

© Бодряга В.В., Недопекин Ф.В.,
Белоусов В.В., Окунева Т.А., 2017

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

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

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

Окунева Татьяна Александровна

Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкий государственный
университет (Череповец, Россия)
E-mail: MMiTO@chsu.ru

Okuneva Tatyana Alexandrovna

PhD (Technology), Associate professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: MMiTO@chsu.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ
ПОТОКОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ
СТРУИ АЗОТА ПРИ ПЕРЕЛИВАХ
ЧУГУНА**

**MATHEMATICAL MODEL OF FLOW
GAZ DISTRIBUTION CONSIDERING THE
INFLUENCE OF NITROGEN STREAM OF
THE PIG IRON OVERFLOW**

Аннотация. Рассмотрена математическая модель процесса эжекции воздуха струей жидкости при переливах чугуна. Новизна модели заключается в учете влияния струи азота на распределение газовых потоков в ковше.

Abstract. The mathematical model of an air ejection process by fluid jet at pig iron overflow was considered. The model novelty is that we take into account nitrogen jet influence on distribution of gas flow in the ladle.

Ключевые слова. Аэродинамика, бурый дым, чугун, миксер, ковш, нейтральный газ, математическое моделирование.

Key words. Aerodynamics, red fume, pig iron, mixer, ladle, neutral gas, mathematical simulating.

Введение

Переливы жидкого чугуна из емкости в емкость являются необходимым звеном в технологическом процессе металлургического производства. Каждый перелив сопровождается выбросом пыли, которая состоит из двух основных компонентов: на 10–20 % из крупнодисперсной графитсодержащей пыли и на 75–85 % из мелкодисперсных оксидов железа (бурого дыма).

Для снижения выбросов применяются аспирационные системы большой мощности с пылеулавливающими аппаратами [1], [2]. Фильтры обеспечивают высокую эффективность улавливания, но требуют значительных капитальных и эксплуатаци-

онных затрат, кроме того, фильтры обладают большими габаритами, что создает проблемы с их размещением в действующих цехах. Этот недостаток привел к тому, что значительная часть литейных дворов, миксерных отделений и все конвертеры (при заливке) вообще не оснащены системами газоочистки. В связи с этим представляют практический интерес исследования процесса образования бурого дыма и разработка технологических приемов снижения его выбросов.

Непосредственной причиной образования бурого дыма является взаимодействие мелких капель чугуна с кислородом газовой фазы. Эффективным решением данной проблемы является создание в зоне диспергирования струи чугуна атмосферы с пониженным содержанием кислорода с целью предотвратить окисление брызг металла и подавить таким образом образование бурого дыма [1]. Перспективным методом борьбы с выбросами является замещение атмосферного воздуха в ковше каким-либо инертным газом, осуществляемое путем подачи струй этого газа в полость ковша.

Основная часть

Постановка задачи. Экспериментальное изучение этих процессов чрезвычайно затруднено из-за высокой температуры среды и сложностей в обеспечении одновременного аэродинамического и теплового подобия натуре и модели, а также в связи с огромными финансовыми затратами. Поэтому весьма перспективным и удобным методом исследования в настоящее время является математическое моделирование с применением численных методов. Объектом моделирования являются аэродинамические потоки в ковше (350 т), обусловленные эжектирующим влиянием падающей заливочной струи чугуна и вдувом азота через сопла, расположенные на верхнем срезе ковша (рис. 1).

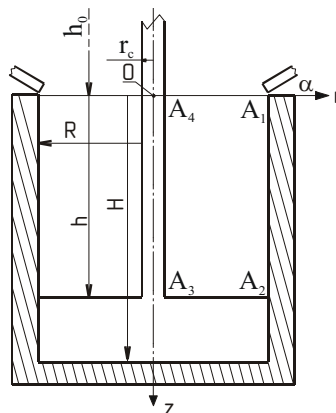


Рис. 1. Схема моделируемой области

Областью моделирования является полость, ограниченная контуром $A_1A_2A_3A_4$, система координат – цилиндрическая, азимутальными составляющими всех величин пренебрегаем. Ввиду малых значений числа Маха, соответствующих конкретным условиям процесса, сжимаемостью газа также пренебрегаем. Влияние температурной неоднородности газа в полости ковша не учитывается. Движение газа описывается в переменных «вихрь скорости» и «функция тока»:

$$\omega = \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial r}, \quad (1)$$

$$V_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}; \quad V_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}. \quad (2)$$

Система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\omega}{r} \right) + V_r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\omega}{r} \right) + V_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\omega}{r} \right) &= \frac{1}{r^3} v \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\omega}{r} \right) \right] + v \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\omega}{r} \right); \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} &= -\frac{\omega}{r}. \end{aligned}$$

Уравнение переноса вихря (1) имеет консервативный вид относительно величины $\frac{\omega}{r}$, что значительно повышает устойчивость соответствующей разностной схемы.

Конкретный характер процесса определяется совокупность начальных и граничных условий для ω и ψ причем для вихря скорости условия устанавливаются на этапе конечно-разностной аппроксимации.

Считаем, что процесс начинается из состояния покоя, когда $\omega = \psi = 0$.

Постановка граничных условий по периметру полости определяет характер развития аэродинамических потоков, генерируемых заливочной струей.

На участках границ A_1A_2 , A_2A_3 и A_3A_4 :

$$\psi = 0.$$

На участке A_1A_4 :

$$\frac{d}{dz} \left(\int_{r_c}^r 2\pi r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} dr \right) = 0. \quad (2)$$

Выражение (2) определяет условие свободного перетекания газа через открытую поверхность A_1A_4 .

Формула (2) выражает закон сохранения объемного расхода через участок. Реализация именно этого условия является принципиально важным этапом в постановке краевой задачи, так как жестко заданный профиль скорости на этой границе «приспособит» к себе поле скорости во всей области моделирования, что будет противоречить внутренней логике развития процесса.

С условием (2) на участке A_1A_4 согласуется условие отсутствия потока вихря скорости ω к данной поверхности:

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = 0.$$

Для остальных частей границы (конечно-разностная форма) на стенке ковша:

$$\left. \frac{\omega}{r} \right|_{A_1A_2} = -\frac{2}{R^2 h_N^2} \psi_{N-1};$$

на поверхности расплава чугуна:

$$\left. \frac{\omega}{r} \right|_{A_3A_2} = -\frac{2}{r^2 h_{M-1}^2} \psi_{M-1};$$

на поверхности заливочной струи:

$$\left. \frac{\omega}{r} \right|_{A_3 A_4} = -\frac{2}{r_c^2 h_2^2} \Psi_2 + V_g \frac{1}{r_c} \left(\frac{1}{r_c} + \frac{2}{h_2} \right);$$

где N, M – количество столбцов и строк на расчетной сетке; h_N, h_{M-1}, h_2 – шаги сетки, непосредственно примыкающие к стенке ковша, поверхности залитого чугуна и поверхности заливочной струи соответственно; $V_g = \sqrt{2g(h_0 + z) + v_0^2}$ – скорость струи чугуна.

Для учета вдувания струй азота предлагается имитировать их совокупное влияние на аэродинамику в ковше результирующим потоком газа через соосные с заливочной струей кольцевые поверхности, перпендикулярные друг другу. Вертикальная – образует коаксиальное кольцо около струи чугуна, горизонтальная – примыкает к нему и перпендикулярна оси Oz (рис. 2). Суммарный импульс газа на выходе сопел равен импульсу потока, пересекающего вертикальное и горизонтальное кольца.

Площади эквивалентных колец:

вертикального

$$S_1 = 2\pi r_{\text{эф}} \Delta z,$$

горизонтального

$$S_2 = \pi \Delta r (2r_{\text{эф}} + \Delta r),$$

где $r_{\text{эф}}$ – радиус эффективного смешения вдуваемых встречных струй, зависящий от угла расширения струй β (рис. 3).

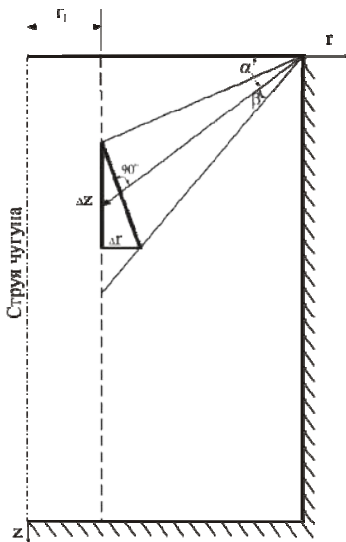


Рис. 2. Схема расчета колец для имитации подачи азота (вид сбоку)

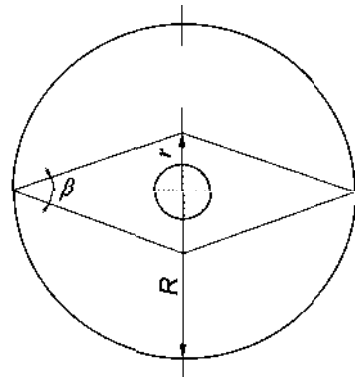


Рис. 3. Схема расчета радиуса эффективного смешения (вид сверху)

Размеры колец Δz и Δr определяются как:

$$\Delta z = R_0 \frac{2 \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \sin \alpha; \quad \Delta r = R_0 \frac{2 \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \cos \alpha.$$

Скорость потоков через S_1 и S_2 :

$$V = \frac{Q}{S_1 + S_2}.$$

Ввод в расчетный алгоритм потоков осуществляется на каждой итерации при решении уравнения Пуассона назначением в соответствующих Δz и Δr участках расчетной сетки численных значений ψ , которые в соответствии с (2) дают здесь определенную выше эквивалентную скорость струйных потоков. Компоненты скорости и V_r и V_z при данной постановке задачи следует теперь трактовать как средние по контурам $2\pi r$ для любого z .

Выводы

1. Разработана математическая модель процесса эжекции воздуха при заливке чугуна из миксера в ковш с учетом воздействия симметрично расположенных вдуваемых струй нейтрального газа.
2. Проведен учет влияния вдуваемых струй путем задания исходного импульса внутри ковша, где происходит встречное взаимодействие струй.
3. Полученная модель для расчета распределения газовых потоков в полости ковша позволяет учесть такие конструктивные параметры как: угол наклона сопел; скорость истечения и расход нейтрального газа.

Литература

1. Недопекин Ф.В., Бодряга В.В., Кравец В.А. и др. Экспериментальное исследование параметров выбросов при сливе чугуна из миксера в ковш на МК «Азовсталь» // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2012. №11. С. 3–5.
2. Недопекин Ф.В., Кравец В.А., Бодряга В.В. и др. Процессы тепломассопереноса в каплях чугуна при образовании бурого дыма // Тепло и массообмен – 2012: Материалы XIV Минского международного форума. Минск, 2012. Т. 2. Ч. 1. С. 115–119.

References

1. Nedopekin F.V., Bodryaga V.V., Kravets V.A. i dr. Eksperimental'noe issledovanie parametrov vybrosov pri slive chuguna iz miksera v kovsh na MK «Azovstal'» [Experimental study of emissions at plum pig iron from the mixer in a ladle on MP "Azovstal'"]. *Izvestija VUZov. Chernaja metallurgija* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2012, no. 11, pp. 3–5.
2. Nedopekin F.V., Kravets V.A., Bodryaga V.V. i dr. Processy teplomassopere-nosa v kapliakh chuguna pri obrazovanii burogo dyma [The processes of heat and mass transfer in drops of pig iron during the formation of red fume]. *Tepl'o i massoobmen – 2012: Materialy XIV Minskogo mezhdunarodnogo foruma* [Heat and mass transfer – 2012: Proceedings of the XIV Minsk International Forum]. Minsk, 2012. T. 2, vol. 1, pp. 115–119.

Бодряга В.В., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Окунева Т.А. Математическая модель распределения газовых потоков с учетом влияния струи азота при переливах чугуна // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №1. С. 28–32.

For citation: Bodryaga V.V., Nedopekin F.V., Bilousov V.V., Okuneva T.A. Mathematical model of flow gaz distribution considering the influence of nitrogen stream of the pig iron overflow. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 1, pp. 28–32.