На правах рукописи



Понамарева Елена Александровна

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ КОВШОВЫХ ЗАТВОРОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Специальность 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель: **ЕРОНЬКО Сергей Петрович,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша», ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет (г. Донецк, ДНР)

Официальные оппоненты: **ЯЧИКОВ Игорь Михайлович**,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (г. Челябинск)

ШАХОВ Сергей Иосифович,
доктор технических наук, начальник отдела нестандартного оборудования, ООО «ТМК СТАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (г. Москва)

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»**
(г. Комсомольск-на-Амуре)

Защита состоится 11 февраля 2027 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.324.04 на базе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке организации ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» по адресу: Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, интернет-ссылка https://www.magtu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.324.04  Звягина Елена Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основной проблемой, препятствующей комплексной механизации и автоматизации ключевых процессов в сталелитейном производстве, становится сложность обеспечения постоянства штатных режимов работы технологического оборудования в условиях высоких нагрузок, теплового воздействия и запыленности. При обслуживании отдельных агрегатов металлурги регулярно сталкиваются с необходимостью реализации целого ряда вспомогательных ручных операций, обеспечивающих экстренный возврат техники к работоспособному состоянию при ее краткосрочном выходе из строя. Даже статистически низкий шанс возникновения подобных ситуаций в существенной степени ограничивает возможности автоматизации.

Ковшовые шиберные затворы, пришедшие взамен стопорных разливочных устройств, к сегодняшнему дню стали ключевым атрибутом непрерывной разливки стали, претерпев изменения в виде трех эволюционных поколений и придя к современному типу «книжка», характеризующемуся высокой степенью надежности и удобства обслуживания. Однако при эксплуатации таких затворов производственники по-прежнему довольно часто сталкиваются с необходимостью прожигания кислородом твердой корки, образующейся в поверхностном слое стартовой смеси на входе в сталевыпускной канал ковша и препятствующей свободному истечению жидкой стали в момент открытия затвора. В том числе до сих пор отсутствуют универсальные и эффективные решения по предотвращению затягивания канала отложениями в процессе разливки, в результате чего снижается его пропускная способность и нарушается заданный скоростной режим подачи металла в промежуточный ковш. Обеспечение гарантированного начала разливки в штатном режиме и поддержание требуемых скоростных режимов истечения стали – важнейшие научно-технические задачи. Работа, направленная на их решение, является весьма актуальной и ценной с практической точки зрения.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие шиберной разливки стали внесли: Мачикин В.И., Шестопалов В.Н., Кулик А.Д., Гладилин Ю.И., Еронько С.П., Золотухин В.И., Гордеев Е.И., Провоторов Д.А., Гордеева Н.А. Соломин Н.П., Полубесов С.Г., Кононов В.А., Василенко В.П., Алпатов А.А., Топычканов В.И., Аксельрод Л.М., Вяткин А.А. и Мельникова Г.Г. Результаты их исследований послужили основой для обоснования конструктивных и энергосиловых параметров шиберных систем разных типов, а также позволили выдать рекомендации к их использованию в условиях производства. В настоящее время продолжаются работы по созданию перспективных образцов шиберных затворов, снабженных специальным навесным оборудованием, которое позволяют устранить или ослабить действие факторов, снижающих эффективность функционирования подобных разливочных систем.

Объект исследования – система шиберного затвора сталеразливочного ковша, предназначенная для контролируемого выпуска жидкой стали с заданными режимами истечения.

Предмет исследования – конструктивные и энергосиловые параметры вспомогательных структурных механизмов системы ковшового затвора.

Цель исследования – повышение эффективности функционирования систем ковшовых шиберных затворов путем внедрения в их структуру дополнительных устройств, обеспечивающих беспрепятственное начало разливки и постоянство скоростных режимов истечения стали через сталевыпускной канал.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих научно-технических задач:

1. Проанализировать результаты практического использования шиберных затворов и установить факторы, снижающие эффективность их работы в условиях современного сталеплавильного производства;
2. С использованием методов математического и физического моделирования подтвердить возможность активного влияния на процессы начала разливки в штатном режиме из ковшей, оборудованных шиберными затворами, и снижения интенсивности процесса затягивания их каналов;
3. Создать усовершенствованную конструкцию шиберного затвора, снабженного устройствами для разрушения твердой корки, образующейся перед началом разливки на входе в выпускной канал ковша, и снижения интенсивности процесса его зарастания;
4. Получить зависимости для определения рациональных энергосиловых параметров катапульты и механизма вибрационного воздействия на огнеупорные элементы шиберного затвора, формирующие его выпускной канал;
5. Выполнить экспериментальную проверку правильности принятых технических решений и корректности полученных расчетных зависимостей;
6. Выдать рекомендации по расчету и конструированию опытно-промышленного образца модернизированного шиберного затвора.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Адаптированная математическая модель, описывающая прочностные параметры твердой корки, образующейся на входе в сталевыпускной канал ковша в результате спекания стартовой смеси, позволяющая при заданных условиях реализации разливки рассчитать минимальные толщины перемычек, препятствующих выпуску расплава в штатном режиме.
2. Обоснование энергосиловых параметров катапульты, обеспечивающих гарантированное разрушение спекшейся корки, блокирующей входное отверстие сталевыпускного канала, благодаря чему исключается необходимость применения кислорода для его промывания.
3. Теоретическое обоснование возможности эффективного влияния на интенсивность зарастания канала ковшового затвора путем возбуждения в огнеупорах вертикально направленных вибрационных колебаний, наличие

которых приводит к усилению значений сил, способствующих отрыву кристаллизующихся частиц, которые закрепляются на стенках сталевыпускного канала.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена рациональная конструкция и теоретические зависимости для обоснования параметров катапульты, действие которой в составе ковшового затвора обеспечивает гарантированное начало разливки в штатном режиме путем разрушения корки, образующейся из спекшейся стартовой смеси на входе в сталевыпускной канал и препятствующей свободному истечению стали при первом открытии затвора, отличающиеся тем, что учитывают возможную толщину корки, предварительно определяемую с учетом вместимости ковша, и результаты экспериментальных исследований взаимодействия ударного стержня с высыпающейся стартовой смесью.
2. Впервые для стабилизации скоростного режима истечения стали через шиберный затвор путем снижения интенсивности затягивания сталевыпускного канала отложениями в процессе разливки предложено использовать вибрационное воздействие с приложением механических колебаний, направленных параллельно оси разливки.
3. Получены теоретические зависимости для определения энергосиловых параметров вибрационной системы ковшового затвора, отличающиеся тем, что при расчете учитывается коэффициент затухания вибрационного сигнала, численные значения которого получены в результате экспериментальных исследований прохождения упругой волны через огнеупорный комплект затвора.

Методы исследования и достоверность результатов работы.

Для достижения поставленной цели и решения задач в диссертационной работе использованы системный анализ и обобщение научно-технических успехов в области шиберной разливки стали, а также метод физического моделирования процессов образования перемычки на поверхности стартовой смеси, блокирующей вход выпускного канала, и его зарастания в процессе разливки. Экспериментальные исследования проведены на физических моделях и натурных образцах изучаемых разливочных систем с применением современной контрольно-измерительной аппаратуры и вычислительной техники. Достоверность теоретических изысканий подтверждена полученными данными лабораторных экспериментов. При их обработке использован лицензионный программный продукт.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Адаптированная математическая модель для оценки прочности образующейся на поверхности сыпучей стартовой смеси твердой корки, препятствующей началу истечения жидкой стали при первом открытии ковшового затвора, позволяет получить исходную информацию для выполнения расчетов конструктивных и энергосиловых параметров катапульты, предназначенной к применению в составе шиберных затворов для сталеразливочных ковшей вместимостью от 50 до 300 т.

2. Теоретически обоснована возможность снижения интенсивности затягивания сталевыпускного канала шиберного затвора посредством возбуждения в огнеупорных элементах вертикально направленных колебаний, что при режимах воздействия с виброускорением 100–160 м/с^2 обеспечивает увеличение в 1,6–2,5 раза сил, способствующих отрыву частиц радиусом 0,5 мм от стенки канала.

3. Использовавшийся расчетный метод определения интенсивности поглощения огнеупорными элементами ковшового затвора энергии распространяющейся упругой волны позволил установить значение общего коэффициента затухания виброускорения для собранного огнеупорного комплекта в пределах 11,43–11,86 для двух разных режимов работы пневмовибратора, что следует учитывать при обосновании энергосиловых параметров вибрационной системы шиберного затвора.

4. Использование предложенной расчетной методики при обосновании геометрических и энергосиловых параметров вибрационной системы, способной эффективно препятствовать зарастанию сталевыпускного канала при частоте 40 Гц и амплитуде колебаний 2 мм, позволяет с учетом конструктивных особенностей модернизируемого ковшового затвора определить требуемое количество пневматических вибраторов (от 2 до 4), диаметр поршня и динамическую жесткость заложенных пружин в диапазоне 8–10 Н/мм.

5. Результаты диссертационной работы в виде методик расчёта энергосиловых и конструктивных параметров катапульты и вибрационной системы, предназначенных для использования в качестве структурных элементов ковшового затвора, переданы ООО «Волгодонский энергомеханический завод» (г. Волгодонск, Ростовская обл.) и ООО «Горловский энергомеханический завод» (г. Горловка, ДНР) для практического применения при проектировании и изготовлении ковшовых шиберных затворов. Ожидаемый экономический эффект от внедрения таких технических решений составил 5 207 972 росс. руб. согласно информации, предоставленной ООО «Волгодонский энергомеханический завод», и 5 372 150 росс. руб. согласно данным ООО «Горловский энергомеханический завод». Расчетный период окупаемости составил 730 и 708 плавок соответственно.

6. Материалы диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс на кафедре «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша» и используются при обучении студентов по направлению подготовки 15.04.02 «Инжиниринг и технический менеджмент металлургического оборудования» при изучении ими дисциплины «Инновационное металлургическое оборудование».

Личный вклад автора. Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором и при его непосредственном участии. Личный вклад автора заключается в инициативе постановки целей и задач исследования, определении методов и инструментов их решения, в планировании экспериментов и обработке полученных результатов, в разработке методик

энергосилового расчета элементов катапульты и вибрационной системы. Также была подготовлена публикация для рецензируемого высокорейтингового журнала категории К1 перечня ВАК в единоличном авторстве.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа по своей цели, задачам, содержанию и научной новизне соответствует паспорту специальности 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы по пункту 4 «Исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций с использованием моделирования, численных и физических экспериментов».

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационных исследований рассматривались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии имени В.Я. Седуша» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» и 12 научно-технических конференциях: IV-ой, V-ой, VII-ой, VIII-ой и IX-ой Международных научно-практических конференциях «Инновационные перспективы Донбасса» (Донецк, 2018–2023 гг.); III-ой Международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (Алчевск, 2018 г.); XVIII-ой Республиканской научно-технической студенческой конференции «Технологические машины и оборудование», посвященной 90-летию кафедры «Энергомеханические системы» (Донецк, 2019 г.); V-ой Международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (Алчевск, 2020 г.); V-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы металлургии чугуна и стали» (Алчевск, 2021 г.); Юбилейной международной научно-технической конференции «65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации» (Алчевск, 2022 г.); XXXI-ой Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2024 г.); Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении», посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне и 85-летию города трудовой доблести Ишимбая (Ишимбай, Республика Башкортостан, 2025 г.); XXI-ой Международной научно-практической конференции «Молодёжь и наука» (Нижний Тагил, 2025 г.).

Публикации

Основные положения выполненных исследований отражены в 24 работах, в том числе в 2 статьях, опубликованных в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК РФ, а также 2 патентах РФ на изобретения.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 187 страницах машинописного текста, включающего 71 рисунок, 13 таблиц, 8 приложений, библиографический список из 123 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первом разделе** выполнен обзор основных этапов развития систем ковшовых затворов и определены пути повышения эффективности их работы. Переход в сталеплавильных цехах к шиберной разливке взамен схем, использующих стопорные устройства, был полностью завершен к концу 70-х годов минувшего века. В настоящее время повсеместно используются ковшовые затворы уже третьего поколения. Крупнейшие зарубежные производители – «Vesuvius», «Knoellinger FLOCON GmbH», «RHI Magnesita-Interstop» и «Shinagawa». В Российской Федерации их производством занимаются фирмы ОАО «Шибер» и ООО НПП «Вулкан-ТМ».

Выделены два эксплуатационных фактора, ограничивающие эффективность функционирования современных шиберных систем. Это образование твердой спекшейся корки на поверхности стартовой смеси при ее контакте с жидким металлом в ковше, которая препятствует свободному истечению стали при открытии ковша, а также затягивание сталевыпускного канала тугоплавкими отложениями, образующимися на стенках огнеупорных изделий. Разрушение корки требует применения прожигания кислородом, вводимым в полость сталевыпускного канала через Г-образную трубку вручную, что приводит к отступлению от штатного режима разливки, потерям во времени и опасностью реализации этой операции для обслуживающего персонала. Затягивание отверстия в огнеупорах отложениями искажает проходное сечение сталевыпускного канала, что влечет за собой изменение скоростного режима разливки и дросселирование струи, а в сумме – негативно сказывается на качестве стальной заготовки и стойкости технологического оборудования.

Для обеспечения начала разливки в штатном режиме и снижения интенсивности зарастания канала ковшового затвора следует признать перспективным применение в его составе специальной катапульты и вибрационной системы, для эффективной работы которых необходимо обосновать их рациональные конструктивные и энергосиловые параметры.

Во **втором разделе** для обоснования параметров катапульты, обеспечивающей разрушение корки, которая часто образуется на поверхности стартовой смеси и блокирует выпускной канал, использовались результаты теоретических и лабораторных исследований.

Предложена адаптированная математическая модель восприятия нагрузок перемычкой, образующейся на границе смачивания поверхности стартовой смеси жидкой сталью (рис. 1). Принято, что в первом приближении образующаяся перемычка представляет собой асимметричную оболочку в виде вогнутой полусферы. Ключевой действующей нагрузкой выступает равномерно распределенное давление жидкой стали, нормальное к поверхности.

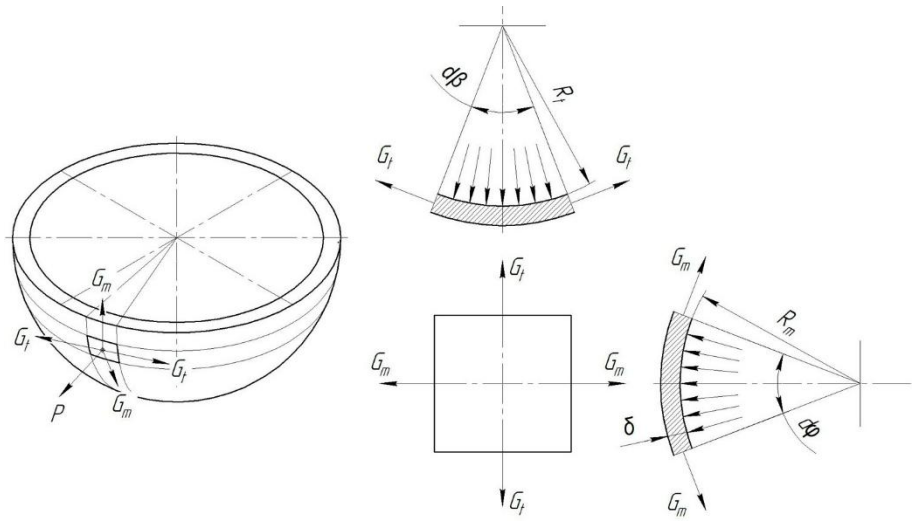


Рисунок 1 – Схема для определения напряжений в теле перемычки

В результате математического моделирования была получена зависимость, характеризующая значение воспринимаемых напряжений, при которых перемычка остается в целостном состоянии

$$\sigma = \frac{PR_c}{2\delta} \quad (1)$$

Задаваясь значениями σ для стали при температуре начала ее кристаллизации, а также ферростатического давления P и радиуса канала ковшового стакана R_c, были рассчитаны минимальные толщины перемычек, при которых начало разливки не может произойти в штатном режиме для ковшей различной вместимости. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Расчетные значения толщины корочки, выдерживающей давление столба стали при открытии затвора сталеразливочного ковша

Вмести-мость ковша, т	Высота столба металла в ковше, м	Ферро-статическое давление, МПа	Радиус канала ковшового стакана, мм	Толщина перемычки на входе в канал ковшового стакана при различной прочности ее материала, мм		
				σ=10 МПа	σ=20 МПа	σ=30 МПа
100	3,0	0,21	25	0,26	0,13	0,09
150	3,5	0,25	30	0,38	0,19	0,13
200	4,0	0,29	35	0,50	0,25	0,17
250	4,5	0,32	40	0,64	0,32	0,21
300	5,0	0,36	45	0,82	0,41	0,27

Для начала свободного истечения стали потребуется приложение внешнего силового воздействия, которое вызовет непосредственное разрушение перемычки. Указанное воздействие предложено реализовать с помощью катапульты, установленной на затвор во время его подготовки к разливке (рис. 2). Ударным элементом катапульты выступает металлический стержень 1, размещенный в канале стакана-коллектора 4 с упором в плоскость шиберной плиты 5. Его прижатие к рабочей поверхности верхней огнеупорной

плиты с определенным усилием обеспечивает струна 2, связанная со свободными концами листовых пружин 3 посредством катушек 7. Монтаж струны 2 подразумевает обеспечение возможности ее отброса в момент полного ослабления натяжения. Листовые пружины 3 консольно закреплены на металлической обойме затвора, удерживающей стакан-коллектор 4. При совмещении отверстий подвижной и неподвижной частей огнеупорного комплекта стартовая смесь из полости ковшевого стакана 6 высыпается, а стержень 1 с определенным усилием устремляется вверх по каналу. Преимуществом данной конструкции стало сохранение ключевых компонентов узла при срабатывании, расходной частью выступает только стержень.

При выводе теоретических зависимостей для расчета энергосиловых параметров катапульты использовали расчетную схему, показанную на рис. 3.

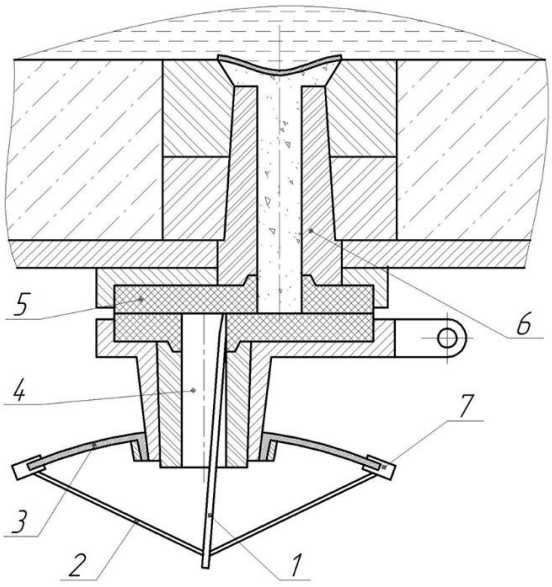


Рисунок 2 – Конструктивная схема предложенной катапульты

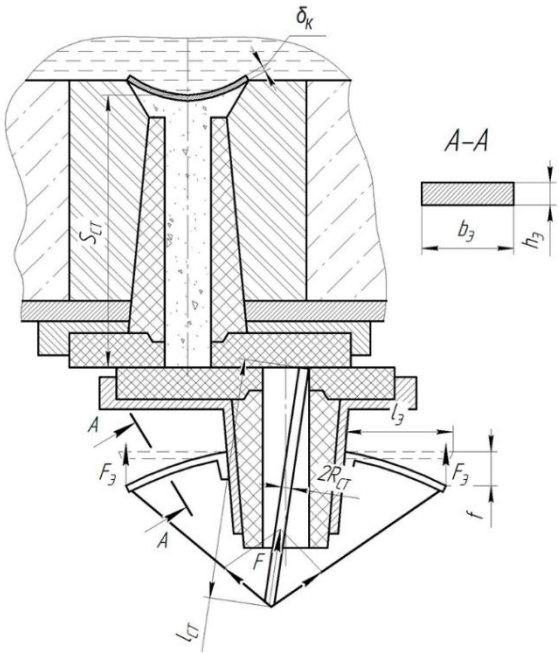


Рисунок 3 – Расчетная схема энергосиловых параметров катапульты

Выходными показателями расчета по предложенной методике становятся: требуемая скорость движения стержня в сталевыпускном канале $V_{\text{СТ}}$, сила $F_{\text{Э}}$, развиваемая упругим элементом устройства (листовой пружиной), осевой момент инерции I и толщина $h_{\text{Э}}$ поперечного сечения упругого элемента. При этом длину упругого элемента $l_{\text{Э}}$ и его ширину $b_{\text{Э}}$ назначили конструктивно, исходя из пропорций шиберного затвора.

$$V_{\text{СТ}} = 2\sqrt{\frac{\delta_{\text{К}}\sigma}{\rho_{\text{СТ}} l_{\text{СТ}} - \rho_{\text{СР}} S_{\text{СТ}}}} \tag{2}$$

$$F_{\text{Э}} = Kf \tag{3}$$

$$I = \frac{F_Э l_Э^3}{3Ef} \quad \rightarrow \quad I = \frac{b_Э h_Э^3}{12} \tag{4}$$

$$h_Э = \sqrt[3]{\frac{12I}{b_Э}} \tag{5}$$

где $\delta_К$ – толщина образовавшейся корки на входе в канал, σ – предел прочности материала корки, $\rho_{СТ}$ – плотность материала стержня, $l_{СТ}$ – длина стержня, $\rho_{СР}$ – условная плотность среды, в которой движется стержень, $S_{СТ}$ – перемещение стержня, K – коэффициент упругости, f – максимальное значение прогиба, E – модуль упругости материала листовой пружины.

На основании полученных зависимостей рассчитали параметры катапульты для затворов ковшей различной вместимости (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные значения энергосиловых параметров катапульты

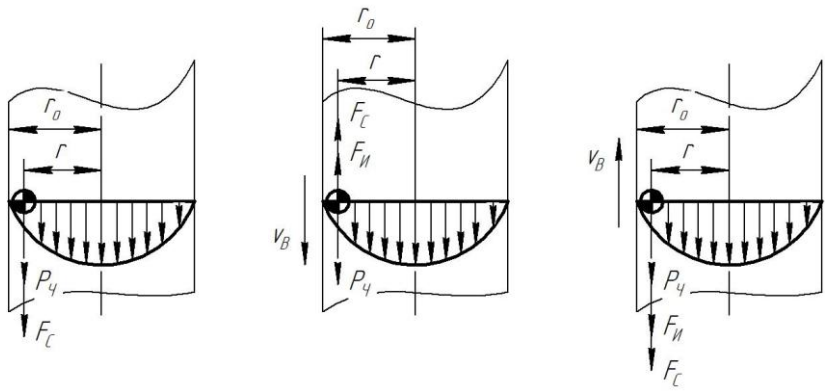
Вместимость ковша, тонн	$V_{СТ}$, м/с	$l_Э$, мм	f, мм	K, Н/мм	$F_Э$, Н	I, мм^4	$b_Э$, мм	$h_Э$, мм
100	14,2	200	60	2,8	168	37,3	25	2,6
150	14,2	200	60	2,8	168	37,3	25	2,6
200	14,2	200	60	2,8	168	37,3	25	2,6
250	12,8	250	80	2,6	208	67,7	30	3
300	12,8	250	80	2,6	208	67.7	30	3

Третий раздел посвящен оценке возможности применения вибрационного воздействия для снижения интенсивности затягивания сталевыпускного канала отложениями. В процессе разливки налипшая на стенку канала частица подвергается воздействию гравитационной силы и силы, вызванной гидродинамическим давлением движущегося потока расплава. Образование отложений объясняется тем, что указанные силы не могут разрушить связь частицы с поверхностью огнеупора.

При сообщении разливочному узлу вертикально направленных колебаний вероятность отрыва частиц от стенки определяется соотношением между упомянутыми силами и вибрационной нагрузкой, зависящей от амплитуды и частоты. Математическое моделирование сил, воздействующих на тугоплавкие частицы отложений, закрепляющиеся на стенках канала, было проведено на основании схем на рис. 4.

Расчетные данные подтверждают, что при воздействии на разливочный узел с виброускорением 100–160 м/с^2 сумма сил, отрывающих частицы радиусом 0,5 мм от поверхности канала, возрастает в 1,6–2,5 раза, т.е. создаются условия, способствующие снижению интенсивности процесса его зарастания. Для дальнейшей качественной оценки возможности снижения интенсивности процесса формирования отложений на стенках сталевыпускного

канала путем приложения вибраций использовали метод физического моделирования.



а) *б)* *в)*

Рисунок 4 – Схема силового воздействия на частицу, имеющую связь со стенкой выпускного канала, при отсутствии (*а*) и наличии (*б, в*) вертикально направленного вибрационного воздействия

Была разработана конструкция усовершенствованного затвора (рис. 5), в котором вибрационное воздействие на разливочный узел реализуют посредством нескольких пневматических вибраторов поршневого типа. Они передают вертикально направленные колебания на огнеупоры шиберного затвора, что способствует непрерывному механическому разрушению связей между частицами отложений и поверхностью разливочного канала.

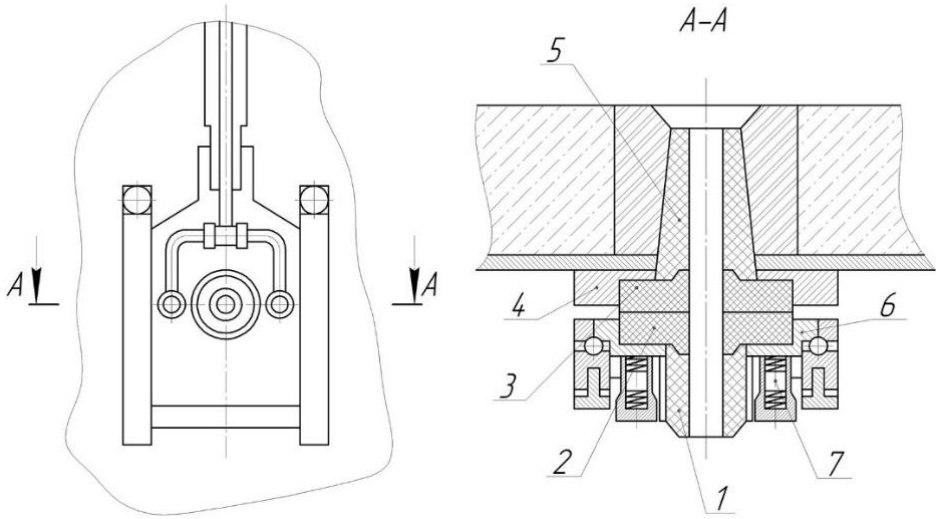


Рисунок 5 – Схема шиберного затвора с вибрационной системой

Верхняя обойма 4 шиберного затвора неподвижно закреплена на днище 7 сталеразливочного ковша. В ней установлена шиберная плита 3, соединенная с ковшовым стаканом 5. В нижней обойме 6 размещена шиберная плита 2 и состыкованный с ней стакан-коллектор 1. На этой же обойме установлены несколько пневматических вибраторов 7, вкрученных по резьбе. В качестве энергоносителя используется сжатый воздух из сети охлаждения пружинных узлов шиберного затвора.

При подаче воздуха под избыточным давлением в полость вибраторов их поршни совершают двустороннее движение, возбуждая вертикально направленные колебания и передавая вибрационное воздействие на огнеупоры. Частотно-амплитудная характеристика регулируется конструктивными особенностями вибратора, жесткостью пружин и давлением воздуха в сети.

Сам вибратор содержит полый цилиндрический корпус 5, внутри которого установлен сдвоенный поршень 2, поджатый снизу и сверху пружинами 4 и 10. Корпус снабжен резьбовой пробкой 6 и имеет верхнее 1 и нижнее 3 выпускные отверстия, а также подводящий трубопровод 8, нижний 7 и верхний 9 перепускные каналы и резьбовой хвостовик 11.

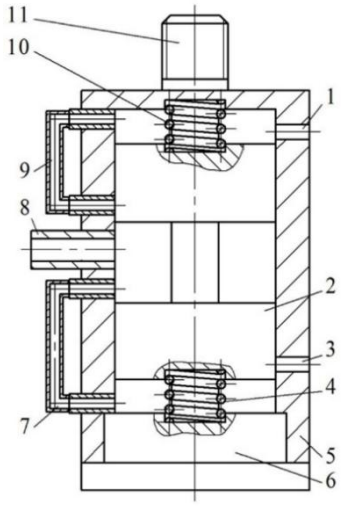


Рисунок 6 – Схема пневмовибратора

Основная задача при обосновании параметров вибрационной системы состояла в определении динамической осадки и статической нагрузки, эквивалентной ударному воздействию поршня вибратора на его пружины, размер и упругие свойства которых должны обеспечивать возбуждение вертикально направленных колебаний, сообщаемых огнеупорам.

Центральное место в расчете занимает определение суммарной вынуждающей силы, необходимой для сообщения затвору вибрационной нагрузки, достаточной, для препятствования образованию стойких связей между тугоплавкими частицами и стенками сталевыпускного отверстия.

$$F_{\text{В}} = m_{\text{З}} A\omega^2 = n\frac{\pi d_{\text{П}}^2}{4}P \tag{6}$$

где $m_{\text{З}}$ – масса ковшового затвора, A – амплитуда колебаний, ω – частота колебаний, n – количество вибраторов в системе, P – давление сжатого воздуха, $d_{\text{П}}$ – диаметр поршня вибратора.

Расход воздуха для работы одного вибратора составит

$$V_C = 2\delta_{\text{ДП}}\frac{\pi d_{\text{П}}^2}{4}\omega \tag{7}$$

где $\delta_{\text{ДП}}$ – динамическая осадка пружины вибратора.

Мощность, развиваемая поршневыми вибраторами

$$N_{\text{ВС}} = PV_C n = 2\delta_{\text{ДП}}^2 c\omega n = I_0 S \tag{8}$$

Требуемая жесткость каждой из двух пружин вибратора

$$c = \frac{I_0 S}{2\delta_{\text{ДП}}^2 \omega n} \tag{9}$$

Результаты выполненных расчетов для ковшей разной вместимости приведены в табл. 3. Предложенная методика позволяет обосновать рабочие параметры вибрационной системы ковшового затвора, при которых должно обеспечиваться снижение интенсивности зарастания его канала.

Таблица 3

Расчетные значения параметров пневматических поршневых вибраторов для ковшовых затворов сталеразливочных ковшей

Вместимость ковша, тонн	Кол-во вибраторов, шт.	P, МПа	V_C, м^3/с	F_B, Н	$d_П$, мм	$\delta_{ДП}$, мм	c, Н/мм
100	2	0,4	0,0015	576	30	30	8
150	3	0,4	0,0013	704	30	30	8
200	3	0,4	0,002	800	30	30	9
250	4	0,4	0,0015	960	30	30	9
300	4	0,5	0,0015	1120	30	30	10

В **четвертом разделе** для оценки корректности расчетных данных спланировали и провели лабораторный эксперимент с использованием опытного образца шиберного затвора.

Первый этап эксперимента подразумевал симуляцию процесса разрушения корки на входе в канал ковшового стакана при различных характеристиках материала имитатора перемычки и различной их толщине. Каждую из перемычек устанавливали в верхней части металлической гильзы, зафиксированной в канале ковшового стакана и заполненной стартовой смесью. Шиберный затвор был оснащен навесной катапультой (рис. 7).

После завершения эксперимента разрушенную перемычку извлекали для визуального осмотра и фотосъемки (рис. 8). Полученные результаты идентичны тем, что были зафиксированы при модельных исследованиях процесса срабатывания катапульты на плоской и объемной моделях ковшового затвора с учетом различной геометрической формы головки стержня.

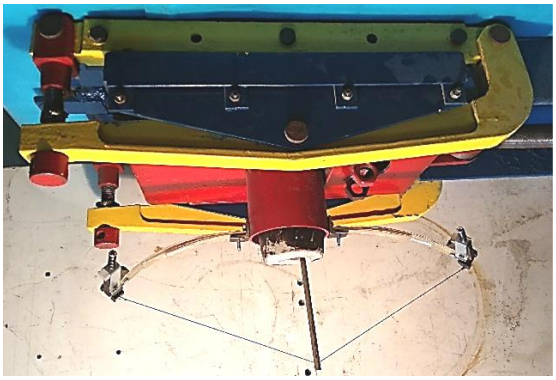


Рисунок 7 – Опытный затвор с установленной катапультой



а)

б)

Рисунок 8 – Характер разрушения имитаторов из свинца (*а*) и оргстекла (*б*)

Второй этап эксперимента был связан с оценкой степени поглощения упругой волны при ее прохождении через отдельные элементы, стыки контактирующих элементов и весь огнеупорный комплект опытного образца шиберного затвора. Вибрационное воздействие реализовали с помощью двух пневматических вибраторов, закрепленных на его нижней обойме (рис. 9). Снижение интенсивности колебательного процесса на разных частотах в

зависимости от линейного размера огнеупорного элемента и упругих свойств его материала оценивали с помощью анализатора вибрации 795 М.

Степень поглощения упругой волны при ее прохождении через тело огнеупорного изделия определяли по значению коэффициента затухания вибрационного сигнала, вычисленного по формуле:

$$\alpha = \frac{a_{\text{н}}}{a_{\text{в}}} \qquad (10)$$

где $a_{\text{н}}$ – значение виброускорения для заданной частоты колебаний, возбуждаемых пневматическом вибратором при его контакте с нижней поверхностью огнеупора; $a_{\text{в}}$ – значение виброускорения в точке контроля на верхней поверхности огнеупора.

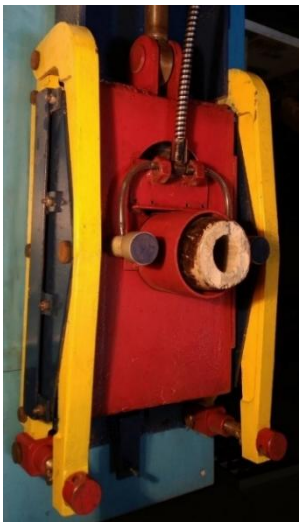


Рисунок 9 – Опытный образец затвора с пневмовибраторами

Коэффициенты затухания вибрационного сигнала для ковшового стакана, шиберных плит и стакана-коллектора составили 2,3, 4 и 2 соответственно. Значения этого показателя на стыках колеблются от 1,01 до 1,54.

При вибрационном воздействии на весь комплект огнеупоров в составе затвора коэффициент затухания сигнала при разной интенсивности колебательного процесса составили 11,86 и 11,43, т.е. практически были одинаковыми. Данные, полученные в ходе лабораторных экспериментов, учтены при разработке рекомендаций по промышленному использованию результатов выполненной разработки.

Также в разделе приведены рекомендации по перспективным направлениям продолжения научных исследований, связанных с повышением эффективности использования катапульты и системы вибрационного воздействия в современных разливочных системах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа практического использования шиберных затворов установлено, что скользящие ковшовые затворы последнего поколения обеспечивают кратность применения одного комплекта огнеупорных изделий в пределах 3–8 разливок. При этом одним из ключевых факторов, отрицательно влияющих на эффективность функционирования затворов и сокращение кратности применения огнеупоров, выступает необходимость применения кислорода для прожигания твердой корки, образующейся на поверхности стартовой смеси и препятствующей свободному истечению стали при открытии затвора (что на практике фиксируется в 5% разливок), а также для периодической промывки сталевыпускного канала, затягиваемого тугоплавкими отложениями в процессе разливки, формирование которых искажает проходное сечение канала и негативно сказывается на скоростном режиме выдачи стали (что на практике фиксируется в 3% разливок). Для

обеспечения начала разливки в штатном режиме и снижения интенсивности процесса зарастания канала ковшового затвора следует признать перспективным применение в составе разливочной системы специальной катапульты, способной в автоматическом режиме при открытии затвора механически разрушить образующуюся на поверхности стартовой смеси твердую корку, а также вибрационной системы с обоснованными конструктивными и энергосиловыми параметрами. Критерием эффективности предложенных решений становится обеспечение разливки в заданных режимах в 100% случаев.

2. Адаптированная математическая модель, описывающая прочностные параметры твердой корки на входе в выпускной канал сталеразливочного ковша, может быть использована для получения расчетных значений толщины твердой корки, выдерживающей давление столба стали при открытии затвора сталеразливочного ковша. Математическое моделирование также показало, что при вибрационном воздействии на разливочный узел ковша с ускорением 100–160 м/с^2 значение сил, отрывающих частицы радиусом 0,5 мм от стенки выпускного канала, увеличивается в 1,6–2,5 раза, т.е. создаются условия, способствующие снижению интенсивности процесса его затягивания, поскольку частицы не задерживаются на поверхности выпускного канала. Для экспериментального подтверждения корректности полученных зависимостей был проведен ряд модельных исследований посредством различных физических моделей.

3. Разработаны защищенные патентами РФ технические решения по усовершенствованию скользящего ковшового затвора путем его оснащения катапультой для разрушения твердой корки (пат. РФ на изобретение №2751946) и системой вибрационного воздействия, состоящей из комплекта пневматических вибраторов, направление приложенной колебательной нагрузки со стороны которых совпадает с осью разливки (пат. РФ на изобретение № 2751196).

4. Получены зависимости для определения рациональных энергосиловых параметров катапульты и системы вибрационного воздействия на огнеупорные элементы шиберного затвора, формирующие его сталевыпускной канал. Особенностью расчета параметров катапульты становится использование возможной толщины корки, полученной на основе адаптированной математической модели. Особенностью расчета параметров вибрационной системы становится учет коэффициента затухания вибрационного сигнала, численные значения которого получены в результате экспериментальных исследований прохождения упругой волны через огнеупорный комплект затвора.

5. Выполнена экспериментальная проверка правильности принятых технических решений и корректности полученных расчетных зависимостей путем лабораторных модельных исследований на физической модели, представляющей собой опытный образец ковшового затвора, оснащенный катапультой и системой вибрационного воздействия из двух пневматических

вибраторов. Определены результаты срабатывания катапульты на имитаторах твердой корки из различных материалов для воспроизведения условий разрушения препятствия, находящегося в пластичном и хрупком состояниях. Путем измерений параметров вибрации получена информация о коэффициенте затухания вибрационного сигнала при прохождении сквозь отдельные детали огнеупорного комплекта, их стыки и полный комплект огнеупоров в затворе.

6. Выданы рекомендации по расчету и конструированию опытно-промышленного образца модернизированного шиберного затвора в виде методик определения расчета энергосиловых параметров катапульты, сводящихся к конструктивным размерам упругих элементов конструкции, и энергосиловых параметров вибрационной системы, сводящихся к определению числа и основных конструктивных параметров пневматических вибраторов. Методики расчёта энергосиловых и конструктивных параметров катапульты и вибрационной системы, предназначенных для использования в качестве структурных элементов модернизированного ковшового затвора, переданы машиностроительным предприятиям ООО «Волгодонский энергомеханический завод» (г. Волгодонск, Ростовская обл.) и ООО «Горловский энергомеханический завод» (г. Горловка, ДНР) для практического применения при проектировании и изготовлении разливочного оборудования сталеплавильных цехов. Ожидаемый экономический эффект по внедрению предложенных технических решений для сталеплавильного цеха с годовой производительностью выплавки 1 000 000 тонн стали и вместимостью ковшей 100 тонн составит 5 207 972 росс. руб. в год (по данным ООО «Волгодонский энергомеханический завод») или 5 372 150 росс. руб. в год (по данным ООО «Горловский энергомеханический завод»). Материалы диссертационного исследования также внедрены в образовательный процесс на кафедре «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша» ФГБОУ ВО «ДОННТУ» и используются при обучении студентов по направлению подготовки 15.04.02 «Инжиниринг и технический менеджмент металлургического оборудования» при изучении ими дисциплины «Инновационное металлургическое оборудование».

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций:

1. Понамарева, Е.А. Разработка конструкции и проверка работоспособности усовершенствованной модели катапульты для открытия ковшового затвора / Е.А. Понамарева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 8. – С. 130-139.

2. Еронько, С.П. Модернизация и модельные исследования манипулятора для замены защитной огнеупорной трубы при непрерывной

разливке стали / С.П. Еронько, В.Л. Данилов, М.Ю. Ткачев, В.В. Тиняков, Е.А. Понамарева // Металлург. – 2020. – № 4. – С. 30-35.

Изобретения, защищенные патентами РФ:

3. Патент № RU 2751946 C2, МПК B22D 41/08, B22D 41/46 (2020.08). Катапульта для открытия выпускного канала металлургического ковша с донным шиберным затвором : № 2019128141 : заявл. 06.09.2019 : опубл. 21.07.2021 / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, А.А. Байчоров, Е.А. Понамарева, Д.О. Федяев, А.А. Байчоров; заявитель ООО «Волгодонский энергомеханический завод». – 6 с.

4. Патент № RU 2751196 C2, МПК B22B 41/22 (2020.08). Ковшовый шиберный затвор : № 2019128142 : заявл. 06.09.2019 : опубл. 12.07.2021 / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, А.А. Байчоров, Е.А. Понамарева, Д.О. Федяев, А.А. Байчоров; ООО «Волгодонский энергомеханический завод». – 5 с.

Статьи в прочих изданиях:

5. Еронько, С.П. Модельные исследования влияния вибрационного воздействия на процесс зарастания канала ковшового затвора / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, Е.А. Понамарева // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 11. – С. 51-57.

6. Еронько, С.П. Разработка вибрационной системы снижения интенсивности процесса затягивания выпукного канала сталеразливочного ковша/ С.П. Еронько, Е.А. Понамарева, Е.С. Цыхмистро // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т 77. – № 2. – С. 165-174.

7. Еронько, С.П. Разработка новой конструкции и модельные исследования функционирования катапульты для ковшового затвора / С.П. Еронько, Б.И. Стародубцев, Е.А. Понамарева, Е.С. Цыхмистро // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т 77. – №5. – С. 540-546.

8. Еронько, С.П. Обоснование энергосиловых параметров катапульты шиберного затвора сталеразливочного ковша / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, Е.А. Понамарева, Е.С. Цыхмистро. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – Т.78. – №10. – 2022. – С. 858-864.

9. Еронько, С.П. Модельные исследования параметров работы вибрационных устройств для систем ковшовых затворов / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, М.Ю. Ткачев, Е.А. Понамарева // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2018. - №11 (54). – С. 119-128.

10. Еронько, С.П. Оценка интенсивности поглощения упругих волн огнеупорами ковшового затвора в процессе вибрационного воздействия / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, Е.А. Понамарева, В.А. Сидоров, Е.В.Ошовская // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2019. – № 16 (59). – С. 69-77.