

Ф. В. Недопекин<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор, В. В. Белоусов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор,  
В. А. Кравец<sup>2</sup>, д-р, техн., наук, профессор, В. В. Бодряга<sup>1</sup>

1 – Донецкий национальный университет, г. Донецк;

2 – Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка

## ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПЕРЕЛИВАХ ЧУГУНА

*Рассмотрено математическую модель процесса эжекции воздуха струей жидкости при переливах чугуна. Новизна модели заключается в учете смешанной конвекции вблизи струи металла в приближении  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. Экспериментально показано, что основной причиной образования факела выбросов из ковша при его наполнении жидким чугуном является эжектирование воздуха струей металла в объем ковша. При этом воздух поступает в ковш преимущественно через зону всасывания, возникающую вокруг струи металла.*

**Ключевые слова:** эжекция, распределение газовых потоков, бурый дым, чугун

### Введение

Экологические проблемы являются в настоящее время фактором, ограничивающим развитие черной металлургии. В частности, к серьезным проблемам следует отнести загрязнение атмосферы бурым дымом – мелкодисперсными оксидами железа, взвешенными частицами, образующимися в ходе технологических процессов в доменных и сталеплавильных цехах. Традиционным методом снижения выбросов бурого дыма является отвод выбросов от мест образования при помощи дымоососа, улавливание отведенных выбросов в фильтрах и сброс очищенного газа в атмосферу [1, 2].

Основными технологическими операциями в миксерных отделениях являются операции заливки чугуна в миксер и слива из миксера в ковш. Пыль, выделяющаяся при заливке и сливе, состоит из двух основных компонентов: мелкодисперсного бурого дыма и крупнодисперсной графитсодержащей пыли. 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 предотвращения окисления брызг металла и подавления, таким образом, образования бурого дыма [1].

### Физическая модель задачи

Физическая модель процесса построена для 350-тонного ковша, высота которого  $L_z = 5$  м, радиус ковша  $L_r = 2,5$  м, скорость струи на верхней кромке ковша  $v_0 = 10$  м/с (рисунок 1).

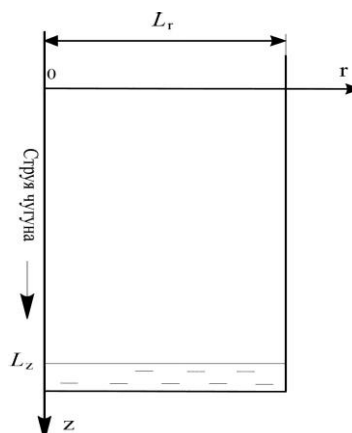


Рисунок 1 – Область моделирования

© Недопекин Ф. В., Белоусов В. В., Кравец В. А., Бодряга В. В., 2012

Предположим, что струя металла падает отвесно вдоль вертикальной оси ковша и имеет идеальную цилиндрическую форму, а поверхность расплава в ковше плоская. Модель формулировалась для цилиндрической области, имеющей вертикальную симметрию вдоль оси  $z$ , ограниченной справа стенкой ковша, слева струей металла, зеркалом металла в ковше снизу и верхней кромкой ковша сверху. Ввиду малых значений числа Маха ( $M < 0,1$ ) газ считался несжимаемым. Стенки ковша нагреты до температуры  $T_{cm} = 1000^\circ\text{C}$ , расплав чугуна –  $T_{cmp} = 1350^\circ\text{C}$ .

### Математическая модель процесса

Математическая модель процесса аэродинамики выбросов в области ковша при наполнении его жидким чугуном описывается следующей системой уравнений: Навье – Стокса в приближении Буссинеска, неразрывности, теплопереноса, турбулентной кинетической энергии  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$ :

$$(\vec{V} \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla(\mathbf{v} + \mathbf{v}_t) \nabla \vec{V} + \vec{g} \beta T; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial(rV_z)}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$c_p(\vec{V} \nabla T) = \nabla(\lambda + \lambda_t) \nabla T; \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rkV_r) + \frac{\partial kV_z}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\mathbf{v} + \mathbf{v}_t}{\sigma_k} r \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mathbf{v} + \mathbf{v}_t}{\sigma_k} r \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G - \varepsilon; \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\varepsilon V_r) + \frac{\partial \varepsilon V_z}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\mathbf{v} + \mathbf{v}_t}{\sigma_\varepsilon} r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mathbf{v} + \mathbf{v}_t}{\sigma_\varepsilon} r \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{C_1 \varepsilon G}{k} - \frac{C_2 \varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

$$G = v_t \left[ 2 \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{V_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^2 \right];$$

$$v_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon};$$

$$C_1 = 1,45; C_2 = 0,18; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,0;$$

где  $\vec{V}$  – вектор скорости, м/с;

$V_r$  и  $V_z$  – радиальная и вертикальная составляющая скорости газа, м/с;

$t$  – размерное время, с;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$P$  – давление, Н/м<sup>2</sup>;

$\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{v}_t$  – кинематический и турбулентный коэффициенты вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$\vec{g}$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$T$  – текущая температура, °С;

$c$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);

$\lambda$ ,  $\lambda_t = v_t/0,9$  – молекулярный и турбулентный коэффициенты теплопроводности,

Вт/(м·К);

$r$ ,  $z$  – текущие координаты по радиусу и по высоте, соответственно, м.

Система уравнений (1)–(5) дополняется граничными условиями, для  $V_r$ ,  $V_z$ ,  $T$ .

$$r = 0 : \partial V_r / \partial r = 0, V_z = \sqrt{2g(h_0 + z) + V_0^2}, \partial T / \partial r = 0; \quad (6)$$

$$r = L_r : V_r = 0, V_z = 0, T = T_{cm}; \quad (7)$$

$$z = 0 : \partial V_z / \partial z = 0, V_r = 0, \partial T / \partial z = 0; \quad (8)$$

$$z = L_z : V_r = 0, V_z = 0, T = T_{cmp}. \quad (9)$$

Систему уравнений и краевых условий, записанную в физических переменных, можно решать численно, при этом граничные условия для давления могут быть получены из уравнения движения (1). Метод физических переменных более нагляден, но трудности расчета поля давления значительно усложняют его численную реализацию [2]. Это привело к возникновению методов, основанных на решении уравнений, полученных при исключении давления из системы определяющих уравнений. Такой метод называется методом переменных «вихрь скорости ( $\omega$ ), функция тока ( $\psi$ )» [2].

При разработке математической модели используется модель турбулентности второго порядка –  $k$ – $\varepsilon$  модель [3–5]. В этой модели коэффициент турбулентной вязкости  $\nu_t$  выражается через кинетическую энергию турбулентности  $k$  и скорость ее диссипации  $\varepsilon$ .

В пристеночной области возникает ряд проблем при расчете турбулентных течений. У стенки параметры изменяются столь резко, что для верных расчетов требуется очень подробная сетка. Для описания поведения течения на стенке учитывались эффекты неізотропной диссипации (значения диссипации задаются на стенке нулевыми) [3]. 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 и члена порождения в  $\varepsilon$ -уравнение. При этом  $C_{\mu}$  заменяется на  $C_{\mu}[-2,5(1 + \text{Re}_t/50)]$  и  $C_2$  на  $C_2[1 - 0,3 \exp(-\text{Re}_t^2)]$ . Значения  $k$  и  $\varepsilon$  полагаются нулевыми на стенках.

$$\text{На оси ковша при } r = 0 : \quad \partial k / \partial r = 0; \quad \partial \varepsilon / \partial r = 0. \quad (10)$$

$$\text{На верхнем срезе ковша при } z = 0 : \quad \partial k / \partial r = 0; \quad \partial \varepsilon / \partial r = 0. \quad (11)$$

### **Анализ результатов численного моделирования**

При реализации математической модели использованы методы чередующихся направлений, возмущенных коэффициентов и прогонки. Применялась сетка  $100 \times 100$ . Число итераций составляло от 4 до 15. Вычислительный эксперимент проводился для случая, когда в незаполненной части ковша аэродинамическая архитектура определяется смешанным конвективным движением: тепловым и динамическим воздействием.

На рисунке 2 показаны расчетные профили вертикальной составляющей скорости потока газа на различных уровнях в ковше при наполнении его чугуном, полученные с учетом естественной конвекции (рисунок 2 а–в) и без нее (рисунок 2 г–е).

Анализ результатов вычислительного эксперимента, с учетом тепловой и вынужденной конвекции (рисунок 2 а–в), позволил определить следующие три основные зоны в полости ковша: 1) всасывания, обусловленная смешанным влиянием естественной и вынужденной конвекции, находящаяся вблизи струи металла; 2) выбросов; 3) всасывания, обусловленная влиянием стенки. При рассмотрении без учета естественной конвекции (рисунок 2 г–е) можно выделить только первые две зоны. Первая зона, в данном случае, обусловлена только эжекцией падающей струи металла.

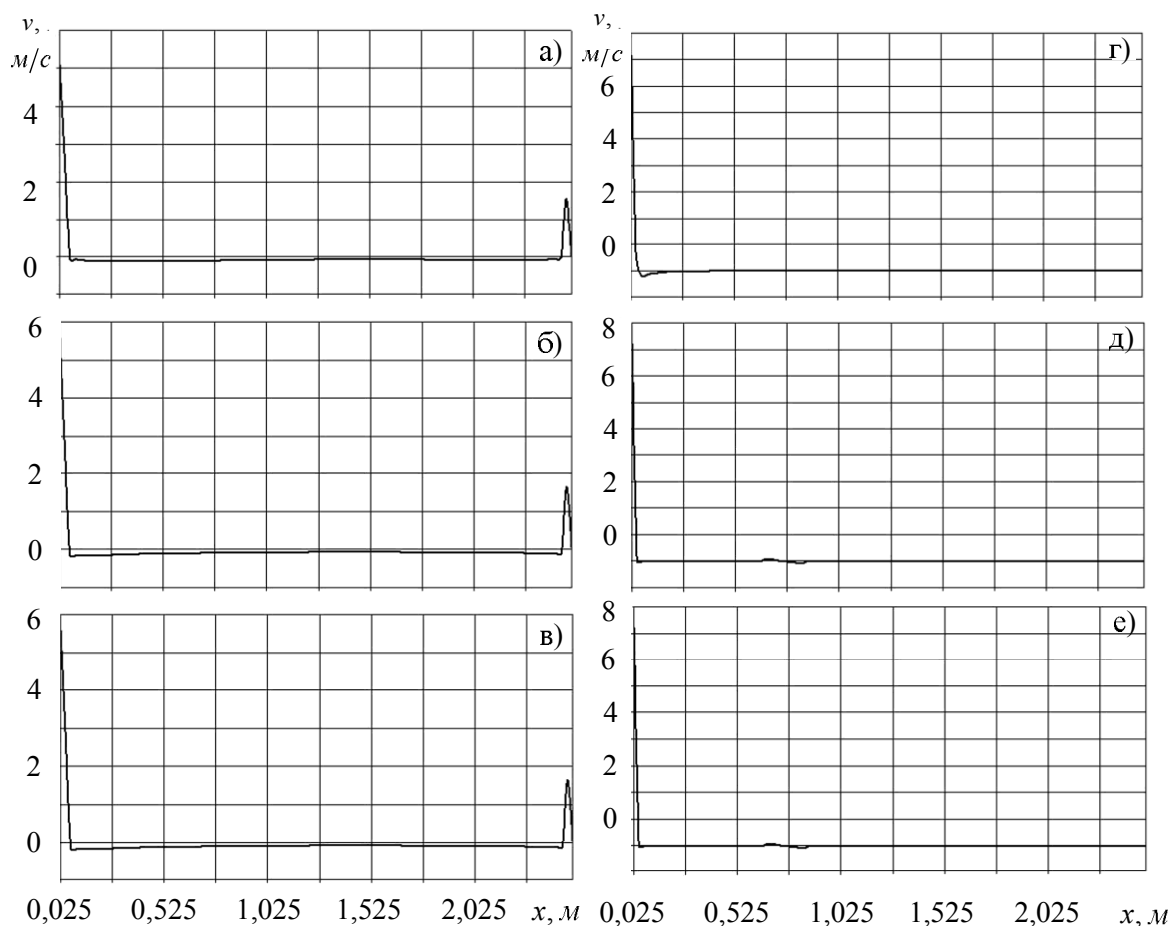


Рисунок 2 – Распределение вертикальной компоненты скорости на различных горизонтах полости ковша при переливе чугуна в условиях смешанной конвекции (а–в) и без естественной конвекции (г–е): а, г – 0,15 м от верхнего среза ковша; б, д – 2,55 м; в, е – 4,9 м

Определено, что тепловая конвекция приводит к замедлению нисходящего потока в окрестности струи жидкого чугуна. Это подтверждается сопоставлением максимальных скоростей вблизи струи металла:  $v_{\max} \approx 8 \text{ м/с}$  (рисунок 2 а–в) и  $v_{\max} \approx 5 \text{ м/с}$  (рисунок 2 г–е). Это свидетельствует о преобладающей роли эффекта эжекции воздуха по отношению к тепловой конвекции. Сравнивая третью и первую зоны, можно увидеть, что значения скоростей в пристеночной области почти в три раза меньше, чем около струи металла. Таким образом, основная зона всасывания воздуха в объем ковша расположена непосредственно около струи металла.

### *Промышленный эксперимент формирования факела выбросов*

Математическое моделирование газодинамических процессов показало, что воздух поступает в ковш через определенные, устойчиво локализованные зоны всасывания: главным образом через зону, прилегающую к струе металла, а также, в незначительном количестве, через пристеночную область [6,7]. Поступивший в ковш с воздухом кислород интенсивно расходуется в результате окислительных процессов, и образовавшиеся газообразные продукты реакции вместе с пылевым потоком выносятся из ковша через зону выбросов, расположенную в средней части ковша – между струей металла и стенкой [8].

Эксперименты проводились в миксерном отделении конвертерного цеха металлургического комбината «Азовсталь» при сливе чугуна из миксера № 2 в 350-тонный конвертер-

ный ковш. Пылеподавление азотом при проведении данных сливов не производилось. Производился отбор проб газа над ковшом и в объеме незаполненной металлом части ковша через трубки из нержавеющей стали диаметром 10 мм при помощи ручного насоса. Газ, проходя через специальный фильтр, очищался от пыли и собирался в резиновую камеру. Отобранный газ подвергался химическому анализу по методу ОРСА в доменной лаборатории комбината «Азовсталь». Точность анализа компонентов составляла  $\pm 0,15\%$  по объему. Наполнение газом одной камеры занимало в среднем 1 мин, включая время отсоединения и присоединения камеры. Расположение точек, в которых производился отбор проб газа, показано на рисунке 3.

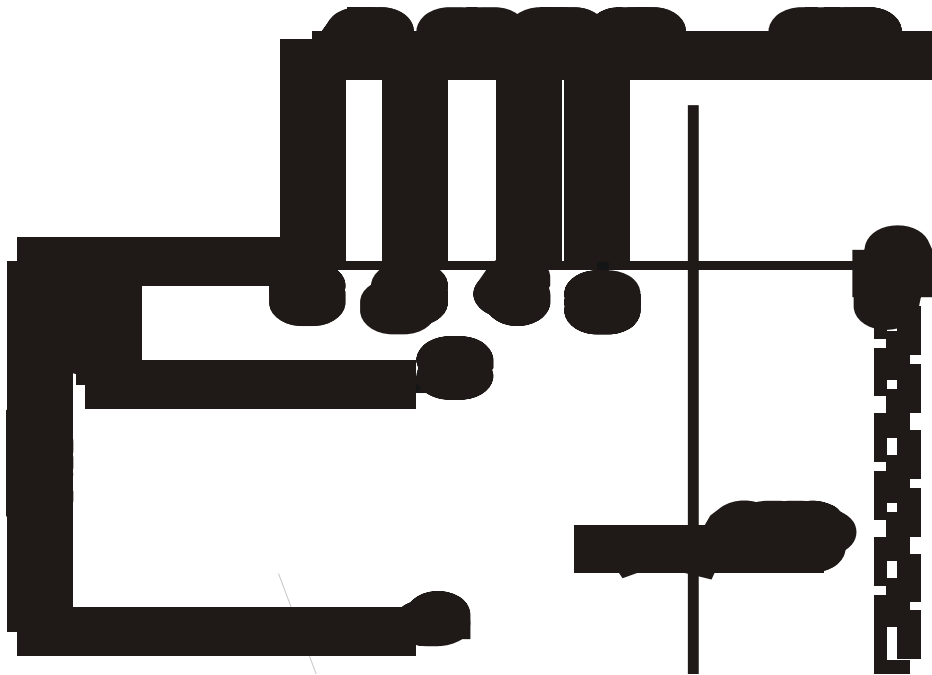


Рисунок 3 – Точки отбора проб в ковше для исследования химического состава газовой фазы

Для точек в объеме ковша отбор проводился до момента захлестывания нижнего конца трубки металлом, что фиксировалось по резкому возрастанию сопротивления просасыванию газа. В дальнейшем эти трубки отгорали, поэтому их использование носило одноразовый характер и число опытов в этой области было меньше, чем в зонах над ковшом, где трубки выдерживали по несколько сливов.

Исследовался состав газовой фазы на содержание следующих компонентов:  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ . Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав газовой фазы при наполнении ковша чугуном

Точка отбора	Время от начала слива	Содержание компонентов, % об.				
		$O_2$	$CO_2$	$CO$	$H_2$	$CH_4$
1	2	3	4	5	6	7
1	1 мин	14,0	2,3	0	0	0
	2 мин	14,4	2,6	0,3	0	0
	В среднем за время отбора	14,2	2,45	0,15	0	0

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
2	1 мин	16,3	2,5	0	0	0
	2 мин	13,1	3,9	0,1	0	0
	3 мин	11,9	3,7	0,5	0,3	0
	4 мин	15,7	1,2	0,2	0,2	0
	В среднем за время отбора	14,25	2,83	0,2	0,13	0
3	1 мин	19,2	0,9	0	0	0
	2 мин	19,9	0,8	0	0	0
	3 мин	19,9	0,8	0	0	0
	В среднем за время отбора	19,7	0,83	0	0	0
4	1 мин	17,7	0,7	0	0	0
	2 мин	18,6	1,1	0	0	0
	3 мин	19,1	1,1	0	0	0
	В среднем за время отбора	18,47	0,97	0	0	0
5	1 мин	14,1	1,2	0	0	0
	2 мин	13,9	1,3	0	0	0
	В среднем за время отбора	14,0	1,25	0	0	0
6	1 мин	18,8	1,2	0	0	0
	2 мин	18,9	1,2	0	0	0
	3 мин	19,4	0,6	0	0	0
	4 мин	19,8	1,2	0,2	0	0
	5 мин	19,8	1,0	0,2	0	0
	В среднем за время отбора	19,34	1,04	0,08	0	0

При приближении к стенке ковша (точка 6) концентрация кислорода вновь возрастает до 19,34 %, что говорит о наличии в пристеночной области еще одной зоны всасывания. Наличие же в этой зоне углекислого газа и монооксида углерода говорит о том, что воздух в этой зоне проникает сравнительно неглубоко внутрь ковша и смешивается со встречным потоком выбросов.

Замеры в объеме ковша показали, что имеется также изменение содержания кислорода и других компонентов по высоте ковша и определенная динамика во времени. Так, на глубине 3 м (точка 1) содержание кислорода составило всего 14,2 % при высоком содержании диоксида и монооксида углерода, что свидетельствует о высокой интенсивности окислительных процессов. Вероятно, именно здесь расположена зона дымообразования.

Выше точки 1 (точка 2), на глубине 1 м, концентрация кислорода составляет в среднем 14,25 %, однако обращает на себя внимание динамика изменения этого фактора. В начале слива содержание кислорода составило 16,3 %, затем, по мере наполнения ковша, содержание кислорода снизилось до 11,9 %, а затем, к концу слива, вновь поднялось до 15,7 %. Это свидетельствует об изменении характера газодинамических процессов в этой зоне по мере подъема уровня металла.

### **Выводы**

1. Разработана математическая модель, вычислительный алгоритм и пакет прикладных программ аэродинамики факела выбросов, учитывающие смешанную конвекцию вблизи струи металла в приближении  $k - \varepsilon$  модели турбулентности.

2. Вычислительным экспериментом определены три основные аэродинамические зоны в полости ковша при его наполнении чугуном, установлено малое влияние тепловой конвекции на формирование факела выбросов.

3. Анализируя химический состав атмосферы в объеме ковша можно сделать выводы о характере движения газов, который качественно совпадает с результатами математического моделирования.

4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке рациональных режимов подавления бурого дыма при подаче нейтрального газа, что позволит улучшить экологическую обстановку на металлургических предприятиях.

### *Список литературы*

1. Кравец В. А. Подавление бурого дыма при переливах чугуна: монография / В. А. Кравец. – Донецк: Изд-во «УкрНТЭК», 2002. – 186 с.  
Kravets V. A. Podavleniye burogo dyma pri perelivakh chuguna: monografiya (Red fume suppression under cast iron overflow: monograph) / V. A. Kravets. – Donetsk: Izd-vo "UkrNTEK", 2002. – 186 s.
2. Огурцов А. П. Математическое моделирование процессов переноса в слитках и отливках с учетом внешних воздействий / А. П. Огурцов, Ф. В. Недопёкин, В. В. Белоусов // Днепродзержинский гос. техн. ун-т. – 1997. – 199 с.  
Ogurtsov A. P. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov perenosa v slitkakh i otlivkakh s uchetom vneshnikh vozdeystviy (Mathematical modeling of transfer processes in ingots and castings considering external actions) / A. P. Ogurtsov, F. V. Nedopekin, V. V. Belousov // Dneprodzerzhinskiy gos. tekhn. un-t. – 1997. – 199 s.
3. Launder B. E. The numerical computation of turbulent flow / B. E. Launder, D. B. Spalding // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 1974. – Vol. 3, № 2. – P. 269–288.
4. Роуч П. Вычислительная гидродинамика: пер. с англ. / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.  
Rouch P. Vychislitel'naya gidrodinamika: per. s angl. (Computational hydrodynamics: translated from English) / P. Rouch. – M.: Mir, 1980. – 616 s.
5. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2-х т.; пер. с англ. / Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 782 с.  
Anderson D. Vychislitel'naya gidromekhanika i teploobmen: v 2-kh t.; per. s angl. (Computational hydromechanics and heat exchange: in 2 vol.; translated from English) / D. Anderson, Dzh. Tannekhil, R. Pletcher. – M.: Mir, 1990. – 782 s.
6. Недопёкин Ф. В. Подавление выбросов при наполнении ковша металлом с учетом аэродинамических факторов / Ф. В. Недопёкин, В. А. Кравец, В. И. Саржевский // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. – № 9. – С. 69–71.  
Nedopekin F. V. Podavleniye vybrosov pri napolnenii kovsha metallom s uchetom aerodinamicheskikh faktorov (Emission suppression while ladle filling with metal considering aerodynamical factors) / F. V. Nedopekin, V. A. Kravets, V. I. Sarzhevskiy // Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. – 1998. – № 9. – S. 69–71.
7. Исследование влияния тепловой конвекции на распределение газовых потоков при переливах чугуна / Ф. В. Недопёкин, В. В. Белоусов, В. А. Кравец и др. // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену 19–23 мая 2008 г. – Минск, 2008: тезисы докладов и сообщений. – Т. 2. – С. 323–324.  
Issledovaniye vliyaniya teplovoy konveksii na raspredeleniye gazovykh potokov pri perelivakh chuguna (Study of thermal convection effect on gas flow distribution under cast iron overflow) / F. V. Nedopekin, V. V. Belousov, V. A. Kravets i dr. // VI Minskiy mezhdunarodnyi forum po teplo- i massoobmenu 19–23 maya 2008 g. – Minsk, 2008: tezisyy dokladov i soobshcheniy. – T. 2. – S. 323–324.
8. Проблемы экологии и техногенно-экологической безопасности: монография / под общ. ред. д.т.н., проф. А. Б. Ступина. – Донецк: ДонНУ, 2010. – 503 с.  
Problemy ekologii i tekhnogenno-ekologicheskoy bezopasnosti: monografiya (The problems of ecology and anthropogenic and ecological safety: monograph) / pod. obshch. red. d.t.n., prof. A. B. Stupina. – Donetsk: DonNU, 2010. – 503 s.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. П. Висоцький, АДІ ДонНТУ.

Стаття надійшла до редакції 10.07.12

**Ф. В. Недопьокін<sup>1</sup>, В. В. Белоусов<sup>1</sup>, В. А. Кравець<sup>2</sup>, В. В. Бодряга<sup>1</sup>**  
**1 – Донецький національний університет, м. Донецьк;**  
**2 – Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Макіївка**  
**Проблема підвищення екологічної безпеки під час перетоплювань чавуну**

Розглянуто математичну модель процесу ежекції повітря струменем рідини під час перетоплювань чавуну. Новизна моделі полягає в урахуванні змішаної конвекції поблизу струменя металу в наближенні  $k - \varepsilon$  моделі турбулентності. Експериментально показано, що основною причиною утворення факела викидів із ковша при його наповненні рідким чавуном є ежектування повітря струменем металу в об'єм ковша. При цьому повітря надходить до ковша переважно через зону всмоктування, що виникає навколо струменя металу.

ЕЖЕКЦІЯ, РОЗПОДІЛ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ, БУРИЙ ДИМ, ЧАВУН

**F. V. Nedopekin<sup>1</sup>, V. V. Belousov<sup>1</sup>, V. A. Kravets<sup>2</sup>, V. V. Bodryaga<sup>1</sup>**  
**1 – Donetsk National University, Donetsk;**  
**2 – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka**  
**Problem of Ecological Safety Improving during Iron Recasting**

At the present time ecological problems are the factors limiting ferrous metallurgy development. Particularly, one can refer to serious problems red fume pollution of air, namely fine-dispersed ferric oxides, suspended particles formed in the course of technological processes in the blast-furnace and steel-making plants.

The reason of red fume formation is cast iron small drops interaction of with gas phase oxygen. The effective solving of this problem is to make atmosphere of low oxygen content in the field of cast iron jet dispersion to prevent metal spray oxidation and to suppress red fume formation.

The mathematical model, the computational algorithm and the application package of aerodynamics of emission plume which consider mixed convection close to metal jet in  $k - \varepsilon$  turbulence model approximation are worked out. Three main aerodynamic fields in the ladle cavity when filled with cast iron are determined by the computing experiment.

On the basis of the analysis of the chemical content of the atmosphere in the ladle capacity the conclusion about the nature of gas flow which coincides with the results of mathematical modeling is made in the full-scale experiment carried out in Azovstal Iron and Steel Works.

EJECTION, GAS STREAM DISTRIBUTION, RED FUME, CAST IRON