

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Стародубцев Борис Игоревич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ОБОСНОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМОВ МИНИ-КОНВЕРТЕРА
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ
МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Донецк – 2019

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ЕРОНЬКО Сергей Петрович

Защита состоится «__» декабря 2019 года в __ часов на заседании диссертационного совета Д 01.019.03 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, 1.203.

Тел. факс: +380 (62) 304-30-55, эл. почта: uchensovet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке организации ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, интернет <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.019.03

А.В. Яковченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Научно-технический прогресс и постоянно растущие потребности населения способствуют ускоренному обновлению производственных фондов и замене физически и морально устаревшей техники, применяемой как в различных отраслях промышленности, так и в быту. В результате этого к началу третьего тысячелетия в мире накоплен огромный металлофонд – около 30 млрд. т стали. При этом за последние 20 лет неуклонно снижалась доля оборотного лома, являющегося наиболее чистым по вредным включениям, и увеличивалась доля амортизационного лома, загрязненного различного рода примесями.

Основная часть потенциальных ресурсов амортизационного лома сосредоточена в регионах с развитой тяжелой промышленностью, в которых возникла проблема его переработки. Для её решения разработана и реализуется концепция развития мини- и микро-заводов, которые дают возможность не только снизить расходы на добычу и подготовку сырья, сократить транспортные расходы, но и улучшить экологическую обстановку в регионах за счет переработки накопленных в отвалах вторичных материалов и отходов. В данных условиях возникает острая необходимость в создании высокоэффективных мини- плавильных агрегатов, позволяющих получать металл из шихты с повышенным содержанием вредных примесей.

Степень разработанности темы. В настоящее время за рубежом в условиях функционирования предприятий по переработке промышленных и бытовых металлсодержащих отходов нашли применение мини-плавильные агрегаты, большая часть которых работает по принципу Кал-До конвертера, т.е. имеют корпус, вращающийся относительно своей наклонной продольной оси с помощью привода, закреплённого на подвижной части самого агрегата.

На момент начала диссертационных исследований по данной теме (2016 г.) на кафедре МОЗЧМ был разработан и запатентован модернизированный вариант кислородного конвертера, снабжённого стационарно размещённым на рабочей площадке приводом механизма вращения корпуса, усовершенствованным механизмом качания фурмы для вдувания порошкообразных реагентов, а также дополнительно оборудованного системой газодинамической отсечки конечного шлака. При этом следует отметить, что методик определения параметров указанных механизмов нет в учебниках и монографиях, посвящённых расчёту и конструированию машин и агрегатов конвертерного производства, ранее изданных А.И. Целиковым, В.И. Явойским, В.А. Кудриным, В.И. Баптизманским, М.Я. Меджибожским, Б.М. Бойченко.

Цель и задачи исследования. Целью работы является совершенствование конструкции и обоснование энергосиловых параметров структурных механизмов, входящих в систему кислородного конвертера с двумя осями вращения, предназначенного для выплавки стали из некачественной шихты и металлсодержащих отходов.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- получение теоретических зависимостей для расчета энергосиловых параметров привода механизма вращения корпуса кислородного конвертера относительно наклонной продольной оси, стационарно размещенного на рабочей площадке со стороны свободной цапфы агрегата;

- разработка новой конструктивной схемы и теоретическое обоснование энергосиловых параметров механизма, обеспечивающего движение сопла наклонной фурмы в полости кислородного конвертера по траекториям, позволяющим эффективно использовать вводимые с ее помощью в ванну агрегата газопорошковые смеси;

- определение рациональных параметров системы газодинамической отсечки конечного шлака для реализации бесшлакового выпуска стали при ее переливе в разливочный ковш через горловину плавильного агрегата;

- выполнение экспериментальной проверки адекватности полученных зависимостей для расчета кинематических и энергосиловых параметров механизмов, входящих в состав усовершенствованного кислородного мини-конвертера;

- разработка практических рекомендаций по улучшению условий функционирования модернизированного сталеплавильного агрегата за счет дополнительного оборудования его системами донной продувки расплава аргоном и удаления газопылевых выбросов из рабочей зоны во время выпуска плавки;

- оценка технико-экономической эффективности предложенных технических решений.

Объект исследования. Мини-плавильные агрегаты для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов.

Предмет исследования. Конструктивные и энергосиловые параметры механизмов вращения конвертера относительно его наклонной продольной оси, качания наклонной продувочной фурмы и системы газодинамической отсечки конечного шлака, обеспечивающих эффективное функционирование усовершенствованного плавильного агрегата.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые разработана математическая модель механизма вращения корпуса конвертера относительно его наклонной продольной оси, включающая формулу для расчёта суммарного момента (M_0), действующего на привод данного механизма. Модель обеспечивает учёт смещения центров тяжести шихты в зависимости от вместимости конвертера и частоты вращения его корпуса.

2. Впервые разработана математическая модель комбинированного привода механизма качания наклонной фурмы системы вдувания порошкообразных реагентов в ванну конвертера, включающая формулы для расчёта момента сопротивления вращению эксцентрика (M_3), обеспечивающего качание фурмы в вертикальной плоскости, и силы, передаваемой шатуном (F_{III}) механизма качания фурмы в наклонной плоскости. Модель позволяет определить силовые параметры работы приводов в зависимости от заданного закона движения фурмы.

3. Впервые экспериментально установлена зависимость снижения скорости плоской свободной воздушной струи по её длине, истекающей из щелевого сопла, что позволяет обосновать его требуемое удаление от горловины кислородного

конвертера и размеры сопловой части системы газодинамической отсечки конечного шлака, при которых обеспечивается удержание шлакового расплава в полости плавильного агрегата при сливе стали в разливочный ковш.

Теоретическая значимость работы.

1. Установлены закономерности процесса перемещения тяжеловесного лома в полости кислородного конвертера и значения смещений центров масс жидкой и твёрдой составляющих шихты относительно продольной оси корпуса плавильного агрегата при различной частоте его вращения, вызывающих повышение технологической нагрузки на привод механизма, реализующего это вращение.

2. Описан механизм динамического взаимодействия с поверхностью жидкой ванны порошкообразных реагентов различной плотности, вдуваемых в полость конвертера в газовой струе через наклонную водоохлаждаемую фурму, благодаря чему предложен способ ввода легких фракций мелкодисперсных материалов под уровень расплава путем их нанесения равномерным слоем на участок огнеупорной футеровки непосредственно перед его погружением в жидкий металл.

3. Обоснованы условия возможности эффективного функционирования в автоматическом режиме системы газодинамической отсечки конечного шлака при выпуске стали из кислородного конвертера, предполагающие обеспечение постоянства угла атаки истекающей из щелевого сопла плоской газовой струи относительно поверхности шлакового расплава.

Практическая значимость работы. Оработаны новые методики экспериментальных исследований с применением физических моделей. Обоснованы параметры механизмов сталеплавильного агрегата, позволяющего перерабатывать некачественное сырье и металлосодержащие отходы, накопленные в отвалах. Результаты диссертационной работы в виде методик расчёта конструктивных и энергосиловых параметров механизмов, обеспечивающих эффективную работу модернизированного кислородного конвертера, переданы ГП «ДОНПКИ» для использования при разработках перспективных образцов технологического оборудования, предназначенного для реализации технологии переработки металлосодержащих промышленных отходов.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования базировались на фундаментальных положениях и методах теории машин и механизмов, механики жидкости и газа, а также САПР КОМПАС-3D. Экспериментальные исследования включали физическое моделирование изучаемых процессов с использованием методов тензометрирования для контроля силовых и скоростных параметров. При обработке полученных результатов использован метод математической статистики.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель механизма вращения относительно наклонной продольной оси корпуса мини-конвертера, позволяющая обосновать его энергосиловые параметры.

2. Математическая модель комбинированного привода механизма качания наклонной фурмы системы вдувания порошкообразных материалов в ванну конвертера, обеспечивающей улучшение условий взаимодействия реагентов, нахо-

дящихся в разном фазном состоянии во время ведения технологического процесса выплавки стали.

3. Установленная зависимость снижения скорости плоской свободной струи по мере удаления от щелевого сопла распределительной камеры, позволяющая назначить рациональные значения геометрических размеров системы газодинамической отсечки конечного шлака при выпуске стали через горловину кислородного конвертера.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждена данными экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных контрольно-измерительных средств, включающих тензометрические и аналого-цифровые преобразователи. При обработке данных измерений применен лицензионный программный продукт.

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены: на V Международной студенческой научно-практической конференции, 4 – 10 апреля 2016 года, г. Омск; на Международной научно-технической конференции, 13 – 14 октября 2016 года, г. Алчевск; на XVII Международной технической конференции «Автоматизация технических объектов и процессов. Поиск молодых учёных», 24 – 25 мая 2017 года, г. Донецк; на Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», 25 мая 2017 года, г. Донецк; на Международной научно-технической конференции «60 лет ДонГТУ. Наука и практика» 11 октября 2017 года, г. Алчевск; на Международной конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017», 17 ноября 2017 года, г. Череповец; на научно-технической конференции «Донбасс будущего глазами молодых учёных», 20 ноября 2018 года, г. Донецк.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе “Современное состояние и перспективы развития малой металлургии” выполнен анализ причин возникновения дефицита качественного металлолома и оценены возможность и перспектива использования в условиях мини- и микро-заводов специальных технологических агрегатов для выплавки стали из некачественной шихты, включающей металлосодержащие отходы.

В качестве базового образца при создании модернизированного плавильного агрегата взят разработанный на кафедре «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии» им. проф. В.Я. Седуша кислородный конвертер со стационарно размещенным приводом механизма вращения корпуса относительно наклонной продольной оси.

Во втором разделе “Совершенствование конструкции и обоснование параметров механизма вращения корпуса кислородного конвертера относительно его продольной оси” с целью получения исходной информации, необходимой для расчета мощности привода механизма вращения корпуса кислородного конвертера, на его прозрачной физической модели, изготовленной в масштабе 1:10 и совершавшей вращательное движение относительно продольной оси изучали характерное поведение твёрдой шихты в жидкой ванне в поперечной её плоскости. Для частот вращения корпуса модели 10 - 40 об/мин имитировали

движение как легковесного, так и тяжеловесного лома. Спрессованный в пакеты легковесный металлический лом и куски цельного тяжеловесного лома имитировали кубиками из пенопласта с размерами $20 \times 20 \times 20$ мм. При плотностях спрессованного лома $2 - 4 \text{ т/м}^3$, тяжеловесного лома $7,8 \text{ т/м}^3$ и жидкого металла 7 т/м^3 для обеспечения равенства значений критериев Архимеда с учетом того, что в качестве модельной жидкости использовали воду ($\rho = 1 \text{ т/м}^3$), кубики пенопласта с помощью свинцовых штифтов утяжеляли с таким расчётом, чтобы их средняя плотность при имитации легковесного и тяжеловесного лома соответственно составляла $0,4 - 0,5 \text{ т/м}^3$ и $1,1 \text{ т/м}^3$.

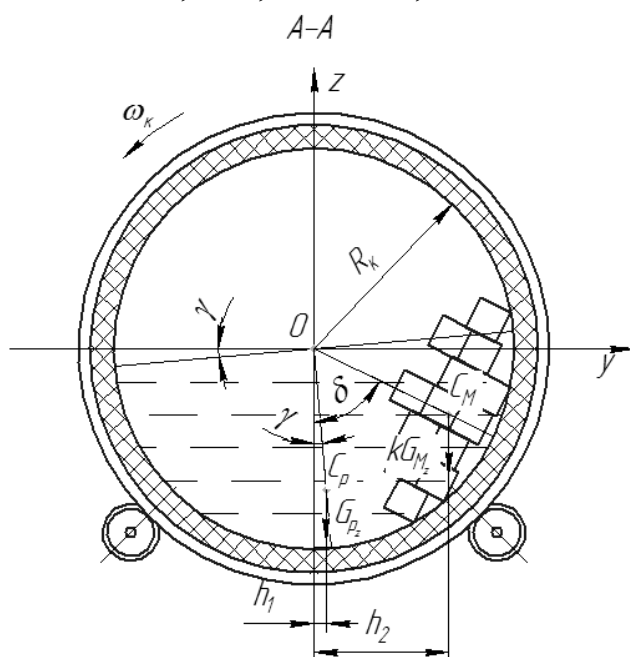


Рисунок 1. Схема расположения центра масс шихты в полости модели конвертера

Регистрация процессов движения внутри модели материалов, имитирующих твёрдые и жидкие компоненты шихты, выполненная с помощью видеосъёмки, и просмотр отснятого материала в режиме “стоп-кадр” позволили установить места расположения центра масс шихты в полости модели 10-тонного кислородного конвертера (Рисунок 1). При этом следует отметить отклонение свободной поверхности жидкой ванны модели конвертера от горизонтальной плоскости по ходу вращения ее корпуса на угол $\gamma = 2 - 5^\circ$, а также наблюдавшийся во время вращения корпуса модели в заданных пределах изменения угловой скорости челночный режим движения всей массы загруженных кубиков, имитирующих твердую часть шихты. Значения координат центров масс жидкой и твердой составляющих шихты для натурального образца конвертера, полученные путем пересчета, приведены в Таблица 1.

Таблица 1. Значение смещений центров масс жидкой и твёрдой составляющих шихты в зависимости от частоты вращения конвертера n_k и радиуса его полости R_k

n_k , об/мин.	δ , град.	γ , град.	OC_P , м	OC_M , м	h_1 , м	h_2 , м
10	45	2	$0,65R_k$	$0,69R_k$	$0,02R_k$	$0,49R_k$
20	60	3	$0,65R_k$	$0,65R_k$	$0,03R_k$	$0,56R_k$
40	75	5	$0,65R_k$	$0,62R_k$	$0,05R_k$	$0,60R_k$

Исходя из этого, суммарный статический момент сопротивления, преодолеваемый приводом при вращении корпуса конвертера во время ведения технологического процесса выплавки стали, должен включать три составляющие:

$M_0 = M_{тр} + M_{ст} + M_{сж}$. Здесь $M_{тр}$ — момент сил трения в опорах; $M_{ст}$ — момент, вызванный смещением центра тяжести тяжеловесного лома; $M_{сж}$ — момент, вызванный смещением центра тяжести объема расплава.

Первую составляющую момента сопротивления можно считать постоянной, а остальные две будут определяться силами тяжести твёрдой и жидкой части шихты и их смещением относительно продольной оси вращения агрегата. Указанные составляющие технологической нагрузки определили в соответствии с расчетной схемой, приведенной на Рисунок 2.

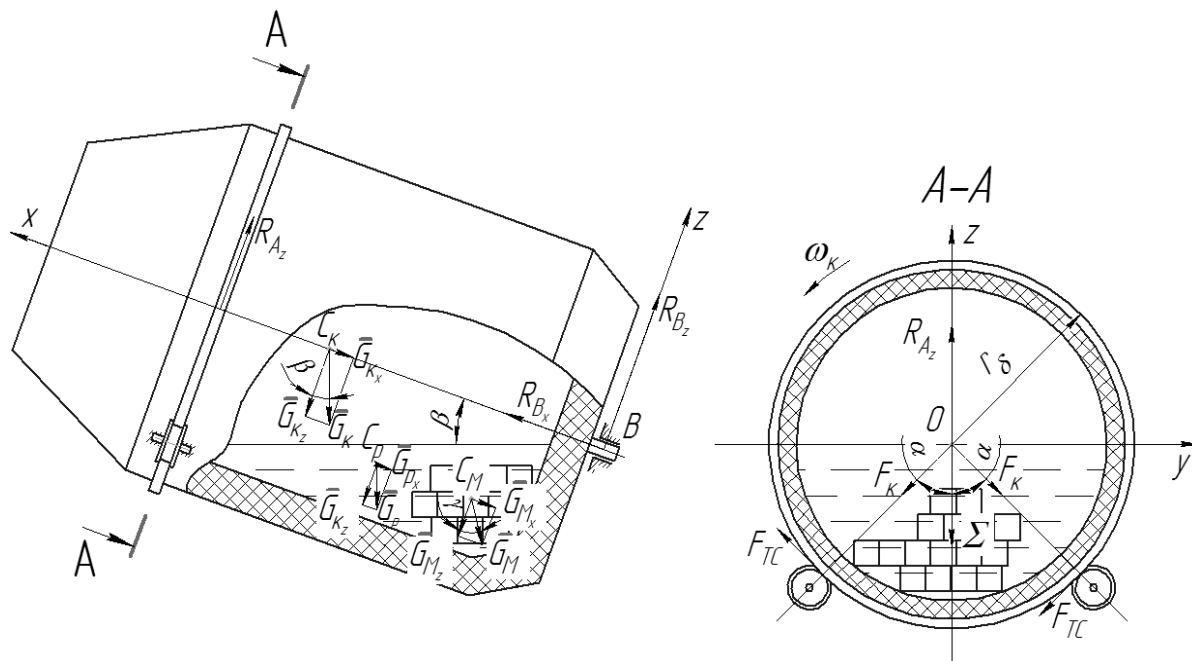


Рисунок 2. Расчётная схема для определения момента сопротивления вращению корпуса конвертера

Из условия равновесия плоской системы сил находим силу реакции R_{Az} , а затем R_{Bz} и R_{Bx} .

$$\sum_{i=1}^n F_{iz} = 0; R_{Bz} = G_{kz} + G_{pz} + G_{Mz} - R_{Az}; \sum_{i=1}^n F_{ix} = 0; R_{Bx} = G_{kx} + G_{Rx} + G_{Mx};$$

$$\sum_{i=1}^n M_B(\bar{F}_i) = 0; R_{Az} \cdot x_A - G_{kz} \cdot x_{C_k} - G_{pz} \cdot x_{C_p} - G_{Mz} \cdot x_{C_M} - G_{px} \cdot z_{C_p} - G_{Mx} \cdot z_{C_M} = 0;$$

$$R_{Az} = \frac{G_{kz} \cdot x_{C_k} + G_{pz} \cdot x_{C_p} + G_{Mz} \cdot x_{C_M}}{x_A} + \frac{G_{px} \cdot z_{C_p} + G_{Mx} \cdot z_{C_M}}{x_A};$$

По найденному значению R_{Az} , используя правило параллелограмма, находим силу F_k , действующую на каждый из двух опорных катков (Рисунок 3).

$$F_k = \frac{R_{Az}}{\sqrt{2(1 + \cos 2\alpha)}}.$$

Момент сил трения в опорах, поддерживающих корпус конвертера:

$$M_{тр} = M_1 + M_2 + M_3.$$

Здесь M_1 – момент сил трения в цапфах катков; M_2 – момент сил трения качения бандажа по каткам; M_3 – момент сил трения в подшипниковой опоре задней центрирующей цапфы.

$$M_1 = \frac{2 \cdot \mu_{ц} \cdot F_k \cdot r_{ц} \cdot r_{б}}{r_k}, \quad M_2 = 2F_{mk} \cdot f \cdot r_{б} / r_k, \quad M_3 = R_{Bz} \cdot \mu_{ц} \cdot r_{зц} + R_{Bx} \cdot \mu_{yn} \cdot r_{yn}.$$

В этих выражениях $\mu_{ц}$ – коэффициент трения скольжения в цапфе; $r_{ц}$ – радиус цапфы катка; r_k – радиус катка; $r_{б}$ – радиус бандажа корпуса конвертера; f – коэффициент трения качения бандажа по катку; $\mu_{ц}$ – коэффициент трения в задней цапфе; $r_{зц}$ – радиус задней цапфы; μ_{yn} – коэффициент трения в упорном подшипнике; r_{yn} – радиус упорного подшипника.

Дополнительные моменты сопротивления, действующие на корпус конвертера во время его вращения в установившемся режиме и обусловленные смещением центров масс жидкой ванны и объёма тяжеловесного лома относительно продольной оси агрегата (Рисунок 1), могут быть определены по формулам:

$M_{сж} = G_p \cdot h_1$ и $M_{ст} = k \cdot G_M \cdot h_2$. В этих выражениях G_p и G_M – силы тяжести объёмов жидкого чугуна и тяжёлого металлолома, соответственно; h_1 и h_2 – смещение центров масс жидкой и твёрдой частей шихты относительно оси вращения корпуса конвертера; k – коэффициент, учитывающий действие на куски металлолома выталкивающей силы Архимеда. Рекомендуемые значения смещений центров масс h_1 и h_2 в зависимости от частоты вращения корпуса конвертера n_k и радиуса его внутренней полости R_k приведены в Таблица 1 в соответствии с обозначениями Рисунок 1. После определения всех значений действующих моментов рассчитывают мощность приводного двигателя механизма вращения корпуса конвертера:

$$N_{дв} = \frac{M_0 \cdot \omega_K}{\eta_0},$$

где ω_K – максимальная угловая скорость корпуса конвертера; η_0 – общий КПД механизма, учитывающий потери мощности в зубчатых передачах, муфте и редукторе привода.



Рисунок 3. Модель конвертера с размещённым тензорезисторным преобразователем между задней цапфой и приводом

Экспериментальную проверку корректности полученных теоретических зависимостей выполнили на действующей модели конвертера (фото на Рисунок 3),

по характеристикам которой с использованием вышеприведенных формул рассчитали значения момента сопротивления вращению ее корпуса, а затем их измерили с помощью контрольно-измерительного комплекса, включавшего тензорезисторный преобразователь, усилитель переменного тока, аналого-цифровой преобразователь и ПЭВМ. В ходе эксперимента долю имитатора металлического лома дискретно изменяли в пределах 10 – 50 % для каждого значения частоты вращения корпуса модели. Частота и амплитуда пульсаций крутящих моментов зависели от угловой скорости вращения корпуса модели и количества загруженного в неё имитатора твёрдой части шихты, совершающего челночное движение относительно внутренней поверхности модели (Рисунок 4). С использованием результатов обработки экспериментальных данных построили графики зависимостей моментов сопротивления вращению корпуса модели конвертера для различных условий её работы (Рисунок 5).

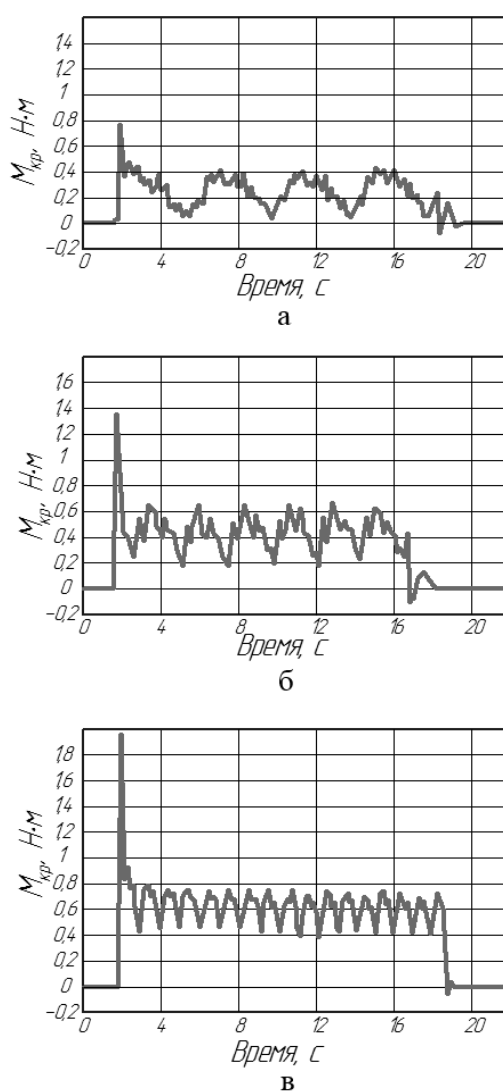


Рисунок 4. Сигналы, зарегистрированные при контроле крутящих моментов при частотах вращения корпуса модели конвертера: 10 об/мин (а), 20 об/мин (б) и 40 об/мин (в)

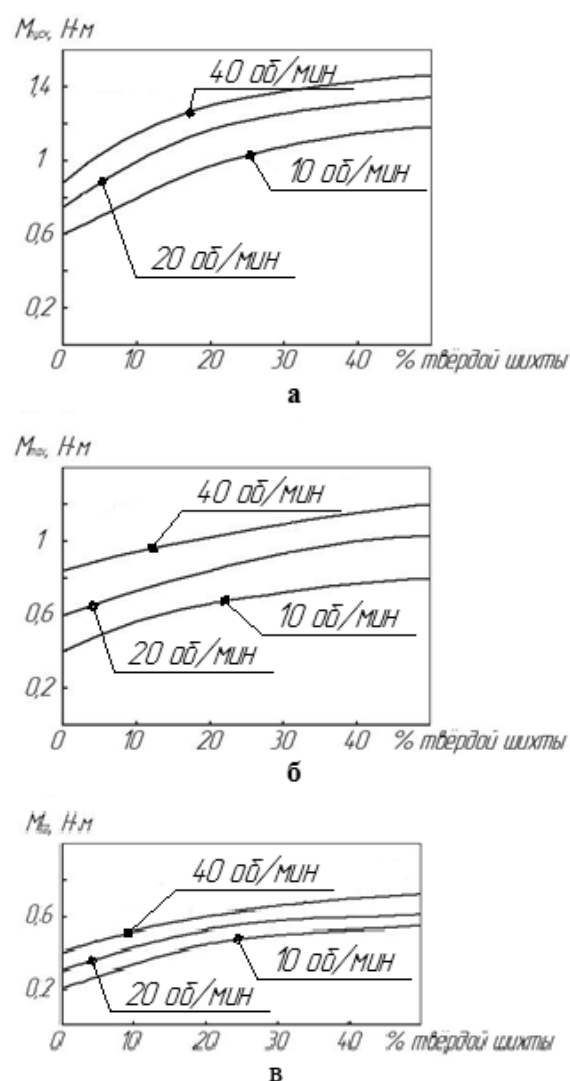


Рисунок 5. Графики зависимостей пускового (а), максимального (б) и среднего (в) крутящих моментов от процентного содержания имитатора тяжеловесного лома в ванне модели конвертера при различной скорости вращения ее корпуса

Расхождение расчетных и экспериментальных данных, полученных для привода механизма вращения корпуса модели кислородного конвертера, не превышает 10%, что позволяет использовать полученные теоретические зависимости для расчета привода промышленного образца модернизированного конвертера.

В третьем разделе «Совершенствование системы подачи в расплав мелкодисперсных реагентов в струе кислорода» для создания эффективной системы вдувания в полость конвертера порошкообразных реагентов изучали влияние на процесс взаимодействия с его ванной частиц подаваемого материала расстояния между срезом сопла фурмы и свободной поверхностью расплава, угла атаки истекающей из сопла газопорошковой струи, плотности долевого содержания составляющих вдуваемой смеси, а также её массового расхода. Качественную оценку степени влияния отмеченных факторов на динамическое взаимодействие твёрдой и жидкой фаз в зоне силового контакта струи с ванной плавильного агрегата выполнили на его прозрачной объёмной модели. Было обеспечено соотношение плотностей имитаторов флюсов и жидкой стали, близкое по значению к производственным условиям. Для десульфурации используют кальцинированную соду, а для дефосфорации – флюс на основе извести и оксида железа (43% CaO, 43% окалина, 14% CaF₂), отношение плотностей указанных материалов к плотности расплава составляет 0,3 и 1,1. В условиях лабораторного эксперимента для поддержания в отмеченных пределах отношения плотностей имитаторов компонентов флюсовой смеси и воды, моделирующей жидкий металл, необходимы материалы с плотностью 0,3 и 1,1 г/см³ соответственно. При масштабе скорости $a_v = (a_1)^{1/2}$ должно соблюдаться равенство критериев Архимеда для натурального образца и его модели. Эти материалы должны иметь цвет, который позволял бы получать контрастную картину протекающих процессов, фиксируемую при видеосъёмке. Отмеченным условиям в наибольшей мере отвечали измельчённые частицы древесного угля и полиэтилена плотностью 0,25 и 1,05 г/см³. Размер частиц находился в пределах 0,1 – 1 мм. Имитатором шлакового расплава выступало минеральное масло, имеющее плотность 0,8 г/см³. В процессе вдувания в полость конвертера мелкодисперсной извести имитировавшие её частицы древесного угля, плотность которых была в несколько раз меньше плотности воды, после удара о свободную поверхность отражались от неё под различным углом и продолжали движение в направлении донной части модели плавильного агрегата (Рисунок 6а). Если в состав смеси наряду с имитатором извести входили частицы полиэтилена с плотностью, близкой к плотности воды, моделировавшей жидкий металл, некоторая часть легковесного материала увлекалась частицами полиэтилена на небольшую глубину относительно границы раздела вода-масло. Так при наличии в смеси 25% частиц полиэтилена и 75% частиц древесного угля заглубление последних в воду составляло порядка 5-8 мм (Рисунок 6б).

С увеличением доли частиц полиэтилена в смеси, имитирующего окалину в составе флюса, вдуваемого в производственных условиях с целью дефосфорации выплавляемого металла, глубина проникновения частиц древесного угля в толщу воды увеличивалась. Например, для смеси, включавшей в равных долях частицы полиэтилена и древесного угля, глубина проникновения имитатора извести в воду достигала 20-25 мм (Рисунок 6в).

Для ввода в расплав легковесных реагентов, вдуваемых в струе кислорода, нужен другой вариант работы фурмы, предполагающий нанесение с ее помощью на поверхность участка футеровки конвертера равномерным слоем порошкообразного материала, благодаря приданию ей движения по сложной траектории (фото на Рисунок 7). При вращении корпуса агрегата находящиеся на поверхности футеровки частицы материала будут погружаться под уровень расплава, что улучшит условия для протекания химических реакций, связанных с выведением из него вредных включений.

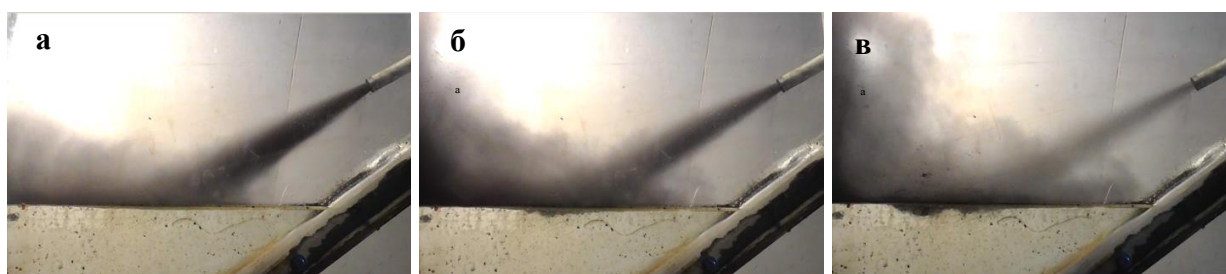


Рисунок 6. Характер взаимодействия с поверхностью жидкой ванны газопорошковой струи при различной плотности частиц вдуваемого материала

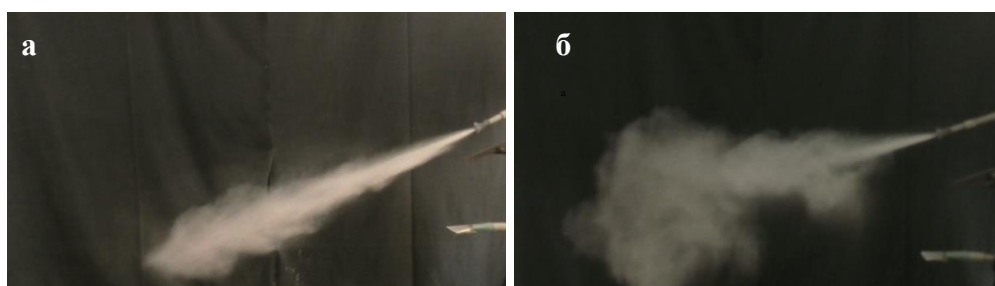


Рисунок 7. Визуализированные формы зон, заполненных газо-порошковой смесью, истекающей из сопла фурмы, находящейся в статическом состоянии (а) и совершающей движение при совместной работе двух приводов качания (б)

С учетом результатов лабораторных экспериментов разработали совершенствованную систему подачи в рабочее пространство порошкообразных реагентов, вдуваемых в струе кислорода через водоохлаждаемую фурму.

Конструктивная схема усовершенствованной системы приведена на Рисунок 8. Фурма 1 верхней своей частью закреплена на поворотной опоре в обойме 8 и с помощью кривошипно-шатунного механизма 6 может совершать качания относительно каретки в пределах продолговатого отверстия колпака 2, жестко связанного с кареткой 5, опирающейся ходовыми роликами 4 на наклонные рельсы 3. В свою очередь обойма 8 вместе с удерживаемой ею фурмой 1 имеет возможность поворота относительно платформы в вертикальной плоскости на определённый угол с помощью кулачка 7, установленного на выходном валу мотора-редуктора 9, закреплённого на поворотной опоре. Благодаря наличию кривошипно-шатунного и кулачкового механизмов, фурме, снабжённой в нижней своей части соплом, обеспечена возможность качаний относительно каретки в двух плоскостях одновременно, когда включены в работу оба механизма, или порознь, если

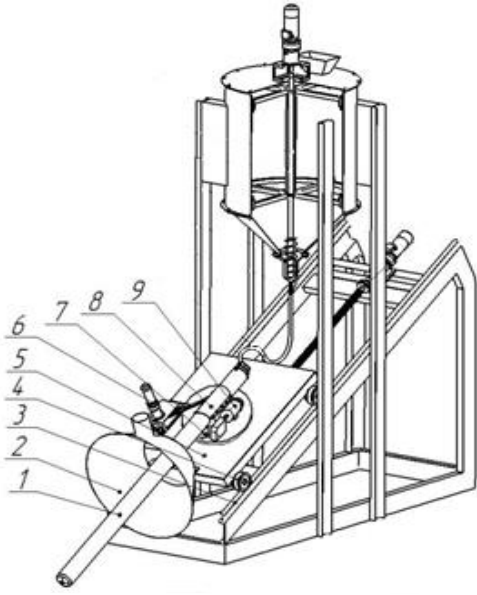


Рисунок 8. Конструкция предложенной системы верхней продувки металла в конвертере газопорошковыми смесями

привод одного из них отключен. В зависимости от комбинации амплитуд и частот качаний фурмы в 2-х взаимно перпендикулярных плоскостях, результирующая траектория движения её сопла имеет сложную форму, благодаря чему обеспечивается равномерная подача мелкодисперсных материалов на внутреннюю поверхность плавильного агрегата.

Для выполнения силового расчёта механизмов, обеспечивающих перемещение в пространстве кислородной фурмы, использовали принцип Даламбера. Зависимости находили используя расчетную схему (Рисунок 9), на которой отображена кинематика обоих механизмов, обеспечивающих качание фурмы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Система уравнений, описывающих равновесие фурмы по законам статики при ее качании эксцентриковым механизмом в вертикальной плоскости, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_{ix} &= X_A - F_{un} \cdot \cos \alpha_i - F_{unl} \cdot \cos \alpha_i \pm F_{ur} \cdot \sin \alpha_i - G_\phi \sin \alpha_i - G_{mp} \cdot \sin \alpha_i = 0; \\ \sum F_{iz} &= Z_A + Z_B \pm F_{unl} \cdot \sin \alpha_i - G_\phi \cdot \cos \alpha_i \pm F_{ur} \cdot \cos \alpha_i \pm F_{un} \cdot \sin \alpha_i - G_{mp} \cdot \cos \alpha_i = 0; \\ \sum M_y &= G_\phi \cdot AC \cdot \cos \alpha_i \pm F_{ur} \cdot AC \pm M_A + Z_B \cdot AB \cdot \cos \alpha_i + G_{mp} \cdot AC_3 \cdot \cos \alpha_i \pm M_j = 0; \\ \sum M_z &= \pm F_{ur} \cdot AC \pm X_A \cdot h_1 = 0. \end{aligned} \right\} (2)$$

Здесь G_ϕ , G_{mp} – сила тяжести фурмы и трубопровода соответственно; F_{un} , F_{ur} , F_{unl} , F_{ur} – силы инерции, возникающие при повороте фурмы относительно шарнира A и платформы вокруг оси ED ; AC , AC_3 , h_1 – плечи сил; M_A – момент сил трения в опоре A ; M_j – момент инерционных сил; X_A , Z_A , Z_B – составляющие реакций в опорах A и B ; α_i – угол наклона фурмы в заданный момент.

В результате решения системы уравнений (2) находят значения реакций опор X_A , Z_A и Z_B . По найденному значению Z_B определяют текущее значение момента сопротивления вращению эксцентрика. Принимая условие, что проскальзывание при взаимодействии роликов с эксцентриком отсутствует, можно записать:

$$M_{\varepsilon_i} = \left(\frac{\mu \cdot Z_B \cdot r_{up}}{r_p} \right) \cdot r_{\varepsilon_i};$$

Здесь μ – коэффициент трения скольжения, в опорах цапф роликов; r_{up} – радиус цапф роликовых опор фурмы; r_p – наружный радиус ролика; r_{ε_i} – текущее значение радиуса эксцентрика в точке его контакта с роликами опоры B фурмы. Мощность приводного двигателя следует рассчитывать по максимальному значению M_{ε_l} , так как пуск механизма может осуществляться из любого его текущего положения.

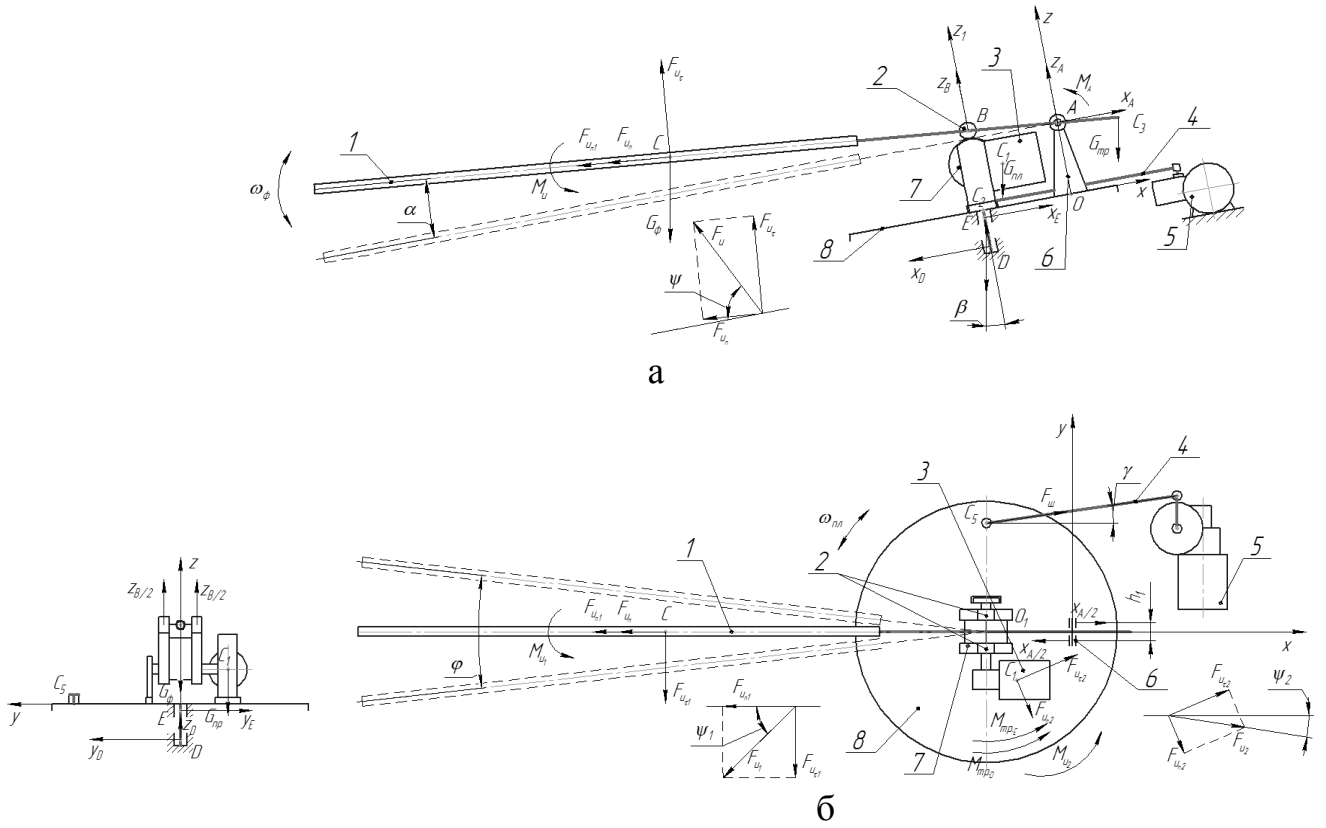


Рисунок 9. Расчётные схемы механизма качения фурмы в вертикальной плоскости (а) и поворота несущей платформы (б): 1 – фурма; 2 – ролики; 3 – привод кулачкового механизма; 4 – шатун; 5 – привод кривошипно-шатунного механизма; 6 – шарнирная опора; 7 – эксцентрик; 8 – поворотная платформа

Система уравнений, описывающих равновесие платформы с кривошипно-шатунным механизмом качения фурмы в наклонной плоскости, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}
 \sum F_{ix} &= X_E - X_D - X_A + F_{u1} \cdot \cos \gamma_i - F_u \cdot \cos \psi_i - F_{u1} \cdot \cos \psi_{i1} + F_{u2} \cdot \cos \psi_{i2} - G_{nl} \cdot \cos \beta - \\
 &- G_\phi \cdot \sin \beta = 0; \\
 \sum F_{iy} &= Y_D - Y_E + F_{u1} \cdot \sin \gamma_i - F_{u1} \cdot \sin \psi_{i1} + F_{u2} \cdot \sin \psi_{i2} = 0; \\
 \sum F_{iz} &= Z_D - Z_B - Z_A - G_{nl} \cdot \cos \beta - G_\phi \cdot \cos \beta + F_u \cdot \sin \psi_i = 0; \\
 \sum M_x &= G_{nl} \cdot \cos \beta \cdot x_{C1} - Y_E \cdot z_E + Y_D \cdot z_D + F_{u1} \cdot \sin \psi_{i1} \cdot z_C - F_{u2} \cdot \sin \psi_{i2} \cdot z_{C1} = 0; \\
 \sum M_y &= X_D \cdot z_D - Z_B \cdot y_B - X_A \cdot z_B - X_E \cdot z_E + Z_D \cdot x_D + G_{nl} \cdot \cos \beta \cdot x_{C1} - G_{nl} \cdot \sin \beta \cdot z_C + \\
 &+ F_{u2} \cdot \sin \psi_{i2} \cdot z_{C1} - F_{u1} \cdot \cos \psi_{i1} \cdot z_C + F_u \cdot \sin \psi_i \cdot x_C - F_u \cdot \cos \psi_i \cdot z_C - M_u = 0; \\
 \sum M_z &= Y_E \cdot x_E - Y_D \cdot x_D - G_{nl} \cdot \sin \beta \cdot y_{C1} - F_{u1} \cdot \cos \gamma \cdot y_{C5} + F_{u2} \cdot \sin \psi_{i2} \cdot x_{C1} + \\
 &+ F_{u2} \cdot \cos \psi_{i2} \cdot y_{C1} + F_{u1} \cdot \sin \psi_{i1} \cdot x_C + M_{u1} + M_{u2} + M_{mpE} + M_{mpD} = 0.
 \end{aligned} \right\} (3)$$

Здесь G_{nl} – сила тяжести платформы и привода кулачкового механизма, приложенная в точке C_1 ; F_u , F_{u1} , F_{u2} – результирующие силы инерции; ψ_i , ψ_{i1} , ψ_{i2} – углы между результирующими силами инерции и их проекциями на ось X ; M_u , M_{u1} , M_{u2} – моменты сил инерции при качательном движении фурмы, наклоне фурмы и повороте платформы с приводом соответственно; x_C , x_{C1} , x_D , x_E , y_B , y_{C1} ,

$z_{C5}, z_B, z_C, z_{C1}, z_D, z_E$ – плечи сил, M_{mpD}, M_{mpE} – моменты сил трения в опорах D и E ; $X_A, X_D, X_E, Y_D, Y_E, Z_A, Z_B, Z_D$ – соответствующие реакции в опорах; $F_{ш}$ – сила, действующая в шатуне.

В результате решения системы уравнений (3) находят текущие значения силы $F_{ш}$ и по ним рассчитывают крутящий момент на тихоходном валу мотор-редуктора при заданной длине кривошипа $R_{кр}$:

$$M_{кр_i} = F_{ш_i} \cdot R_{кр} \cdot \cos \delta_i ,$$

где δ_i – текущее значение угла поворота кривошипа.

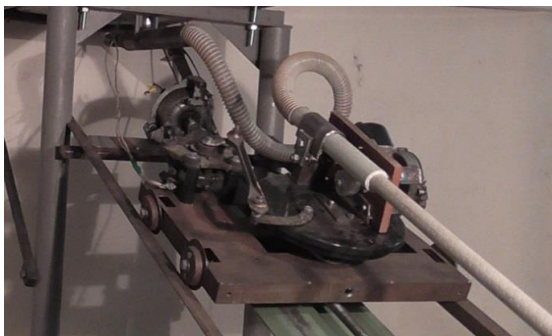


Рисунок 10. Действующая модель устройства системы с комбинированным приводом

наклеенных на шатун (фото на Рисунок 11).

Предложенные расчётные значения силовых параметров комбинированного механизма качания фурмы проверили на адекватность, сравнив их с экспериментальными данными, полученными на действующей модели, изготовленной в масштабе 1:2 (фото на Рисунок 10). Контроль крутящего момента,

развиваемого эксцентриковым приводом осуществляли с помощью тензорезисторного преобразователя, а силу, передаваемую шатуном, измеряли с помощью тензо-датчиков



Рисунок 11. Шатун с наклеенными датчиками

Анализируя записи сигналов, зарегистрированных при контроле силы, преодолеваемой шатуном механизма поворота несущей платформы, установлены следующие особенности. При выключенном кулачковом механизме на значение силы, действующей в шатуне механизма поворота несущей платформы, влияет частота вращения его кривошипа. Включение в работу кулачкового механизма качания фурмы в вертикальной плоскости, установленного на несущей платформе, оказывает заметное влияние на силу сопротивления, действующую на шатун механизма её поворота. Причём это влияние растёт с увеличением частоты качания фурмы в горизонтальной плоскости. Сопоставление результатов измерений крутящего момента на валу кулачка механизма качания фурмы в вертикальной плоскости с расчётными данными показало, что расхождение между ними находится в пределах 2 - 10%, т.е. полученные расчётные зависимости в достаточной мере являются корректными.

В четвёртом разделе «Расчёт и конструирование системы газодинамической отсечки конечного технологического шлака для конвертера с вращающимся корпусом» разработали конструкцию системы газодинамической отсечки

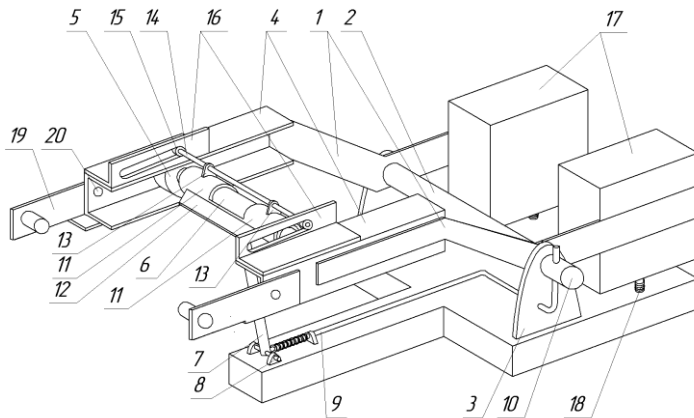


Рисунок 12. Общий вид системы газодинамической отсечки шлака

ки конечного конвертерного шлака, в составе конвертера с двумя осями вращения, выпуск продуктов плавки в котором осуществляется через его горловину (Рисунок 12).

Конструкция данной системы включает в себя коромысла 1, которые закреплены посредством горизонтального вала 2, расположенного в подшипниковых опорах 3. К коромыслам крепятся С-образные направляющие 4, по которым

двигаются ролики 5, несущие газораспределительную камеру 6. Полая штанга 7 закреплена в шарнирной опоре 8, к которой подключён газоподводящий трубопровод 9. Запорный кран трубопровода 10 открывается посредством наклона коромысел. На газораспределительной камере надета гильза 11, с расположенным на ней щелевым соплом 13. На гильзе установлены проушины 13, через которые продета ось 14 с роликами 15, двигающимися в наклонных пазах планок 16. Система обеспечивает постоянство угла атаки истекающей из щелевого сопла плоской газовой струи по мере поворота газораспределительной камеры и автоматически возвращается в исходное положение за счёт контргрузов 17, опускающихся на пружинные демпферы 18. Силовое воздействие упоров конвертера на рычажный механизм системы передаётся через рычаги 19, закреплённые на осях 20.

Для проектирования опытного образца предложенной системы разработали методику определения параметров её структурных элементов. При выполнении силового расчёта рычажного механизма использовали принцип Даламбера. Механизм разбили на две структурные группы (Рисунок 13), для каждой из которых составили уравнения равновесия.

Для первой структурной группы (Рисунок 13в):

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= -2 \cdot Z'_{1E} \cdot \sin \alpha - X_{1P} - F_{u_{n1}} \cdot \cos \varphi_1 + F_{u_{\tau 1}} \cdot \sin \varphi_1 - 2 \cdot F_c \cdot \cos \alpha = 0; \\ \sum F_z &= 2 \cdot Z'_{1E} \cdot \cos \alpha + F_{u_{n1}} \cdot \sin \varphi_1 + F_{u_{\tau 1}} \cdot \cos \varphi_1 - G_{C1} + Z_{1P} = 0; \\ \sum M_y &= M_P + M_{j1} + G_{C1} \cdot x_{C1} - F_{u_{\tau 1}} \cdot O_1 C_1 - 2 Z_{1E} \cdot \cos \alpha \cdot x_E + \\ &+ 2 \cdot F_c \cdot \cos \alpha \cdot (z_D + R) + 2 \cdot F_c \cdot \sin \alpha \cdot x_D = 0. \end{aligned} \right\} (4)$$

Здесь G_{C1} – суммарная сила тяжести роликовой опоры, газораспределительной камеры, газоподающей трубы; X'_{1P} , Z'_{1E} , Z_{1P} , Z_{1E} – составляющие реакций в опорах; F_c – сила сопротивления движению ролика; $F_{u_{n1}}$, $F_{u_{\tau 1}}$ – нормальная и касательная силы инерции; M_P – момент сопротивления, действующий в шарнирной

опоре; M_{j1} – момент, вызванный касательной силой инерции; $R, O_1C_1, x_{C1}, x_D, x_E, z_D$ – плечи сил. В результате решения системы уравнений (4) нашли реакции в опорах E, D, P , которые использовали при силовом расчёте второй группы (Рисунок 13а).

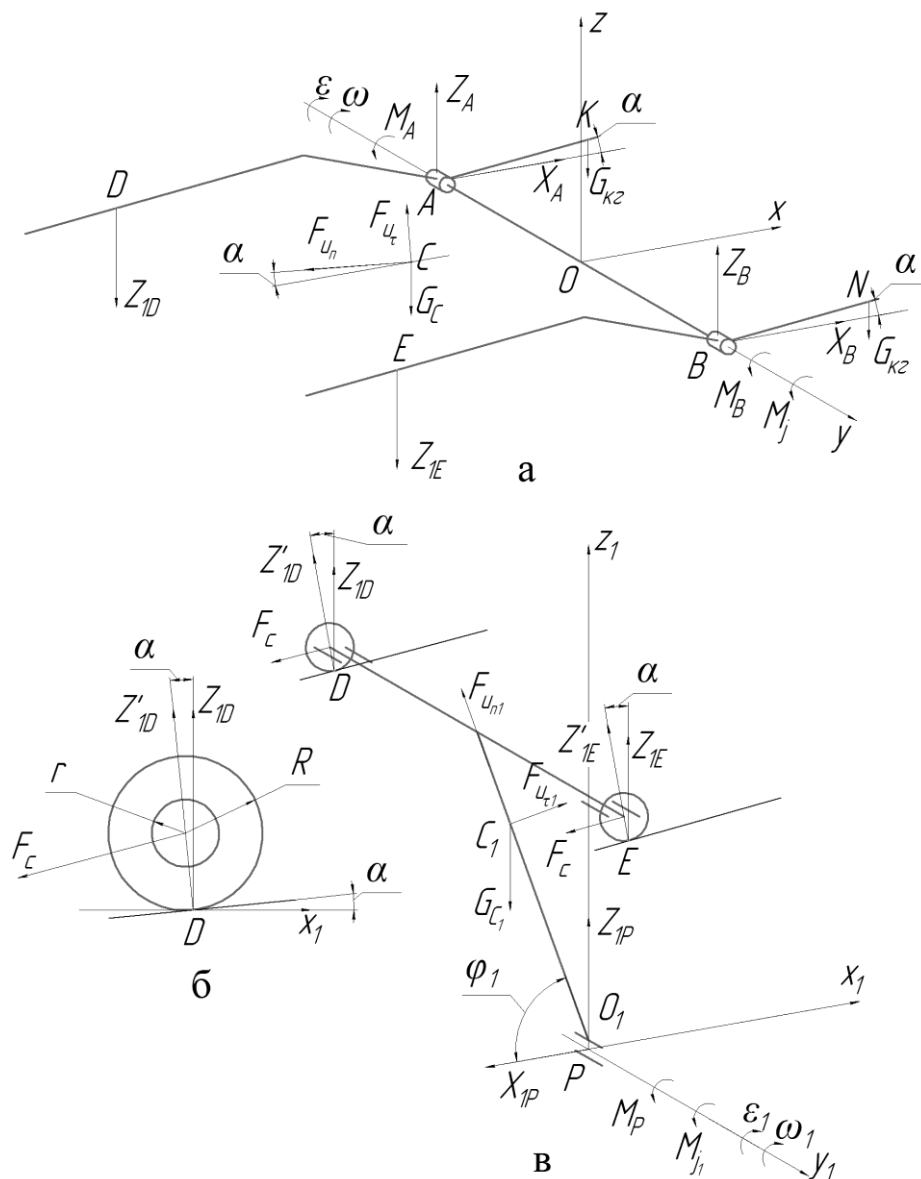


Рисунок 13. Расчётная схема механизма газодинамической отсечки конечного шлака

Для второй структурной группы:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= 2 \cdot X_B - F_{u_n} \cdot \cos \alpha + F_{u_\tau} \cdot \sin \alpha = 0; \\ \sum F_z &= 2 \cdot Z_B - 2 \cdot G_{K2} - 2 \cdot Z_{1E} + F_{u_n} \cdot \sin \alpha + F_{u_\tau} \cdot \cos \alpha - G_C = 0; \\ \sum M_y &= M_B + M_A + M_j - 2 \cdot G_{K2} \cdot x_N + 2 \cdot Z_{1E} \cdot x_E - F_{u_\tau} \cdot OC + G_C \cdot x_C = 0. \end{aligned} \right\} (5)$$

Здесь G_C – сила тяжести направляющих с рычагами; G_{K2} – масса контргрузов; X_B, Z_B, Z_{1E} – составляющие реакции в опорах; F_{u_n}, F_{u_τ} – силы инерции; M_A, M_B – моменты, действующие в шарнирных опорах; M_j – момент, вызванный касательной составляющей силы инерции; x_C, x_E, x_N, OC – плечи сил.

Решая систему уравнений (5), нашли реакции опор A , B и силу тяжести контргрузов $G_{кз}$, при которой рычажный механизм системы газодинамической отсечки шлака будет автоматически возвращаться в исходное положение.

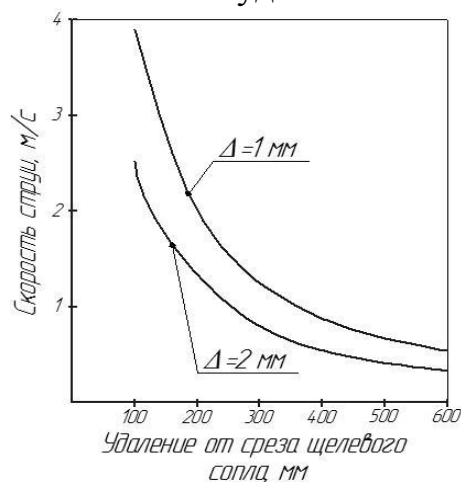


Рисунок 14. Графики зависимости уменьшения скорости плоских воздушных струй при различном щелевом зазоре сопла

Эффективность работы предлагаемой системы газодинамической отсечки конечного шлака в значительной мере зависит от кинематических параметров газовой струи, оттесняющей слой шлакового расплава от горловины конвертера во время выпуска стали.

Исследование параметров струи провели на разработанном стенде, позволившем установить ее дальность и углы раскрытия в горизонтальной плоскости γ и вертикальной β при использовании щелевых сопел размерами 120×1 и 120×2 мм. Ширина сопел соответствовала размерам горловины модели конвертера. Для визуализации формы струи в воздухоподводящий трубопровод с помощью шприца подавали белую пудру, тем самым обозначая её границы в вертикальной и горизонтальной плоскости.

Анализ полученных картин показал, что при истечении воздуха из щелевых сопел шириной 120 мм под давлением $P = 1,1 P_{окр.ср.}$ струя в начальном своем участке длиной 150 мм характеризуется постоянством статического давления во всей области течения, благодаря чему в потенциальном ядре струи скорость оставалась неизменной и имела при щелевых зазорах 1 и 2 мм значения 3,8 и 2,4 м/с. Углы раскрытия струи составляли $\beta = 6^\circ$, $\gamma = 20^\circ$ и $\beta = 10^\circ$, $\gamma = 20^\circ$ соответственно.

Проверку данной рекомендации осуществили путём симуляции газодинамической отсечки на плоской модели 10-тонного конвертера в масштабе 1:5, имеющей прозрачные стенки. В качестве имитаторов жидкой стали и шлака использовали воду и минеральное масло, так как кинематическая вязкость обоих расплавов при температуре 1550°C была такой же, как у их имитаторов при 20°C . Во время имитации газодинамической отсечки шлака под воздействием скоростного напора плоской воздушной струи, слой имитатора шлака оттеснялся к донной части модели конвертера в течении всего выпуска имитатора жидкой стали.

В пятом разделе «Пути дальнейшего совершенствования плавильного агрегата с вращающимся корпусом и оценка технико-экономической эффективности его применения» разработан газораспределительный узел для осуществления донной продувки в кислородном конвертере с двумя осями вращения. Он позволяет автоматически поддерживать истечение инертного газа в жидкий металл в допробойном режиме. Результаты выполненного физического моделирования позволили выполнить качественную оценку повышения скорости гомогенизации расплава при совместном использовании механического и газодинамического перемешивания жидкой ванны кислородного конвертера (Рисунок 15) и

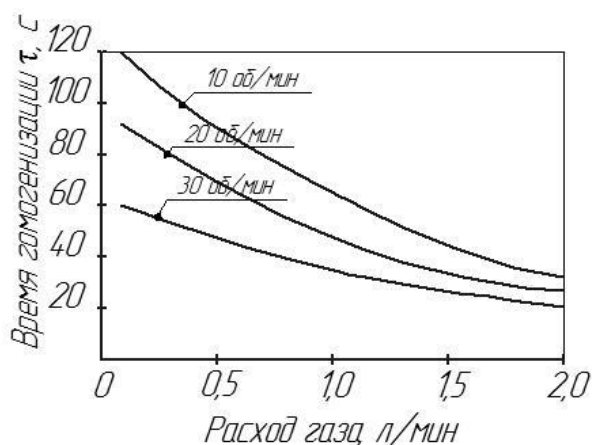


Рисунок 15. Зависимость времени гомогенизации жидкой ванны модели конвертера при комбинированном ее перемешивании с различным расходом вдуваемого воздуха и фиксированной частоте вращения корпуса модели

Коанда, расположенные перпендикулярно оси горловины, посредством трубопроводов 7 сообщаемися с полостью 2-й торообразной воздухораспределительной

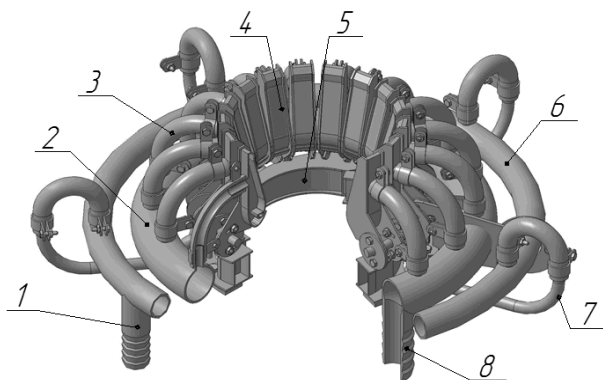


Рисунок 16. 3D модель безлопастного вентилятора

сделать вывод о целесообразности применении донной продувки металла в модернизированном плавильном агрегате.

Другим направлением дальнейшего совершенствования предложенного конвертера является доработка его системы газоотсоса путем применения в ней так называемого безлопастного (струйного) вентилятора (Рисунок 16).

В его состав входит сопловая часть, сформированная из комплекса полых сегментов 4, имеющих контур внешней поверхности Коанда и сообщаются посредством гибких трубок 3 с воздухораспределительным коллектором 2. На входе горловины, образованной кольцевыми сегментами 4, размещён завихритель потока, включающий полые сегменты 5 с щелевыми соплами и внутренней поверхностью Коанда, расположенные перпендикулярно оси горловины, посредством трубопроводов 7 сообщаемися с полостью 2-й торообразной воздухораспределительной камеры 6. Обе распределительные камеры снабжены патрубками 1 и 8 для подключения их к источнику сжатого воздуха. Применение данного вентилятора позволит обеспечить эвакуацию газопылевых выделений из рабочей зоны во время газодинамической отсечки конечного шлака при выпуске стали из конвертера через его горловину в разливочный ковш.

Благодаря предложенным техническим решениям по совершенствованию кислородного конвертера, была снижена себестоимость выплавляемой в нем стали

(в среднем до 19267,7 рос.руб за 1 т), что позволит при годовой производительности 60 тысяч тонн получить экономический эффект 176644200 рос.руб. в сравнении с кислородным конвертером классического типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены **новые научно обоснованные технические решения и разработки**, имеющие существенное значение для развития ДНР. Решена актуальная научно-техническая задача совершенствования конструкции механизмов мини-конвертера с двумя осями вращения для переработки промышленных металлосодержащих отходов. Обоснованы конструктивные и энер-

госиловые параметров механизмов: вращения конвертера относительно его наклонной продольной оси; качания наклонной продувочной фурмы; вдувания в расплав порошкообразных реагентов; газодинамической отсечки конечного шлака, которые обеспечивают эффективное функционирование усовершенствованного плавильного агрегата.

Итоги выполнения исследования следующие.

1. Результатами проведенного анализа литературных данных подтверждена технико-экономическая целесообразность использования в составе мини- и микро-заводов конвертеров с двумя осями вращения корпуса для получения стали приемлемого качества из шихты с высоким содержанием вредных примесей и металлосодержащих отходов, что можно обеспечить применением в его составе дополнительных механизмов и систем, повышающих тепло-массообменные процессы и ускоряющих химические реакции для вывода в шлак серы и фосфора, а также осуществляющих бесшлаковый выпуск стали через горловину конвертера.

2. Установленные путем модельных исследований особенности взаимодействия твердых и жидких компонентов шихты во время ведения технологического процесса в модернизированном конвертере положены в основу теории расчета технологических нагрузок, преодолеваемых приводом механизма вращения его корпуса. Эмпирическим путем установлено, что смещения центров масс жидкой и твердой частей шихты может достигать соответственно 0,02 – 0,05 и 0,49 – 0,6 радиуса полости конвертера в зависимости от вместимости и частоты вращения его корпуса. Экспериментальная проверка подтвердила правильность технических решений по совершенствованию конструктивной схемы исследуемого механизма и корректность полученных расчетных зависимостей. Погрешность данных расчета не превысила 10%.

3. За счёт применения комбинированного привода механизма качания наклонной фурмы системы вдувания порошкообразных реагентов в струе кислорода её сопло может совершать движение по заданной сложной траектории, нанося слой материала на рабочую поверхность футеровки конвертера, которая при вращении его корпуса заглубляется в жидкую ванну и подаёт в неё порошкообразную известь с целью удаления примесей. Разработанная математическая модель систем качания фурмы с комбинированным приводом позволяет получить значения момента на валу кулачкового механизма и силы, действующей в звеньях кривошипно-шатунного механизма качания фурмы в полости конвертера. Определённые экспериментальным путём форма и параметры проходного поперечного сечения сопла фурмы дают возможность повысить степень усвоения вводимых в жидкую ванну реагентов.

4. Разработанная система газодинамической отсечки конечного технологического шлака обеспечит его удержание в полости мини-конвертера при сливе жидкого металла через его горловину благодаря автоматическому поддержанию заданного угла атаки плоской газовой струи относительно поверхности шлакового расплава. При этом для 10-тонного кислородного конвертера удаление щелевого плоского сопла шириной 400 мм необходимо поддерживать в пределах 600 – 620 мм от среза горловины при угле раскрытия плоской струи 20° , а давление на выходе сопла должно быть не менее 0,107 МПа.

5. Применение донной продувки инертным газом ванны кислородного конвертера с вращающимся корпусом позволяет интенсифицировать процессы тепло-массопереноса в расплаве. Рациональное использование дорогостоящего аргона при эксплуатации продувочной системы, включающей несколько пористых блоков, установленных на одинаковом расстоянии по периметру донной части плавильного агрегата, обеспечено за счет автоматического поддержания допробойного режима истечения инертного газа из пор огнеупорного блока с учетом его заглубления в жидкий металл и полного прекращения подачи энергоносителя к нему во время нахождения над поверхностью расплава.

6. Результаты диссертационной работы, включая технический проект 10-тонного мини-конвертера и методики расчета энергосиловых параметров механизмов, входящих в его состав, переданы для практического использования проектному отделу ГП «ДОНПКТИ» при разработке новых образцов механического оборудования сталеплавильных цехов.

7. Практическое применение результатов диссертационной работы позволит за счёт снижения себестоимости производимой стали, получить годовой экономический эффект, составляющий 17,6 млн. рублей. Срок окупаемости прямых затрат, связанных с изготовлением самого сталеплавильного мини-агрегата, не превышает 4,5 месяца.

8. Направление дальнейших исследований связано с повышением интенсивности тепло-массообменных процессов за счёт применения системы донной продувки через пористые блоки, а также внедрение узла безлопастного (струйного) вентилятора в систему газоотсоса для конвертеров с двумя осями вращения, во время выпуска стали в которых, происходит расстыковка горловины плавильного агрегата с газоотводящим колпаком.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Еронько, С.П. Моделирование газоотсоса от плавильных агрегатов с использованием безлопастных вентиляторов / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачёв, **Б.И. Стародубцев** // Вестник института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – Донецк: ДонНТУ. – 2015. – Выпуск 3(3). – С. 15-19. (*Модельные исследования разработанного безлопастного вентилятора*).

2. Еронько, С.П. Повышение интенсивности перемешивания расплава в ванне конвертера с вращающимся корпусом / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Б.И. Стародубцев** // Чёрная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2017. – № 4. – С. 49 - 54. (*Выполнен анализ в лабораторных условиях взаимодействия твёрдой и жидкой составляющих шихты и установлены параметры смещения их центров масс в зависимости от частоты вращения корпуса кислородного конвертера*).

3. Еронько, С.П. Модельные исследования системы отсечки шлака при выпуске стали из конвертера с вращающимся корпусом / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Б.И. Стародубцев** // Чёрная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2017. – № 6. – С. 48 - 55. (*Экспериментальным путём установлена зависимость снижения осевой скорости плоских воздушных струй при различном щелевом зазоре сопла и его удалении от зеркала расплава*).

4. Еронько, С.П. Совершенствование системы вдувания газопорошковых смесей в ванну конвертера с вращающимся корпусом / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Б.И. Стародубцев** // Чёрная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2017. – № 7. – С. 75 - 81. (*Модельные исследования формы газопорошковой струи и её взаимодействия с жидкой ванной*).

5. Еронько, С.П. Моделирование процессов движения шихты в полости конвертера с вращающимся корпусом / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Б.И. Стародубцев** // Чёрная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2017. – № 10 – С. 81 - 86. (*Применение нового газораспределительного узла для донной продувки и контроль интенсификации процессов за счёт применения данного устройства*).

6. Еронько, С.П. Разработка автоматической системы газодинамической отсечки конечного шлака для конвертера с вращающимся корпусом / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Б.И. Стародубцев** // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2017. – №11. – С. 863 - 869. (*Предложена новая система газодинамической отсечки шлака для конвертера с двумя осями вращения с выпуском плавки через его горловину*).

7. Еронько, С.П. Моделирование работы модернизированной системы газоотсоса кислородного конвертера с вращающимся корпусом / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачёв, **Б.И. Стародубцев** // Вестник ДонНТУ. – 2017. – №4 (10) – С. 4 - 12. (*Выполнены аналитические исследования безопасного вентилятора в системе эвакуации газов и пыли без дожигания СО для кислородного конвертера с двумя осями вращения*).

8. Еронько, С.П. Усовершенствование мини-конвертера для переработки бытовых и промышленных отходов / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Б.И. Стародубцев** // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2017. – № 5(48). – С. 45 - 51. (*Предложена новая схема расположения привода вращения кислородного конвертера*).

9. Еронько, С.П. Расчёт мощности привода механизма вращения корпуса конвертера относительно наклонной продольной оси / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Б.И. Стародубцев** // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2017. – № 8(51). – С. 123 - 130. (*Разработана математическая модель механизма вращения корпуса конвертера относительно его наклонной продольной оси*).

10. Еронько, С.П. Расчёт параметров комбинированной системы качания наклонной продувочной фурмы в полости конвертера / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Б.И. Стародубцев** // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – № 9(52). – 2018. – С. 115 – 124. (*Предложена математическая модель комбинированного привода механизма качания наклонной продувочной фурмы, посредством применения кривошипно-шатунного и кулачкового механизмов*).

11. Еронько, С.П. Расчёт параметров автоматической системы газодинамической отсечки шлака при выпуске стали через горловину конвертера / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Б.И. Стародубцев** // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – № 10(53). – 2018. – С. 113 - 120. (*Разработана методика расчёта системы газодинамической отсечки конечного шлака*).

Патенты на изобретения

12. Пат. RU 2630443 С1 Российская Федерация, МПК F24F 7/00, F04D 25/00, F04D 29/00. Узел безлопастного вентилятора для эвакуации газопылевых выбросов из промышленных агрегатов / Е.Н. Смирнов, С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, В.А. Скляр, А.В. Сазонов, **Б.И. Стародубцев**, А. С. Сосонкин, О.И. Малахова; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС» – № 2016119782; заявл. 23.05.2016; опубл. 07.09.2017. (*Усовершенствованная конструкция узла безлопастного вентилятора*).

Научные работы в материалах конференций

13. **Стародубцев, Б.И.** Физическое моделирование функционирования безлопастного вентилятора для системы газоотсоса плавильных агрегатов / **Б.И. Стародубцев** // V международная студенческая научно-практическая конференция «Техника и технологии машиностроения», 4 -10 апреля 2016г., Омск – ОмГТУ, 2016 – С. 333 - 338. (*Предложена система безлопастного вентилятора для газоотсоса плавильных агрегатов*).

14. Eron'ko, S.P. New engineering solution in creation of mini-BOF for metallic waste recycling (Новые технические решения при создании мини-конвертера для переработки металлосодержащих отходов) / S.P. Eron'ko, S. M. Gorbatyuk, E.V. Oshovskaya, **B.I. Starodubtsev** // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 287012004. – 2017. (*Предложены разработанные устройства для переработки некачественной шихты*).