 \cdot (1 + Re_t/50)]$ и C_2 на $C_2 \cdot [1 - 0,3 \cdot \exp(-Re_t^2)]$, Re_t – турбулентный критерий Рейнольдса [3]. Значения k и ε полагаются нулевыми на стенках.

Такая модель (1)–(8) позволяет учитывать разность скоростей жидкой и газовой фаз и предполагает использование стационарной формы, размеров и скорости газовых пузырей, что вполне допустимо в ковшевой металлургии.

При работе с математической моделью используется экспертная система с входным потоком данных: геометрия слитка, тоннаж слитка, вид литья, скорость поступления расплава в стальную форму во время литья [1]. Перечисленные параметры являются именами полей таблицы базы данных, каждая запись которой рассматривается как набор основных параметров технологического процесса. В качестве выходных параметров выбраны следующие: параметр итерации уравнения Пуассона, выбор модели турбулентности, генерация пространственной сетки, выбор шага по времени, время затвердевания слитка.

Для обработки стали в АКП используется продувка инертными газами (аргоном), которая необходима для:

- гомогенизации расплава по химическому составу;
- равномерного прогрева объема жидкой стали;
- удаления неметаллических включений;

Расход газа должен обеспечить качественную гомогенизацию по температуре и химическому составу, но при этом не должен привести к попаданию неметаллических включений из шлака в объем жидкого металла [4]. Ко всему этому стоит добавить постоянную актуальность энерго- и ресурсосбережения. Поэтому для интенсивного перемешивания расплава необходимо турбулизовать поток [2]. Одним из способов достижения турбулентности является переменный расход газа через две и более продувочные пробки, причем расход через каждую пробку может быть неодинаков [5]. Для данной технологии принято название «импульсная продувка» (ИП).

При стандартной технологии продувки расход аргона постоянен и сохраняется на протяжении некоторого технологического периода плавки. При ИП расход аргона постоянно меняется от нуля до заданной величины. Изменение расхода газа на протяжении плавки осуществляется в несколько этапов. На первом этапе происходят интенсивные десульфурация, прогрев стали, процесс гомогенизации после отдачи основного количества легирующих элементов (в этот период расход аргона максимальный). На втором этапе температура расплава приближается к необходимой для разливки в МНЛЗ, и расход газа снижается. На третьем этапе, когда достигнут не только необходимый температурный режим расплава, но и его химический состав, расход аргона снижается до минимума. Это необходимо для предотвращения отбора неметаллических включений (НВ) из шлака в объем жидкой стали и перевода в шлак НВ, которые образовались вследствие окисления легирующих элементов в более ранние – агрессивные периоды плавки. Последнее связано с тем, что в период интенсивного барботажа (первый этап) НВ были вовлечены из шлака в расплав.

Для оценки эффективности использования данной технологии на заводе ООО «Электросталь» была проанализирована 16 плавов с использованием вышеописанной технологии. Показатели этих плавов сравнивались с плавками, обработанными на АКП без использования технологии ИП, в этот же период времени. Для анализа эффективности ИП в промышленном эксперименте рассматривался такой важный параметр плавки, как десульфурация. Был обработан массив значений содержания серы в плавках, один из которых представлен на рис. 2. Результаты сглаживания свидетельствуют о квадратичном характере поведения функции.

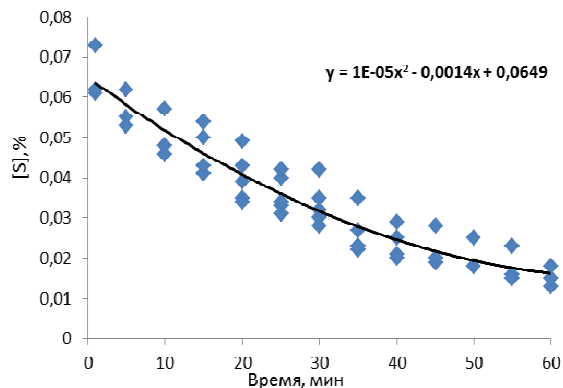


Рис. 2. Анализ процесса десульфурации в плавках без импульсной продувки

Зависимость скорости десульфурации от времени обработки определяется как производная от функции, представленной на рис. 2, результаты приведены на рис. 3.

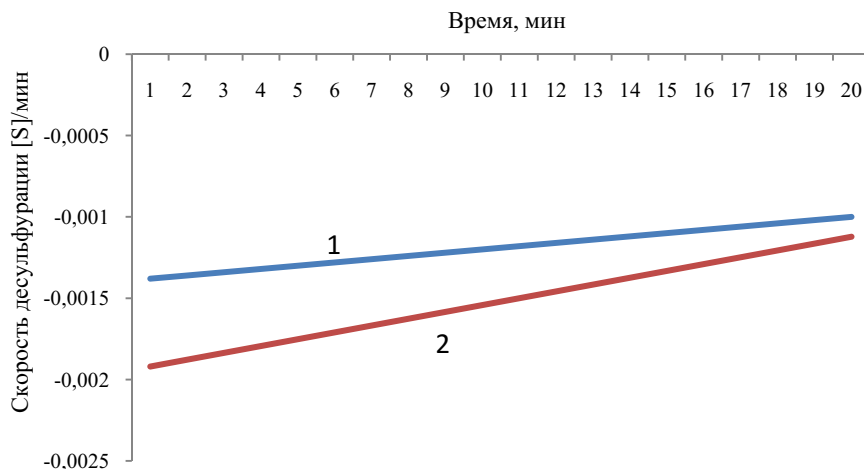


Рис. 3. Зависимость изменения скорости десульфурации во времени.
Прямая 1 – плавки без импульсной продувки; прямая 2 – плавки с импульсной продувкой

Из рис. 3 видно, что средняя скорость десульфурации в начале обработки на АКП (первые 20 мин.) с использованием ИП составляет от -0,0019 до -0,0011 [S]/мин. В плавках без импульсной продувки – от -0,0014 до -0,001 [S]/мин. То есть удаление серы в плавках с ИП проходило на 20 % эффективнее. Отрицательные значения скорости десульфурации свидетельствует о тенденции снижения количества серы в расплаве.

Выводы

Разработаны математическая модель и вычислительный алгоритм гидродинамических и теплообменных процессов в агрегате ковш-печь с учетом турбулентного теплопереноса и продувки расплава инертными газами. Расчет газовой фазы основан на двухскоростной модели, позволяющей учитывать разность скоростей жидкой и газовой фаз. При работе с математической моделью используется экспертная система с входным и выходным потоками данных.

Сравнивая результаты вычислительного и промышленного экспериментов, можно сделать вывод о возможности применения ИП для снижения энерго-, ресурсозатрат и повышения качества выплавляемой стали. Видно, что технология, примененная на ООО «Электросталь», позволила на практике увеличить на 20 % скорость десульфурации.

Литература

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 1: Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки. М.: Теплотехник, 2008. 450 с.
2. Недопьокін Ф.В., Кондратенко В.М., Білоусов В.В. та ін. Твердіння металів і металевих композицій. Київ, 2009. 448 с.

3. Шумахер Э.Э., Смоктий В.В., Порохнявый В.Г., Семеняк М.Ю., Бойченко Б.М. Технология APS продувки металла в сталеразливочном ковше // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. №7. С. 211–212.
4. Bondarenko V.I., Bilousov V.V., Nedopecin F.V., Shalapko J.I. The Mathematical Model of Hydrodynamics and Heat and Mass Transfer at Formation of Steel Ingots and Castings // *Archives of Foundry Engineering*. 2015. Vol. 15. Iss.1. P. 13–16.
5. Jones V.P., Launder B.E. The prediction of laminarization with a 2 equation model of turbulence // *International Journal of Heat and mass transfer*, 1971, vol. 15, pp. 301–314.

References

1. Djudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 1: Processy vyplavki, vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki* [Production of steel. Vol. 1. The processes of melting, ladle treatment and continuous casting]. Moscow: Teplotehnik, 2008. 450 p.
2. Nedop'okin F.V., Kondratenko V.M., Bilousov V.V. ta in. *Tverdinnia metaliv i metalevykh kompozycji* [Solidification metals and metal compositions]. Kyiv, 2009, 448 p.
3. Schumacher E.E., Smokty V.V., Porohnyavy V.G., Semenyak M.Y., Boichenko B.M. Tehnologii APS produvki metalla v stalerazlivochnom kovshe [Technological APS metal blowing in ladle]. *Metallurgicheskaia i gornorudnaia promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry], 2010, no. 7, pp. 211–212.
4. Bondarenko V.I., Bilousov V.V., Nedopecin F.V., Shalapko J.I. The Mathematical Model of Hydrodynamics and Heat and Mass Transfer at Formation of Steel Ingots and Castings. *Archives of Foundry Engineering*, 2015, vol. 15, iss. 1, pp. 13–16.
5. Jones V.P., Launder B.E. The prediction of laminarization with a 2 equation model of turbulence. *International Journal of Heat and mass transfer*, 1971, vol. 15, pp. 301–314.

Белузов В.В., Бондаренко В.И., Недопекин Ф.В., Бодряга В.В., Павлов Я.В., Габелая Д.И. Математическая модель гидродинамических и тепломассобменных процессов в агрегате ковш – печь // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2017. №1. С. 20–27.

For citation: Bilousov V.V., Bondarenko V.I., Nedopecin F.V., Bodryaga V.V., Pavlov J.V., Gabelaya D.I. A mathematical model of hydrodynamic and heat and mass transfer processes in the ladle furnace unit. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 1, pp. 20–27.