

УДК 669.184

д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
Стародубцев Б. И.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОТСЕЧКИ ШЛАКА ПРИ ВЫПУСКЕ СТАЛИ ЧЕРЕЗ ГОРЛОВИНУ КОНВЕРТЕРА

Приведена методика силового расчёта рычажного механизма системы газодинамической отсечки конечного шлака при выпуске стали из кислородного конвертера с двумя осями вращения, позволяющая определить при заданных параметрах структурных элементов массу контргрузов, обеспечивающих автоматическое возвращение системы в исходное положение после завершения слива металла из плавильного агрегата в разливочный ковш. Расхождение между расчётными и экспериментально определёнными значениями суммарной массы контргрузов составило 5–10 %.

Ключевые слова: газодинамическая отсечка, кислородный конвертер, конечный шлак, газораспределительная камера, рычажный механизм, контргруз.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Отсечка конечного технологического шлака при выплавке стали в кислородных конвертерах является обязательной операцией, осуществляемой с целью устранения действия ряда негативных факторов, связанных с попаданием в разливочный ковш в значительном количестве агрессивного шлакового расплава (интенсивный износ огнеупорной футеровки, повышенный угар дорогостоящих раскислителей и лигатур, рефосфорация металла) [1].

Постановка задачи. Для удержания шлака в полости кислородного конвертера во время слива стали в разливочный ковш в настоящее время применяют различное специальное оборудование в зависимости от варианта реализуемого конвертерного процесса. Так, в конвертерах, имеющих в своей верхней части сталевыпускной канал, для его запираания в конечной стадии слива металла используют закреплённые на корпусе плавильного агрегата скользящие или поворотные затворы [2, 3], стопорные механизмы с пробками [4], а также элементы поплавкового типа, вводимые в ванну конвертера с помощью рядом с ним стоящего манипулято-

ра [5]. В конвертерах, конструкция которых предполагает слив продуктов плавки через горловину, указанные способы отсечки конечного шлака по известной причине не могут применяться. В связи с этим при создании плавильного агрегата, предназначенного для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов, у которого отсутствует сталевыпускной канал, требуется принятие нового технического решения, позволяющего обеспечить в автоматическом режиме бесшлаковый слив металла через горловину в разливочный ковш [6].

Изложение материала и его результаты. Сотрудниками кафедры «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии им. проф. Седуша В. Я.» Донецкого национального технического университета в результате исследований, проводимых с 2010 года, предложена новая система газодинамической отсечки конечного конвертерного шлака [7, 8], конструктивная схема которой показана на рисунке 1.

В состав системы входит два жёстко взаимосвязанных между собой коромысла 11 и 21, закреплённые с возможностью поворота на горизонтальном валу 13, установленном в подшипниковых опорах 12

и 20 перпендикулярно вертикальной плоскости, в которой лежит продольная ось симметрии корпуса конвертера. При этом коромысла снабжены направляющими С-образного сечения 8 и 22 с установленными в них роликами 5, имеющими возможность вращения на торцевых частях цилиндрической газораспределительной камеры 9, в корпусе которой выполнены щелевые отверстия 10. Сам корпус жёстко связан с одним концом газоподводящей трубы, другим концом закреплённой в шарнирной опоре 1 и посредством трубопровода 23 соединённой с запорным краном 19, размещённым на хвостовике горизонтального вала. При этом на задних концах коромысел имеются контргрузы 14 и 16, опирающиеся своей нижней частью на пружинные демпферы 17. На передних концах направляющих С-образного сечения посредством осей 2 и 6 закреплены рычаги 3 и 7. Конструкция узла крепления рычагов обеспечивает их жёсткую связь при силовом воздействии на них сверху и возможность относительного поворота на осях 2 и 6 при воздействии снизу.

Принцип работы в автоматическом режиме предложенной системы газодинамической системы следующий. После подачи сталевазной тележкой 3 разливочного ковша к плавильному агрегату для слива из него жидкой стали (рис. 2) корпус кислородного конвертера плавно поворачивают в вертикальной плоскости на цапфах в подшипниковых опорах с помощью электромеханического привода 11.

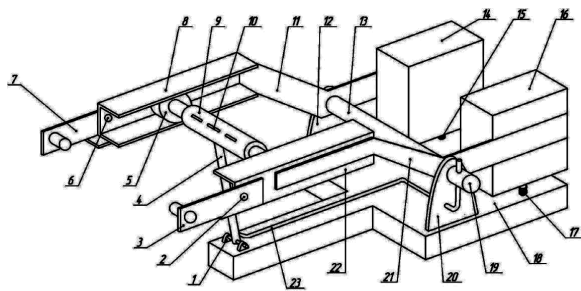


Рисунок 1 Общий вид системы газодинамической отсечки шлака

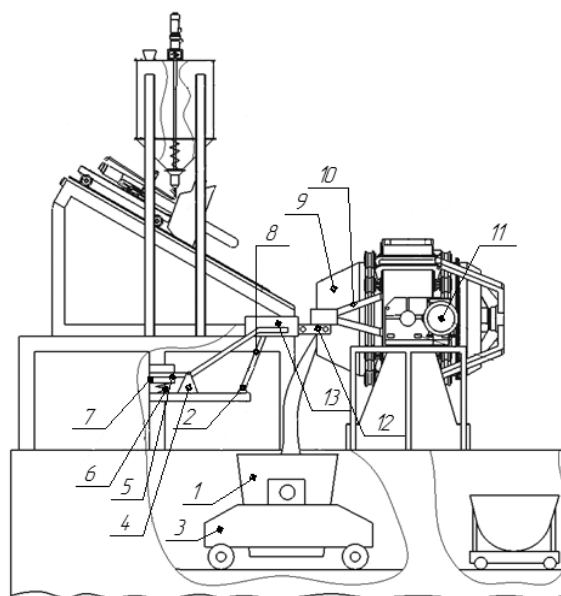


Рисунок 2 Относительное положение структурных механизмов конвертера во время выпуска стали с обеспечением газодинамической отсечки конечного шлака

В момент подхода зеркала расплава к устью горловины конвертера 9 упоры 10, неподвижно закреплённые на опорном кольце конвертера, входят в зацепление сверху с рычагами 12 и начинают их поворачивать вместе с коромыслами 5 и горизонтальным валом в подшипниковых опорах 4, преодолевая силу тяжести контргрузов 7. При повороте вала автоматически происходит открытие кинематически связанного с ним запорного крана, от которого по трубопроводу под избыточным давлением в полость цилиндрической распределительной камеры поступает газ (азот или воздух), истекающий из неё с большой скоростью через щелевые отверстия, образуя плоские газовые струи, направленные под определённым углом к зеркалу расплава. Под действием динамического напора этих струй происходит оттеснение от устья горловины в полость конвертера слоя шлака, плавающего на поверхности жидкого металла, который сливается в разливочный ковш. Во время дальнейшего поворота корпуса конвертера для полного слива металла упоры 10 будут воздействовать на рыча-

ги 12, поворачивая коромысла 5. Вместе с ними осуществляют поворот направляющие С-образного сечения 13, в результате чего цилиндрическая газораспределительная камера, посредством подающей трубы 8 связанная с шарнирной опорой 2, перемещается относительно направляющих на установленных роликах, закреплённых с возможностью вращения на её торцевых поверхностях. При этом автоматически обеспечивается заданное удаление щелевых отверстий газораспределительной камеры от зеркала металла в зоне устья горловины, что позволяет за счёт газодинамического напора удерживать шлаковый расплав в полости конвертера.

Проектированию опытного образца предложенной системы предшествовала разработка методики определения параметров её структурных элементов, при которых она должна не только чётко функционировать во время силового воздействия на её коромысла со стороны упоров, неподвижно закреплённых на корпусе агрегата, но и свободно возвращаться в исходное положение после завершения операции отсечки конечного технологического шлака.

Для выполнения силового расчёта рычажного механизма использовали принцип Даламбера, согласно которому подвижная система тел находится в каждый момент времени в равновесии под действием внешних сил, включая и силы инерции. Механизм разбили на две структурные группы (рис. 3). В состав последней группы (рис. 3, в) входят горизонтально расположенная газораспределительная камера, несущая на концах свободно вращающиеся ролики и жёстко связанная с верхним концом газоподводящей трубы, нижний конец которой установлен в шарнирной опоре, обеспечивающей ей поворот в вертикальной плоскости.

Во время возвращения системы в исходное положение на звенья рассматриваемой структурной группы действуют силы тяжести газораспределительной камеры с роликами и газоподводящей трубы, а также си-

лы сопротивления в роликовых и шарнирной опорах, вызванные силами реакций.

Выбираем систему координат для данной структурной группы, ориентируя направление оси y_1 перпендикулярно вертикальной плоскости симметрии роликовых опор газораспределительной камеры. От оси x_1 ведётся отсчёт угла поворота газоподводящей трубы φ_1 . Предварительно следует найти координаты центра тяжести рассматриваемой структурной группы $C_1(x_{C1}, y_{C1}, z_{C1})$, в котором приложена суммарная сила тяжести:

$$G_{C1} = 2G_p + G_{зк} + G_{зм},$$

где G_p — сила тяжести роликовой опоры;

$G_{зк}$ — сила тяжести газораспределительной камеры;

$G_{зм}$ — сила тяжести газоподводящей трубы.

Возникающие при повороте газоподводящей трубы с газораспределительной камерой вокруг оси y_1 с угловым ускорением ε_1 и угловой скоростью ω_1 касательная $F_{Ит_1}$ и нормальная $F_{Ин_1}$ силы инерции равны:

$$F_{Ит_1} = \frac{G_1}{g} \cdot a_{t_1}, \quad a_{t_1} = \varepsilon_1 \cdot r_{C_1},$$

$$F_{Ит_1} = \frac{G_1}{g} \cdot \varepsilon_1 \cdot r_{C_1};$$

$$F_{Ин_1} = \frac{G_1}{g} \cdot a_{n_1}, \quad a_{n_1} = \omega_1^2 \cdot r_{C_1},$$

$$F_{Ин_1} = \frac{G_1}{g} \cdot \omega_1^2 \cdot r_{C_1}.$$

где r_{C_1} — расстояние от оси вращения до центра тяжести системы C_1 ,

$$r_{C_1} = \sqrt{x_{C_1}^2 + y_{C_1}^2}.$$

Положение центра тяжести C_1 в плоскости $O_1X_1Z_1$ выражается через угол φ_1 :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{z_{C_1}}{x_{C_1}}; \quad \sin \varphi_1 = \frac{z_{C_1}}{r_{C_1}}; \quad \cos \varphi_1 = \frac{x_{C_1}}{r_{C_1}}.$$

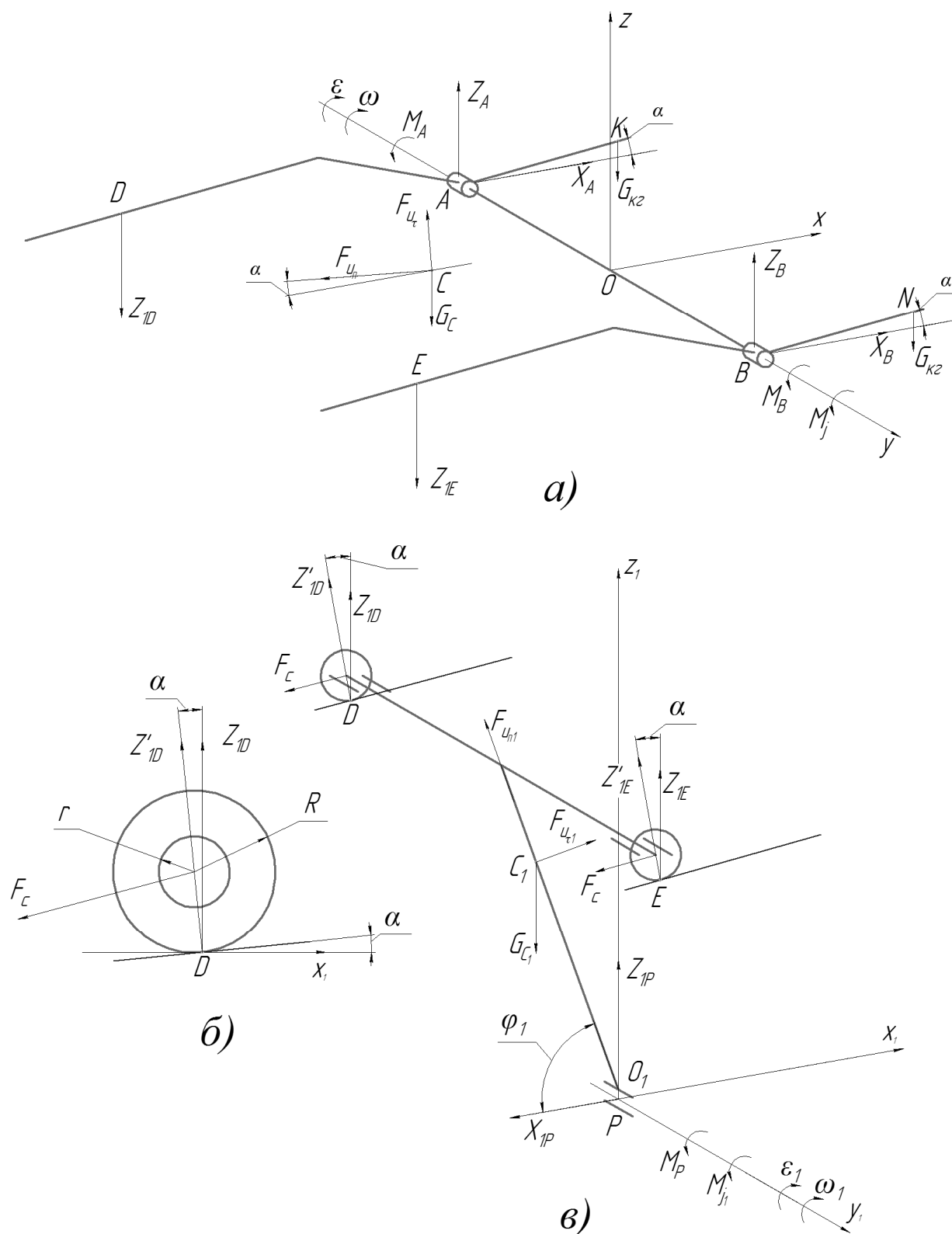


Рисунок 3 Расчётная схема механизма газодинамической отсечки шлака

Силы инерции $F_{Ит_1}$ и $F_{Им_1}$ приложены в точке L_1 , положение которой определяется по формуле:

$$L_1 C_1 = \frac{\rho_{C_1}^2}{r_{C_1}},$$

где ρ_{C_1} — радиус инерции системы относительно оси, проходящей через центр тяжести C_1 параллельно оси вращения.

Переносим силы $F_{Ит_1}$ и $F_{Им_1}$ в точку C_1 . Силу $F_{Им_1}$ переносим по линии действия. Силу $F_{Ит_1}$ переносим параллельно в точку C_1 с добавлением пары, момент которой равен:

$$M_{j_1} = F_{Ит_1} \cdot L_1 C_1 = \frac{G_1}{g} \cdot \rho_{C_1}^2 \cdot \varepsilon_1 = I_{C_1} \cdot \varepsilon_1,$$

где I_{C_1} — момент инерции поворотной структурной группы относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести C_1 параллельно оси y_1 ,

$$I_{C_1} = \frac{G_1}{g} \cdot \rho_{C_1}^2.$$

Момент M_{j_1} направлен в сторону, противоположную направлению вращения элементов структурной группы. Все силы инерции, действующие на поворотную группу, расположены в одной плоскости, перпендикулярной оси y_1 . На схеме обозначены: M_p — момент сопротивления, действующий в шарнирной опоре газоподводящей трубы; X_{1P} , Z_{1D} , Z_{1E} и Z_{1P} — соответствующие реакции в опорах D , E и P .

Учитывая симметричность рычажной системы относительно вертикальной плоскости $z_1 O_1 x_1$, принимаем $Z_{1D} = Z_{1E}$. При этом, в соответствии с рисунком 3,б, сила сопротивления движению ролика по С-образной направляющей равна:

$$F_c = Z_{1D} \cdot \left(\frac{\mu \cdot d + 2 \cdot k}{D} \right),$$

где μ — коэффициент трения цапф роликов;

k — коэффициент трения качения роликов;

d — диаметр цапф;

D — диаметр роликов.

Уравнения равновесия системы по законам статики имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= -2 \cdot Z'_{1E} \cdot \sin \alpha - X_{1P} - \\ &- F_{u_{n1}} \cdot \cos \varphi_1 + F_{u_{\tau 1}} \cdot \sin \varphi_1 - \\ &- 2 \cdot F_c \cdot \cos \alpha = 0; \\ \sum F_z &= 2 \cdot Z'_{1E} \cdot \cos \alpha + F_{u_{n1}} \cdot \sin \varphi_1 + \\ &+ F_{u_{\tau 1}} \cdot \cos \varphi_1 - G_{C_1} + Z_{1P} = 0; \\ \sum M_y &= M_p + M_{j_1} + G_{C_1} \cdot x_{C_1} - \\ &- F_{u_{\tau 1}} \cdot O_1 C_1 - 2 Z_{1E} \cdot \cos \alpha \cdot x_E + \\ &+ 2 \cdot F_c \cdot \cos \alpha \cdot (z_D + R) + \\ &+ 2 \cdot F_c \cdot \sin \alpha \cdot x_D = 0. \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где x_{C_1} , z_{C_1} , x_E , x_D , z_D — плечи сил.

В результате решения системы уравнений (I) находятся реакции в точках E , D , P .

При силовом расчёте второй группы, включающей С-образные направляющие и коромысла, связанные между собой валом, направление реакций в точках контакта E и D роликов с поверхностью направляющих изменяем на противоположное. Вместе с ними на элементы системы действуют сила тяжести контргрузов $G_{к2}$ и направляющих с рычагами G_C , моменты M_A и M_B от сил трения в подшипниковых опорах вала A и B , вызванные силами реакций X_A , Z_A , X_B , Z_B в этих опорах.

В выбранной системе координат определяются координаты центра тяжести $C(x_C, y_C, z_C)$, в котором приложена сила тяжести рассматриваемой системы.

Аналогично при повороте направляющих с рычагами вокруг оси z с угловым ускорением ε и угловой скоростью ω возникают касательная F_{u_τ} и нормальная F_{u_n} силы инерции, которые равны:

$$F_{u_\tau} = \frac{G_C}{g} \cdot a_\tau, \quad a_\tau = \varepsilon \cdot r_C, \quad F_{u_n} = \frac{G_C}{g} \cdot \varepsilon \cdot r_C;$$

$$F_{u_n} = \frac{G_C}{g} \cdot a_n, \quad a_n = \omega^2 \cdot r_C, \quad F_{u_n} = \frac{G_C}{g} \cdot \omega^2 \cdot r_C,$$

где r_C — расстояние от оси вращения до центра тяжести системы C ,

$$r_C = \sqrt{x_C^2 + z_C^2}.$$

Положение центра тяжести C выражается через угол α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{z_C}{x_C}; \quad \sin \alpha = \frac{z_C}{r_C}; \quad \cos \alpha = \frac{x_C}{r_C}.$$

Момент добавляемой пары сил при переносе силы инерции F_{u_τ} в точку C равен:

$$M_j = F_{u_\tau} \cdot LC = I_C \cdot \varepsilon,$$

где I_C — момент инерции поворотной системы относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести C ,

$$I_C = \frac{G_C}{g} \cdot \rho_C^2.$$

Момент M_j направлен в сторону, противоположную направлению вращения элементов выделенной системы. Все силы инерции, действующие на поворотную систему, расположены в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения направляющих y . Кроме того к системе приложены: M_A, M_B — моменты от сил трения в опорах A и B ; составляющие реакции в этих опорах $X_A, X_B, Z_A, Z_B; Z_{1E}, Z_{1D}$ — составляющие реакции в точках D и E , действующие со стороны элементов первой структурной группы.

Реакции в опорах A и B можно приравнять, т. к. рассматриваемая система симметрична. Это также относится и к реакциям в точках D и E :

$$X_A = X_B, Z_A = Z_B, \\ Z_{1E} = Z_{1D} = Z'_{1E} \cdot \cos \alpha.$$

Уравнения равновесия по законам статики имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= 2 \cdot X_B - F_{u_n} \cdot \cos \alpha + \\ &+ F_{u_\tau} \cdot \sin \alpha = 0; \\ \sum F_z &= 2 \cdot Z_B - 2 \cdot G_{\kappa 2} - 2 \cdot Z_{1E} + \\ &+ F_{u_n} \cdot \sin \alpha + F_{u_\tau} \cdot \cos \alpha = 0; \\ \sum M_y &= M_B + M_A + M_j - 2 \cdot G_{\kappa 2} \cdot x_N + \\ &+ 2 \cdot Z_{1E} \cdot x_E - F_{u_\tau} \cdot OC = 0. \end{aligned} \right\} \text{(II)}$$

где x_N, x_E — плечи сил.

Моменты сил трения в опорах горизонтального вала:

$$M_A = M_B = \mu_1 \cdot R_1 \cdot \sqrt{X_B^2 + Z_B^2};$$

где R_1 — радиус опор A и B ;

μ_1 — коэффициент трения скольжения в опорах A и B .

Решая систему уравнений (II), определяют реакции опор A и B , а также массу контргрузов $G_{\kappa 2}$, закреплённых на концах коромысел для возвращения элементов системы газодинамической отсечки в исходное положение.

С целью проверки правильности технических решений, принятых при создании новой системы газодинамической отсечки конечного шлака, и оценки корректности полученных зависимостей для расчёта её конструктивных и силовых параметров изготовили в масштабе 1:10 действующий модельный комплекс, включавший исследуемый рычажный механизм и обслуживаемый им кислородный мини-конвертер (рис. 4). Предварительно с использованием измеренных геометрических параметров элементов модели рычажного механизма и их весовых характеристик по предложенной методике рассчитали минимальные значения суммарной силы тяжести контргрузов, достаточные для возвращения моделируемой системы в исходное положение при имитации с её использованием процесса отсечки конечного шлака. Затем опытным путём с помощью сменного комплекса грузов с известной массой, последовательно закрепляемых на задние концы коромысел, фиксировали момент начала поворота всей механической системы в обратном направле-

нии при прекращении силового воздействия на неё со стороны упоров, жёстко связанных с опорным кольцом модели конвертера.



Рисунок 4 Фото моделей кислородного конвертера с двумя осями вращения и системы газодинамической отсечки шлака

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные зависимости могут использоваться при расчёте и проектировании промышленных образцов исследуемой системы, направление дальнейшего исследования которой будет связано с оснащением газораспределительной камеры поворотными щелевыми соплами, имеющими возможность автоматического поддержания заданного угла атаки истекающих плоских газовых струй при изменении положения рычажного механизма относительно горловин конвертера.

Библиографический список

1. Бойченко, Б. М. Конвертерное производство стали : теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология [Текст] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. — Днепропетровск : РВА «ДНЕПРО-ВАЛ», 2006. — 454 с.
2. Бесшлаковый выпуск плавки с помощью затвора выпускного отверстия ТАР 120 при производстве чистой стали [Текст] / У. Греф, А. Бергхофер, Г. Амсел и др. // *Сталь*. — 2005. — № 7. — С. 51–54.
3. Исследование и расчёт энергосиловых параметров системы поворотного затвора для отсечки шлака при выпуске стали из кислородного конвертера [Текст] / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, С. А. Бедарев и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2010. — № 3. — С. 102–106.
4. Энкер, Б. Новая стопорная система для шлака кислородно-конвертерного производства стали [Текст] / Б. Энкер, А. Пастер, Й. Швельбегер // *Металлургическое производство и технологии металлургических процессов*. — 2002. — № 5. — С. 12–20.
5. Howanski, William S. Optimizing B.O.F. Slag control throught the application of refractory darts / William S. Howanski, T. Kalep, T. Swift // *AISTech Proceedings*. — 2006. — № 1. — P. 601–609.
6. Еронько, С. П. Перспективы использования и проблематика создания мини-агрегата для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов [Текст] / С. П. Еронько, Н. А. Климович // *Чёрная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация»*. — 2016. — № 5. — С. 26–31.
7. Разработка автоматической системы газодинамической отсечки конечного шлака для конвертера с вращающимся корпусом [Текст] / С. П. Еронько, С. М. Горбатюк, Е. В. Ошовская и др. // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. — 2017. — Том 60. — № 11. — С. 863–869.
8. Пат. 2623934 Российская Федерация, МПК C21C 5/42. Кислородный конвертер для переработки чугуна и металлического лома с повышенным содержанием вредных примесей / С. П. Еронько, Н. А. Климович, С. М. Горбатюк // *Бюл. изобретений*. — 2017. — № 19.

© Еронько С. П.

© Ошовская Е. В.

© Стародубцев Б. И.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Сидоровым В. А.

Статья поступила в редакцию 02.04.18.

д.т.н Єронько С. П., к.т.н. Ошовська О. В., Стародубцев Б. І. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВІДСІЧЕННЯ ШЛАКУ ПІД ЧАС ВИПУСКУ СТАЛІ ЧЕРЕЗ ГОРЛОВИНУ КОНВЕРТЕРА

Наведено методику силового розрахунку важільного механізму системи газодинамічного відсічення кінцевого шлаку під час випуску сталі з кисневого конвертера з двома осями обертання, що дозволяє визначити при заданих параметрах структурних елементів масу контрвантажів, які забезпечують автоматичне повернення системи в початковий стан після завершення зливу металу з плавильного агрегату в розливний ківш. Розбіжність між розрахунковими й експериментально визначеними значеннями сумарної маси контрвантажів склала 5–10 %.

Ключові слова: газодинамічне відсічення, кисневий конвертер, кінцевий шлак, газорозподільна камера, важільний механізм, контрвантаж.

Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P., PhD Oshovskaya Ye. V, Starodubtsev B. I. (DonNTU, Donetsk, DPR)

CALCULATING THE PARAMETERS OF AUTOMATIC SYSTEM OF GAS DYNAMIC SLAG CUTOFF AT STEEL TAPING THROUGH THE VESSEL MOUTH

A technique for power calculating the linkage system of gas dynamic slag cutoff at steel tapping from the oxygen-blown vessel with two axis of rotation is given to determine under the set-up parameters of structural elements the mass of balance weight providing automatic resetting after metal is discharged from melting unit into a casting ladle. Divergence between calculated and experimentally defined values of total mass of balance weight is 5–10 %.

Key words: gas dynamic cutoff, oxygen-blown vessel, final slag, gas distribution chamber, linkage, balance weight.