

- А. Н. Коробочка // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. — 2008. — Вип. 32(73). — С.26—32.
- Вернигора В. Д. Исследование процесса мойки твердых частиц шлама абразивной обработки металлов / В. Д. Вернигора // Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий. Сб. науч. труд. КГМТУ. — Керчь : 2008. Вып 9. — С.137—140.
 - Вернигора В. Д. Очищення шламу абразивної обробки металів від мастильно-охолоджуючих рідин / В. Д. Вернигора // Збір. наук. праць ДДТУ (технічні науки). — Дніпродзержинськ. — 2010. — Випуск 2 (15). — С.46—50.
 - Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов Г. А. — М. : Машиностроение. 1981. — 184 с.

пост.13.05.2015

Компьютерное моделирование нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера при изменении положения фурмы

Е. Н. СИГАРЁВ, А. Н. СОКОЛ, Н. Н. НЕДБАЙЛО

Днепродзержинский государственный технический университет

С целью определения рациональных режимов нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера раздувкой ванны газовыми струями в работе предлагается усовершенствованная математическая модель, учитывающая влияние угла наклона сопел Лавалья и положения фурмы на распределение газошлакового потока в рабочем пространстве агрегата.

З метою визначення раціональних режимів нанесення шлакового гарнісажу на футеровку конвертера роздуванням ванни газовими струменями в роботі пропонується вдосконалена математична модель, що враховує вплив кута нахилу сопел Лавалья та положення фурми на розподіл газошлакового потоку в робочому просторі агрегату.

With the purpose of determination of the rational modes of slag skull causing on the lining of converter by blowing-free of bath by gas streams the improved mathematical model, taking into account influence of slope angle of Laval nozzles and lance position on distributing of slag stream in working space of aggregate, is in-work offered.

Постановка проблемы. Поддержание рабочего состояния огнеупорной футеровки и оптимального профиля рабочего пространства кислородного конвертера по ходу кампании обеспечивают проведением горячего ремонта с использованием отработанных приемов. Для корректировки и поиска рациональных режимов проведения операции горячего ремонта путем раздувки конечного шлака на футеровку целесообразно применение методов математического моделирования [1–3].

Актуальность. Экспериментальные исследования гидрогазодинамических особенностей раздувки ванны и формирования гарнисажного слоя на футеровке конвертера ограничены высокими температурами, дорогостоящих экспериментов и оборудования. В связи с этим актуальным представляется отработка рациональных режимов проведения операции раздувки путем адаптации разработанной математической модели на основании промышленных данных и результатов физического моделирования на холодных моделях конвертера [4] и последующего проведения серии вычислительных экспериментов. Возможность описания динамики взаимодействующих фаз (азот, шлаковые капли) [5] позволит исследовать и разработать рациональные варианты осуществления операции с минимизацией затрат времени и ресурсов.

Изложение основного материала. Базовая математическая модель, учитывающая возможность вращения двухсопловой наконечника гарнисажной фурмы с заданной скоростью вокруг вертикальной оси, описана

в работе [6]. В предлагаемой модели многосопловая (от 4-х до 6-ти сопел) гарнисажная фурма неподвижна относительно оси, в то же время учитывается возможность ее перемещения по высоте рабочего пространства. Математическая модель базируется на следующих допущениях:

1. Под действием отраженной от днища конвертера азотной струи в объеме шлаковой ванны образуется кратер, с границ которого отрываются капли шлака и образуют газошлаковый поток, имеющий форму конуса.

2. Поверхность днища конвертера принята плоской, расположенной перпендикулярно оси фурмы (рис.1).

3. Поток капель шлака, выносимых из кратера, пропорционален интенсивности вдувания азота на раздувку шлаковой ванны.

4. Задача расчета гидродинамических характеристик в конусе, образованном потоком шлаковых капель, принимается симметричной относительно высоты конуса; отклоняющим действием силы тяжести на поток шлаковых капель пренебрегаем.

5. Суммарное объемное содержание шлаковых капель в газовой фазе при рассматриваемых расходах азота небольшое, поэтому они рассматриваются как дисперсная фаза.

Первое и второе предположения позволяют учесть зависимость высоты нанесения слоя гарнисажа на стену конвертера от высоты и угла наклона сопел гарнисажной фурмы, что проиллюстрировано на рис. 1.

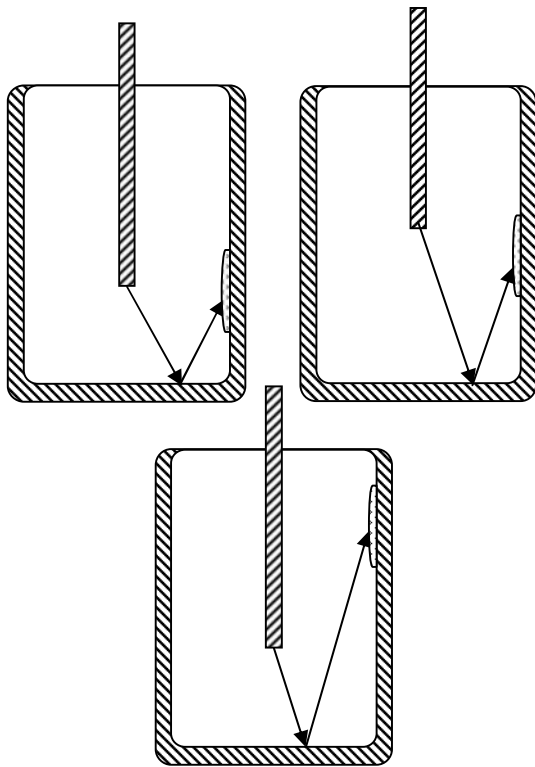


Рис. 1. Зависимость расположения шлакового слоя на стене от положения наконечника фурмы над уровнем дна конвертера

Третье предположение о пропорциональности величин потока азота и шлаковых капель даёт возможность исследовать влияние импульса струй, истекающих из сопел Лавала с различными критическими сечениями, на результаты операции раздувки. Четвёртое предположение, при использовании цилиндрической системы координат с осью, совпадающей с осью симметрии потока шлаковых капель, позволяет привести задачу к цилиндрически двумерной (точка в потоке параметризуется высотой и радиусом).

Математическая модель, с учётом допущений, построена следующим образом. Кроме несущей газовой фазы с объёмной плотностью α , учитывается дисперсная фаза — капли шлака характерного размера с объёмной плотностью η . Уравнение переноса шлаковой фазы в газшлаковом потоке имеет вид:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\eta \vec{v}_h) = \vec{\nabla} \cdot (D_h \vec{\nabla} \eta) + \chi \psi, \quad (1)$$

где \vec{v}_h — скорость фазы η ; D_h — эффективный коэффициент диффузии, учитывающий турбулентные составляющие; $\chi = \rho_g^0 / \rho_h^0$ — малый параметр; ψ — объёмная плотность источника шлаковой фазы.

Скорость газовой фазы \vec{v}_g и дисперсной фазы \vec{v}_h определяются из уравнений, запись с помощью разработанного программного обеспечения были проведены различными сериями вычислительных экспериментов с целью отработки рациональных режимов раздувки шлака. На рис. 2 приведены результаты численного моделирования следующих режимов при высоте наконечника

над уровнем ванны (H_Φ) и соотношении продолжительности подачи азота на каждой высоте (τ):

ных в приближении малой объёмной плотности дисперсной фазы (предположение 5) и несжимаемости газовой фазы:

$$\frac{d_g \vec{v}_g}{dt} = -\vec{\nabla} p' + \vec{\nabla} \cdot (\vec{v}^k v_g^k) - \vec{f}_D + \psi \vec{v}_g, \quad (2)$$

$$(\eta) \frac{d_h \vec{v}_h}{dt} = \chi f_D. \quad (3)$$

Тут $\frac{d_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \vec{\nabla}$ — субстанциональная производная i -й фазы (несущей газовой при $i = g$, или дисперсной при $i = h$); $p' = p / \rho_g^0$ — давление, нормированное на истинную плотность газа; \vec{v}^k — тензор эффективной кинематической вязкости, учитывающий турбулентные эффекты; \vec{f}_D — объёмная плотность силы межфазного взаимодействия газа и шлака, которая в предположении её пропорциональности квадрату межфазной скорости определяется выражением:

$$\vec{f}_D = -C_D \frac{|\vec{v}_{hg}|}{d} \vec{v}_{hg}, \quad (4)$$

в котором $\vec{v}_{hg} = \vec{v}_h - \vec{v}_g$ — скорость дисперсной фазы относительно несущей, C_D — коэффициент сопротивления и d — характерный размер капель шлака, являющихся дисперсной фазой.

Уравнения (2) – (3) замыкаются соотношением, вытекающим из закона сохранения массы, который в рассмотренном приближении несжимаемости газовой фазы и, в предположении малости параметра χ , (величина порядка 10^{-3}) запишется в виде:

$$\vec{\nabla} [\alpha \vec{v}_g + \eta \vec{v}_h] = -\psi. \quad (5)$$

При малом χ можно пренебречь правой частью уравнения (3), тогда получаем:

$$\frac{d_h \vec{v}_h}{dt} = 0. \quad (6)$$

Уравнения модели дополняются следующими граничными условиями. Для скоростей: в вершине газшлакового потока — скорости потока с учётом заданного угла раскрытия струи; на твердых поверхностях — условия непротекания; на оси симметрии — условия симметрии. Кроме того, на стенах конвертера — условия частичного прилипания, а на всех остальных границах — свободного скольжения. На η везде накладываются краевые условия $\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \eta|_S = 0$, где \vec{n} — вектор, перпендикулярный границе. Шлаковая фаза учитывается в объёме конвертера с помощью слагаемого ψ в уравнении (1), которое отлично от нуля только в вершине газшлакового потока, а его величина прямо пропорциональна массовому расходу азота, подаваемого на раздувку шлаковой ванны.

Предлагаемая модель реализована численно. Уравнения математической модели, записанные в цилиндрических координатах, аппроксимируются конечными разностями на шахматной сетке. Полученные

системы алгебраических уравнений решаются методом простой итерации.

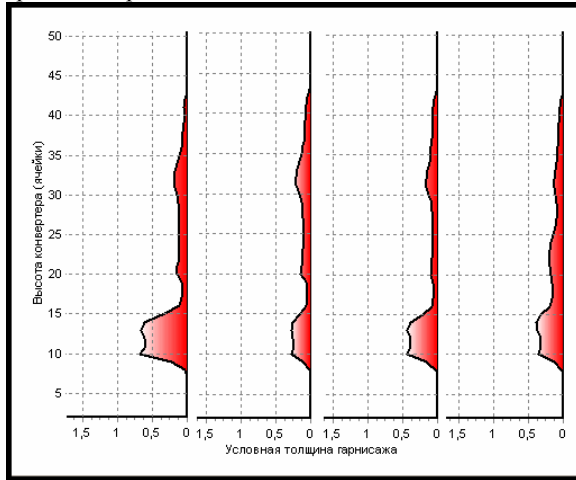


Рис. 2. Профиль слоя шлакового гарнисажа на стене для различных режимов раздувки шлака

- 1) $H_{\text{ф}}: 5 \text{ м}, 3 \text{ м}, 1 \text{ м}$ и $t: 1:1:1$.
- 2) $H_{\text{ф}}: 5 \text{ м}, 3 \text{ м}, 1 \text{ м}$ и $t: 1:2:3$.
- 3) $H_{\text{ф}}: 5 \text{ м}, 3 \text{ м}, 1 \text{ м}$ и $t: 1:1:2$.
- 4) $H_{\text{ф}}: 5 \text{ м}, 4 \text{ м}, 3 \text{ м}, 1 \text{ м}$ и $t: 1:1:1:2$.

Полученные профили нанесенного на стены слоя шлакового гарнисажа, представленные на рис. 2, позволяют сделать следующие выводы. При более продолжительном вдувании азота и расположении фурмы в крайнем нижнем положении (режим 4) обеспечивается наиболее равномерная толщина гарнисажного слоя по высоте стены конвертера. В случае необходимости нанесения слоя увеличенной толщины в наиболее изнашиваемой цапфенной области (в диапазоне ячеек 7-16 на рис. 2), предпочтительным является режим 1.

Трехмерное изображение распределения по высоте и диаметру, а также относительной толщины гарнисажного слоя, нанесенного по режиму 4, представлено на рис. 3.

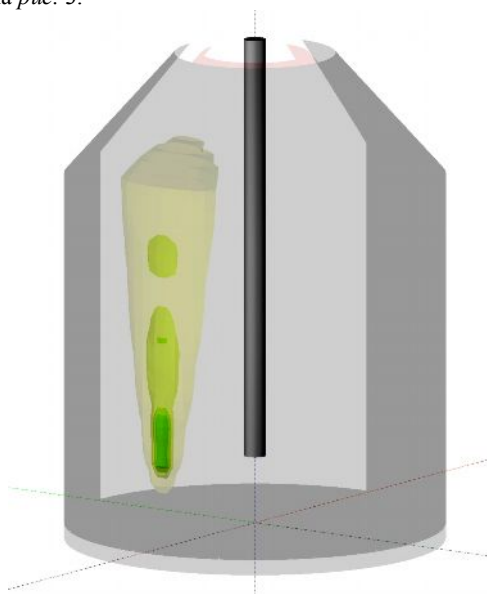


Рис. 3. Трёхмерное изображение распределения слоя шлакового гарнисажа на стене и конусной части конвертера для 4-го режима раздувки ванны (для одного сопла)

Выводы

Получила развитие ранее предложенная математическая модель, которая описывает нанесение шлакового гарнисажа путём раздувки конечного конвертерного шлака азотными струями на футеровку конвертера. В отличие от базовой модели учтена зависимость высоты нанесения гарнисажного слоя от угла наклона сопел наконечника фурмы и высоты его расположения над шлаковой ванной. С помощью созданного программного обеспечения проведены вычислительные эксперименты и предложены рациональные режимы ошлакования футеровки конвертера. В дальнейшем возможно развитие представленной математической модели в направлении учёта изменения геометрии днища и стен конвертера по ходу кампании, зависимости диаметра шлаковых капель от высоты фурмы над уровнем ванны и уточнения характеристик взаимодействия фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическая модель гидродинамических процессов в полости конвертера при продувке шлакового расплава газовыми струями / Е. В. Протопопов, Р. С. Айзатулов, А. Г. Чернятевич, С. Е. Самохвалов, Н. А. Чернышева, И. И. Богачева // Известия ВУЗов: Черная металлургия. — 1997. — № 2. — С. 5—9.
2. Процессы теплообмена в условиях нанесения шлакового гарнисажа и факельного торкретирования футеровки конвертеров. Математическая модель / Е. В. Протопопов, А. Г. Чернятевич, В. В. Соколов, О. С. Самохвалов, Е. А. Чубина // Известия ВУЗов: Черная металлургия. 2004. — № 10. — С. 8—13.
3. Математична модель гідродинамічних, тепло- та масопереносних процесів у порожнині конвертера під час факельного торкретування / А. М. Сокол // Тези доповідей міждержавної науково-методичної конференції „Проблеми математичного моделювання” (27–29 травня 2009 р., м. Дніпродзержинськ). — Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2009. — С. 119—120.
4. Гидродинамические закономерности нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / А. Г. Чернятевич, Е. А. Сигарев, Е. А. Чубина // Металлы и литье Украины. — 2005. — №3—4. — С. 45—47.
5. Огурцов А. П. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах / А. П. Огурцов, С. Е. Самохвалов — Київ: Наукова думка. — 2001. — 409 с.
6. Моделювання нанесення шлакового гарнисажу з метою оптимізації процесів гарячого ремонту футерівки конвертера / Сгарьов С. М., Чернятевич А. Г., Сокол А. М. // Математичне моделювання. 2011. — Дніпродзержинськ: ДДТУ. № 2(25). — С. 116—119.