

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
Еронько Сергей Петрович,
доктор технических наук, профессор

Донецк – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ КОВШОВЫХ ЗАТВОРОВ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	14
1.1 Анализ главных достижений в совершенствовании конструкций шибберных затворов сталеразливочных ковшей.....	15
1.2 Проблемы, требующие решения при разливке стали с использованием шибберных затворов	28
1.3 Пути повышения эффективности функционирования затворов разливочных и литейных ковшей.....	42
1.4 Выводы	44
2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО НАЧАЛО РАЗЛИВКИ БЕЗ НЕОБХОДИМОСТИ ПРОЖИГАНИЯ КИСЛОРОДОМ КОРКИ НА ВХОДЕ В КАНАЛ КОВШОВОГО ЗАТВОРА.....	45
2.1 Теоретические и модельные исследования прочностных параметров перемычки, блокирующей входное отверстие выпускного канала сталеразливочного ковша.....	45
2.2 Разработка рациональной конструкции катапульты для пробивания застывшей корки на поверхности стартовой смеси в канале разливочного стакана	61
2.3 Исследование на физической модели функционирования катапульты во время ее срабатывания при открытии затвора	68
2.4 Получение теоретических зависимостей для определения энергосиловых параметров катапульты промышленного образца затвора и экспериментальная проверка правильности расчетных данных	74
2.5 Выводы	81

3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОГНЕУПОРНУЮ ЧАСТЬ КОВШОВОГО ЗАТВОРА С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЗАТЯГИВАНИЯ ЕГО КАНАЛА.....	82
3.1 Теоретическое обоснование возможности влияния вибрационного воздействия на интенсивность зарастания канала ковшового затвора	83
3.2 Изучение на физической модели процесса затягивания канала затвора при различных условиях реализации разливки стали	88
3.3 Выбор рациональной конструктивной схемы вибратора для применения в системе ковшового затвора	97
3.4 Разработка конструкции ковшового затвора, снабженного системой вибрационного воздействия на его комплект огнеупорных изделий.....	108
3.5 Обоснование энергосиловых параметров работы вибрационной системы ковшового затвора.....	118
3.6 Выводы	128
4 РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО КОВШОВОГО ЗАТВОРА, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЕГО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУТЕЙ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ	129
4.1 Экспериментальная проверка срабатывания катапульты на	130
опытном образце ковшового затвора	130
4.2 Оценка интенсивности вибрационного воздействия пневматических вибраторов на базовый огнеупорный комплект ковшового затвора и рекомендуемые параметры их работы	135
4.3 Усовершенствование конструкции катапульты для открытия канала ковшового затвора	144
4.4 Расширение зоны применения вибрационного воздействия в отношении разливочных устройств металлургического производства.....	150
4.5 Выводы	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159
Приложение 1. Акт внедрения материалов диссертационной работы в производственную деятельность ООО «Волгодонский энергомеханический завод».....	174
Приложение 2. Акт внедрения материалов диссертационной работы в производственную деятельность ООО «Горловский энергомеханический завод».....	176
Приложение 3. Акт внедрения материалов диссертационной работы в учебную деятельность ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет».....	178
Приложение 4. Патент на катапульту для открытия выпускного канала металлургического ковша с донным шиберным затвором.....	179
Приложение 5. Извещение о внесении изменений в фамилию автора патента на изобретение в связи с допущением ошибки при первой публикации.....	180
Приложение 6. Пример расчета геометрических и энергосиловых параметров катапульты для открытия выпускного канала металлургического ковша с донным шиберным затвором.....	181
Приложение 7. Патент на ковшевой шиберный затвор с вибрационной системой.....	183
Приложение 8. Пример расчета энергосиловых параметров вибрационной системы ковшового затвора.....	184

ВВЕДЕНИЕ

Проект развития металлургической отрасли Российской Федерации на период вплоть до 2030 года в качестве одной из ключевых стратегий определяет актуализацию требований к используемому оборудованию с учетом современных требований в области безопасности.

Такой подход неразрывно связан с увеличением степени автоматизации основных технологических процессов, комплексным повышением надежности и эффективности применения технологического и вспомогательного оборудования, а также поэтапным уменьшением доли ручного труда на всех стадиях реализации производственных процессов.

Но переход на следующий уровень автоматизации невозможен без обеспечения надежности функционирования структурных составляющих технологического процесса. Нельзя двигаться дальше к усовершенствованию металлургического производства, освоению принципиально новых продуктов и наращиванию мощностей, не достигнув безотказности в реализации простых операций и переходов. Именно безотказность и надежность, как синонимы предсказуемости и управляемости ключевыми рабочими процессами, должны стать фундаментом для дальнейшего технологического развития. И потому столь важно возвращаться к хорошо изученным и повсеместно внедренным технологиям, поднимая и раскрывая с нового ракурса до сих пор не решенные проблемы, в поисках эффективных технических решений, которые еще 20 лет назад были неочевидны или труднореализуемы.

Глава Минпромторга РФ Денис Мантуров в декабре 2022 года в числе ключевых параметров стратегии развития металлургии в России до 2030 года назвал обеспечение технологического суверенитета в части сложного оборудования для выплавки стали. Тактика постоянного приобретения технически совершенной продукции за рубежом доказала свою уязвимость и ущербность в условиях экономического и политического кризиса последних лет. Необходимо

вести постоянные научно-технические изыскания в области непрерывного совершенствования сталеразливочного оборудования, надежность и функциональность которого оказывает прямое влияние на конечное качество и себестоимость металлургического продукта.

Актуальность работы. Основным направлением развития сталеплавильного производства в современных условиях является разработка прогрессивных технологий и нового оборудования, обеспечивающих повышение качества выпускаемой металлопродукции. Особая роль при этом отводится заключительному этапу процессов получения заготовок и отливок – разливке стали. В настоящее время в качестве разливочных устройств повсеместно применяют шиберные затворы, которыми в конце 70-х годов прошлого века заменили стопорные устройства. За прошедшие 50 лет шиберные системы постоянно совершенствовались, что отразилось в поэтапной смене их трех поколений. Последнее из них объединяет ковшовые затворы кассетного типа, обладающие высокими рабочими характеристиками с кратностью использования комплекта огнеупорных изделий от 3 до 8 разливок.

Несмотря на то, что ведущим зарубежным фирмам, поставляющим на рынок оборудование для разливки стали, удалось добиться значительных успехов в разработке высокоэффективных шиберных скользящих затворов, при их эксплуатации производители по-прежнему довольно часто сталкиваются с двумя остающимися нерешенными проблемами. Первая из них обусловлена необходимостью прожигания кислородом при первом открывании затвора твердой корки, образующейся в поверхностном слое стартовой смеси на входе в выпускной канал ковша и препятствующей началу свободного истечения из него жидкой стали. А вторая связана с периодически развивающимся по ходу разливки процессом налипания на стенках канала частиц, в результате чего резко снижается его пропускная способность и нарушается заданный скоростной режим подачи металла в промежуточный ковш.

Степень разработанности темы. В технической литературе представлены конструкции ковшовых затворов, обеспечивающих регулируемый перелив стали из

разливочного ковша в промежуточный ковш машин непрерывного литья заготовок, которые эксплуатируются в сталеплавильных цехах металлургических предприятий, и дозированную подачу жидкого металла в литейные формы при получении отливок в литейных цехах машиностроительных заводов.

Значительный вклад в развитие теории и практики процесса разливки стали с использованием шиберных затворов, внесли отечественные ученые и специалисты: Мачикин В.И., Шестопапов 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 приводов шиберных систем разных типов, а также позволили выдать рекомендации по практическому их использованию в сталеплавильных и литейных цехах.

В настоящее время продолжаются работы по созданию перспективных образцов шиберных затворов, снабженных специальными средствами, которые позволяют устранить или ослабить действие выявленных факторов, негативно влияющих на эффективность функционирования 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 работы – 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 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 $100\text{--}160\text{ м/с}^2$ обеспечивает увеличение в 1,6–2,5 раза сил, способствующих отрыву частиц радиусом 0,5 мм от стенки канала.

3. Используемый 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 пневматического вибратора, предназначенных для использования в качестве структурных элементов ковшового затвора, переданы ООО «Волгодонский энергомеханический завод» и ООО «Горловский энергомеханический завод» 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 плавов соответственно. Указанная информация подтверждена актами внедрения, приведенными в Приложениях 1 и 2.

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», что подтверждено актом использования в учебном процессе, приведенным в Приложении 3.

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 K1 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. Основные результаты диссертационного исследования рассматривались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» и 12 научно-технических конференциях: IV Международная научно-практической конференция «Инновационные перспективы Донбасса», Донецк, 22–25 мая 2018 г.; III Международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» 17 октября 2018 г., Алчевск, ДонГТУ; V Международная научно-практической конференция «Инновационные перспективы Донбасса», Донецк, 21–23 мая 2019 г.; XVIII Республиканская научно-техническая студенческая конференция «Технологические машины и оборудование», посвященная 90-летию кафедры «Энергомеханические системы» 26–28 ноября 2019 г., Донецк, ГОУ ВПО «ДОННТУ»; V Международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» 15 октября 2020 г., Алчевск, ГОУ ВО ЛНР ДонГТИ; V Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы металлургии чугуна и стали», Алчевск, 20 мая 2021, ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»; VII Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса», 24–26 мая 2021 г., Донецк, ГОУВПО «ДОННТУ»; VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса», 24–26 мая 2022 г., Донецк, ГОУ ВПО «ДОННТУ»; Юбилейная международная Научно-техническая конференция «65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные

вопросы и инновации» (13–14 октября 2022 г.), г. Алчевск, ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»; IX Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса», Донецк 24–26 мая 2023 г., Донецк, ГОУ ВПО «ДОННТУ»; XXXI Международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь, 16–22 сентября 2024 г., ФГБОУ ВО «ДОННТУ»; Международная научно-практическая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении», посвященная 80-летию Победы в Великой Отечественной войне и 85-летию города трудовой доблести Ишимбая, Ишимбай, Республика Башкортостан, 16–18 апреля 2025 г., филиал ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» в г. Ишимбае; XXI Международная научно-практическая конференция «Молодёжь и наука», Нижний Тагил, 23 мая 2025 г., Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагильский технологический институт (филиал).

Публикации. Основные положения выполненных исследований отражены в 24 работах, в том числе в 2 статьях, опубликованных в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах, а также 2 патентах РФ на изобретения.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех разделов, выводов к разделам, заключения, списка литературы из 123 позиций. Полный объем диссертации 187 страниц, включая 71 рисунок, 13 таблиц и 8 приложений.

1 ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ КОВШОВЫХ ЗАТВОРОВ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Объем мировой выплавки стали устойчиво растет из года в год. За последние 10 лет этот показатель вырос в 1,3 раза (с 1433 млн. тонн в 2010-ом году до 1864 млн. тонн в 2020-ом), а за 50 лет – в 3 раза (с 595 млн. тонн в 1970-ом) [1].

При этом столь же значимо выросла доля продукции, полученная технологией непрерывной разливки на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Если в 1972-ом году эта величина составляла менее 10% от всего объема полученной стали, то в 1990-ом году – уже 57...58%. Сегодня с помощью МНЛЗ разливают свыше 95% всего продукта, а суммарное количество действующих машин во всем мире превышает показатель в 1750 единиц техники [2].

Проект стратегии развития металлургической отрасли Российской Федерации на период до 2030-ого года предусматривает плановое и поэтапное увеличение объемов выплавки за счет модернизации производственных мощностей и интенсификации технологических процессов. Прогноз на 2030-ый год говорит о динамике этого показателя вплоть до 74,8 млн. тонн по консервативному сценарию, до 83,4 млн. тонн по умеренно-оптимистичному и до 95,8 млн. тонн по форсированному [3].

Устойчивое и стабильное развитие сталеплавильного производства возможно лишь с повышением уровня надежности и безотказности основного технологического оборудования. Наибольшие перспективы в вопросах промышленной разливки сталей демонстрирует применение шибберных скользящих систем, и потому технической эволюции этих машин в общей картине совершенствования предприятий черной металлургии следует уделить максимум внимания.

1.1 Анализ главных достижений в совершенствовании конструкций шиберных затворов сталеразливочных ковшей

Первый патент на затвор для ковшевой разливки стали, который действовал бы по принципу плоской задвижки, был зарегистрирован Дэвидом Льюисом в США в 1885 году. Изобретатель предложил использовать двухплитную систему скольжения огнеупоров, прямолинейный рабочий ход которой обеспечивал бы совмещение отверстий разливочного канала и их перекрытие [4]. Шиберные системы в значительной мере опередили своё время, и развитие вместе с активным промышленным распространением получили лишь почти столетие спустя – вместе с внедрением машин непрерывного литья.

Переход разливки на МНЛЗ от инновационной идеи к промышленному применению произошёл в 50-ых годах XX века [5]. Этот процесс неразрывно связан с постепенным замещением мартеновского метода выплавки стали кислородно-конвертерным производством, как более энергетически эффективным и менее трудоемким, а также позволяющим в короткое время производить большие объёмы продукции. Первый этап технического перевооружения предприятий черной металлургии в СССР приходится на период с 1959 по 1969 года [6]. Именно это время следует назвать стартовым моментом внедрения шиберных затворов на отечественных заводах.

Переоборудование разливочных ковшей шиберными системами взамен стопорных устройств в условиях сталеплавильных цехов металлургических предприятий было полностью завершено к концу семидесятых годов минувшего века. Уже к 1980 году все сталеразливочные ковши вместимостью от 60 до 350 тонн были оснащены шиберными затворами [5]. Это позволило существенно упростить реализацию прогрессивных методов внепечной обработки стали, которые предусматривали использование специальных функциональных крышек, устанавливаемых сверху на ковш (VD, VOD, VAD, AP, IP, LF-процессы).

Среди очевидных преимуществ шиберных разливочных механизмов следовало выделить: упрощение обслуживания ковшей и их подготовки, уменьшение времени межплавочных простоев и, как следствие, повышение оборачиваемости ковшей, экономию огнеупорных и футеровочных материалов, а также общее улучшение условий труда сталеваров [5–15].

Патенты на шиберные ковшовые затворы первого поколения указывают на общность базовых конструктивных решений при широком разнообразии конкретных исполнений [16, 17]. Каждое металлургическое предприятие изготавливало устройство под собственные нужды, отсутствовала система унификации шиберных систем.

Ковшовые затворы того времени представляли собой крупногабаритное сборное изделие, где внутри жесткого стального корпуса были расположены верхний и нижний блоки огнеупоров (ковшевой стакан, две плоские ответные плиты, стакан-коллектор). Общий вид таких изделий представлен на рисунках 1.1 и 1.2.

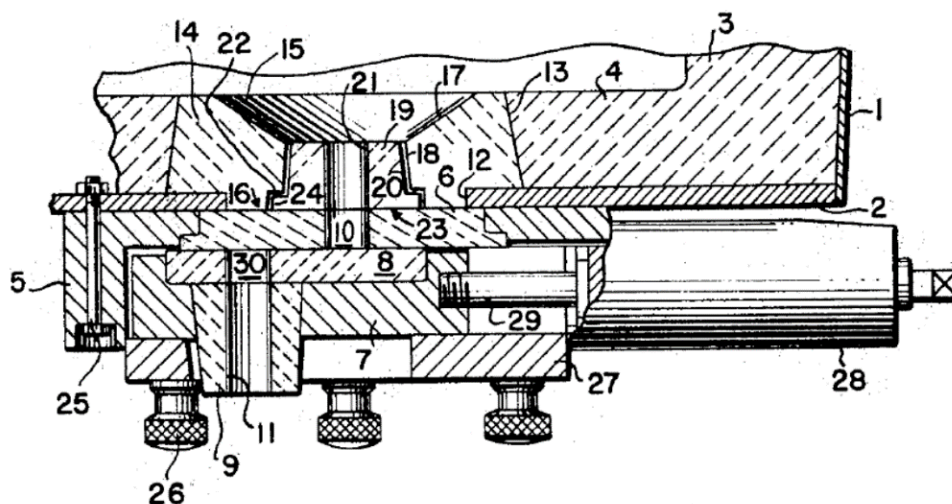


Рисунок 1.1 – Продольный разрез шиберного затвора первого поколения, предложенный Е. Фичера (США, 1969 год).

Усилие прижатия блоков друг к другу, необходимое для устранения зазоров между контактирующими поверхностями, куда может уйти жидкий расплав при

разливке, обеспечивали за счет стяжки на болтовых соединениях. Сдвиговое усилие для прямолинейного смещения нижнего блока огнеупоров относительно неподвижного верхнего реализовали через рычажный тяговый механизм. Движение обеспечивали с помощью привода, монтированного на боковой стороне ковша.

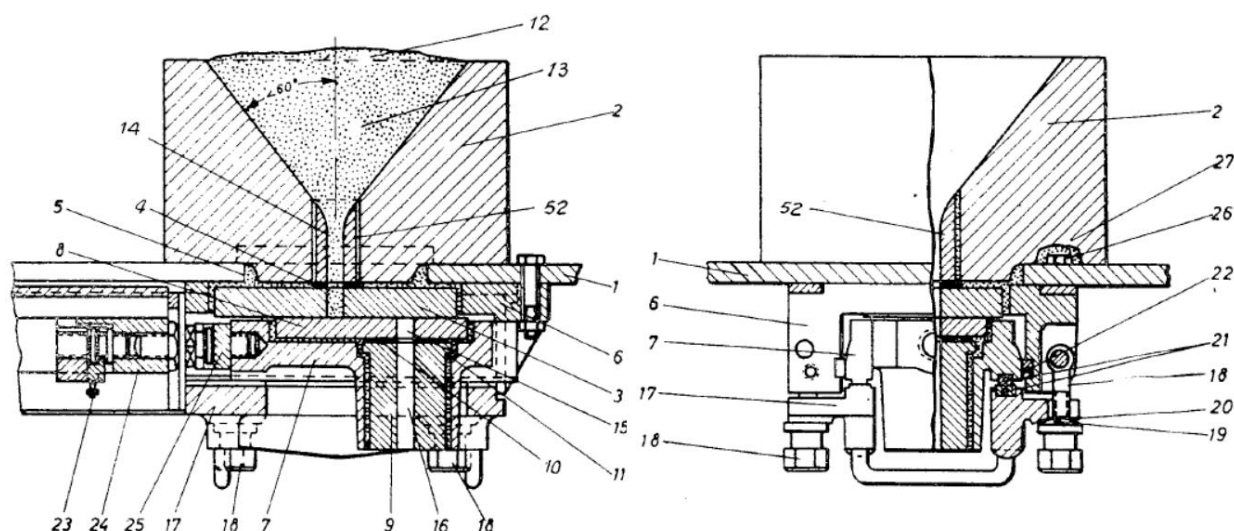


Рисунок 1.2 – Продольный и поперечный разрез шиберного затвора первого поколения, предложенный Клаусом Биком и Бернардом Тиннесом (США, 1970 год).

Стойкость ковшовых затворов первого поколения насчитывала до 100 плавов, замена огнеупоров выполнялась после каждой плавки и требовала многочасового обслуживания.

Шиберные системы второго поколения появились в 80-ых годах прошлого столетия и применялись вплоть до конца века. Они возникли как отклик на широкое распространение новой сталеплавильной технологии — высокопроизводительной выплавки стали с поэтапным технологическим воздействием на всех этапах производства.

Новая технология предусматривала получение в кислородном конвертере или электродуговой печи жидкого полупродукта со строго определенной температурой и величиной содержания углерода, а также последующее доведение

его до параметров целевой марки стали в установках типа «ковш-печь». Одним из ключевых требований к эффективности технологического процесса стала необходимость жесткого согласования цикличности работы всех плавильных агрегатов и машин. Стремительный рост производства, соразмерно растущие требования по уменьшению любых энергетических, технологических и временных потерь стали причиной разработки новых средств механизации разливки, способствующих сокращению времени на подготовку и обслуживание ковшей. Ответом на этот запрос стали шиберные затворы второго поколения.

Примеры конструкции ковшовых затворов второго поколения приведены на рисунках 1.3 и 1.4. Каждая иллюстрация указывает на определенное техническое решение, которое сыграло фундаментальную роль в развитии шиберных систем.

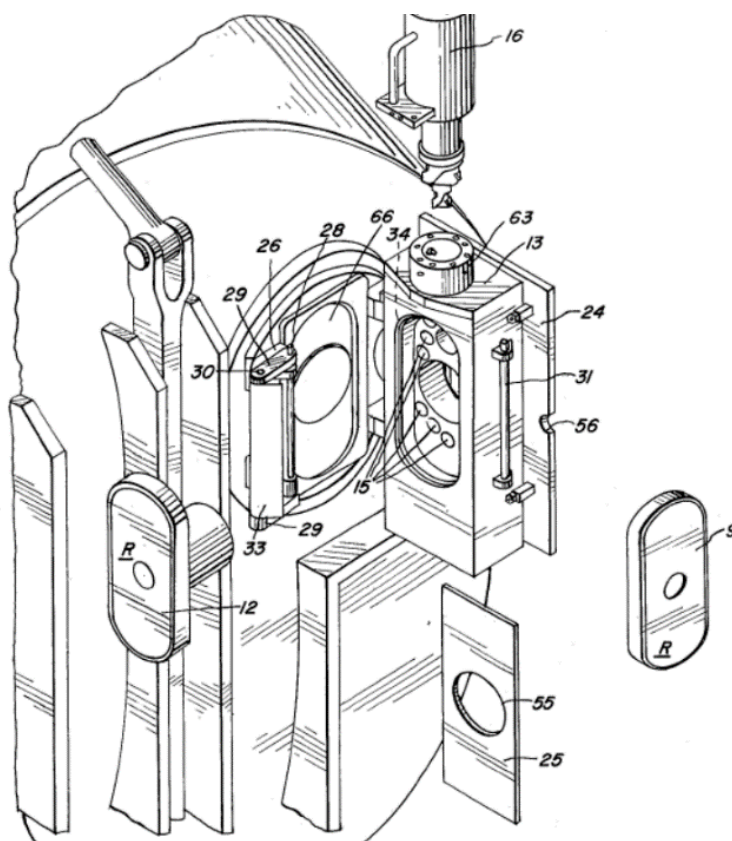


Рисунок 1.3 – Изображение новой конструкции корпусов для шиберных затворов типа «книжка» с указанием положения огнеупорных плит.

Иллюстрированное техническое решение предложено Эрлом и Джеймсом Шарпландами (США, 1977).

Распространение получила конструкция типа «книжка», ставшая впоследствии стандартной благодаря очевидному удобству в контроле состояния ковшевого затвора и ускоренной замены огнеупорного комплекта прямо на ковше, без вывода оборудования на профилактику [18–24].

От жесткой затяжки огнеупорных комплектов на резьбовых соединениях отказались в пользу использования пружинных и балансирных силовых узлов. Это позволило радикально усилить контроль за нагрузкой, которую испытывали огнеупоры, и распределить ее более равномерно. Снизился риск растрескивания и разрушения огнеупорных плит в процессе подготовки шиберного затвора в связи с перезатяжкой болтов в ручном режиме и концентрацией нагрузки на определенной зоне.

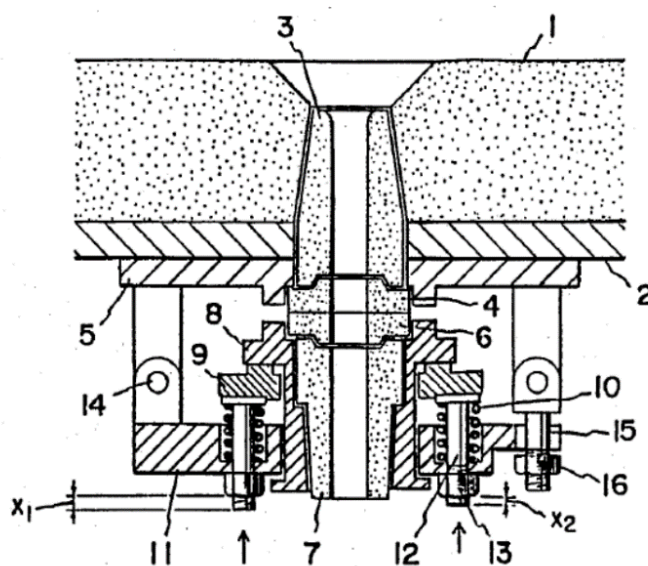


Рисунок 1.4 – Применение витых пружин для создания усилия, необходимого для прижатия огнеупорных блоков друг к другу. Схема соответствует изобретению компании «Kurosaki Refractories» (Япония, 1987)

В конструкцию стали закладывать преимущественно витые пружины или пакеты тарельчатых. Одновременно с этим практическим путем пришли к необходимости использования специальных жаропрочных сплавов для изготовления упругих элементов, поскольку близкое размещение к проходящему

сквозь разливочный канал потоку жидкого расплава приводило к тому, что пружины неизменно работали в условиях свыше $+500^{\circ}\text{C}$, что отрицательно сказывалось на их стойкости и жесткости. В работе начали применять изделия из нержавеющей высоколегированных сталей и сплавов на основе хрома, никеля, молибдена и ванадия.

В этот же период были предложены первые решения с радиальным смещением круглых огнеупорных плит взамен прямолинейного хода перекрытия, но широкого применения в промышленности такие шиберные системы не нашли [25]. Затворы с радиальным перемещением огнеупорного комплекта обеспечивали увеличенный ресурс использования огнеупоров и более плавную регулировку скорости разливки без дросселирования струи. Среди наиболее интересных моделей – предложенные фирмами «United States Steel» (США), «Nippon Kokan Kaisha» (Япония) и «Metacore» (Швеция). На рисунке 1.5 приведено изображение затвора поворотного типа, разработанного ДонНТУ [5].

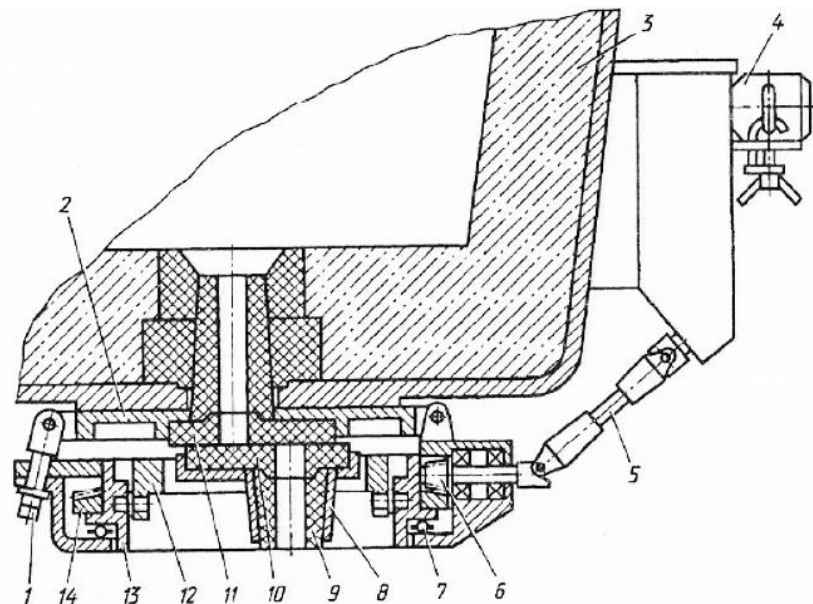


Рисунок 1.5 – Затвор поворотного типа конструкции ДонНТУ

Для шиберных разливочных устройств второго поколения в качестве привода перешли преимущественно на гидравлические цилиндры, соединенные с подвижной тележкой шиберного затвора, где был установлен нижний блок

огнеупоров (плита и стакан-коллектор). В ряде случаев такое решение дало возможность исключить промежуточные рычажные механизмы и действовать напрямую, а также обеспечило необходимую плавность и постоянство скорости перемещения. Основные варианты схем подключения гидропривода приведены на рисунке 1.6 [26].

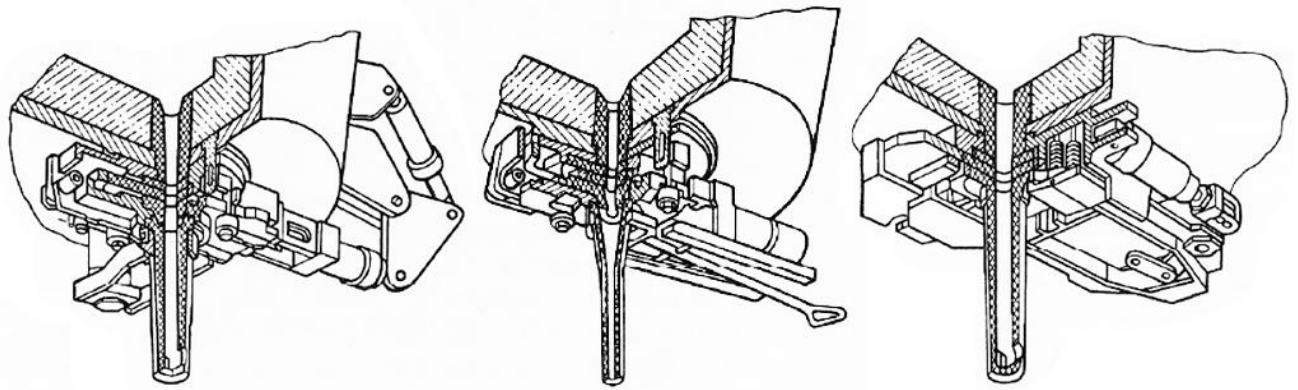


Рисунок 1.6 – Варианты подключения гидропривода для управления шиберным затвором

Конкуренцию гидравлическим приводам составили приводы электромеханического типа и пневмоцилиндры, но их суммарная доля в общем объеме эксплуатируемых шиберных систем оказалась гораздо меньшей.

Первые модели шиберных затворов второго поколения позволяли выполнять 600...700 плавов до первого капитального ремонта. К 2000-ому году стойкость таких изделий в работе достигала уже 900 плавов. Кроме того, внесенные конструктивные изменения позволили сократить время на подготовку разливочной системы ковша к работе до 20–30 минут против нескольких часов, которые затрачивали на это ранее [26].

Начало XXI века совпало с выпуском ковшовых шиберных систем третьего поколения, которые сегодня прочно заняли всю нишу шиберной разливки в металлургической отрасли. Радикальных изменений и инноваций в конструкции больше не было, а основной упор в модернизации был сделан на повышение надежности работы силовых узлов, обеспечивающих прижим огнеупорного

комплекта, и работы подвижных узлов, обеспечивающих реализацию перемещения тележки с нижней огнеупорной плитой и стаканом-коллектором [27].

На рисунке 1.7 приведены основные варианты конструктивных решений, реализованных в конструкции современных шиберных систем.

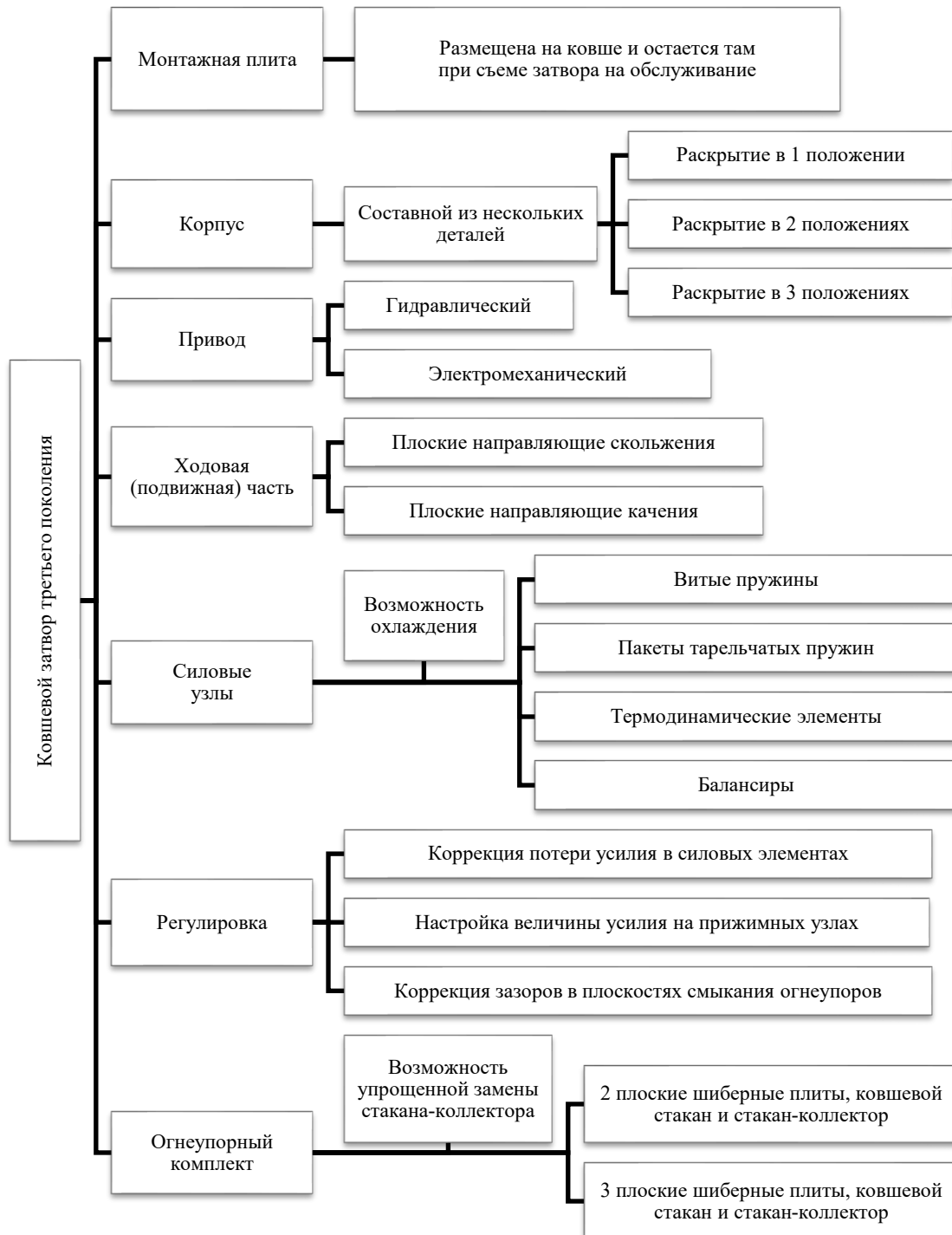


Рисунок 1.7 – Основные варианты технических решений, реализованных в конструкции современных шиберных систем

Как правило, серийным выпуском ковшовых затворов занимаются те же фирмы, что и массово поставляют на рынок огнеупорные материалы и изделия для футеровки сталеплавильных машин и агрегатов.

Сегодня среди наиболее значимых и крупных мировых производителей шиберных устройств следует выделить компании: «Vesuvius» (Бельгия), «Knoellinger FLOCON GmbH» (Германия), «RHI Magnesita-Interstop» (Австрия) и «Shinagawa» (Япония). Множество индийских, южнокорейских, китайских и турецких производителей работают по франшизам от этих марок, выпуская близкие аналоги с минимальным конструктивным изменением. Российское производство представлено самобытными брендами ОАО «Шибер» и ООО НПП «Вулкан-ТМ».

На рисунках 1.8–1.11 приведены изображения современных шиберных затворов для сталеразливочных ковшей различных производителей.



Рисунок 1.8 – Общий вид затвора модели Вулкан-ТМ ВТ-50В (Россия)



Рисунок 1.9 – Общий вид затвора модели Knoellinger 6317.3 (Германия)

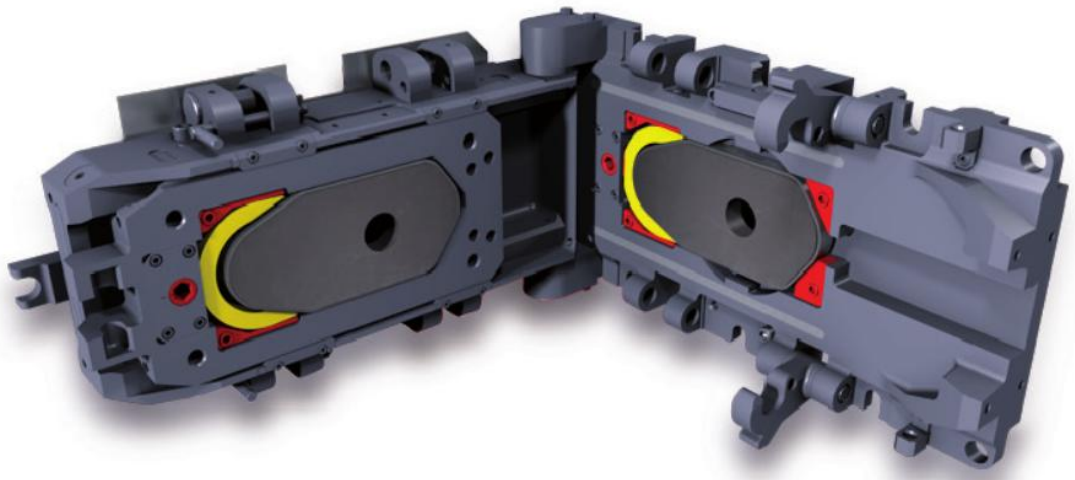


Рисунок 1.10 - Общий вид двухплитного шиберного затвора модели Vesuvius LG22L (Бельгия)

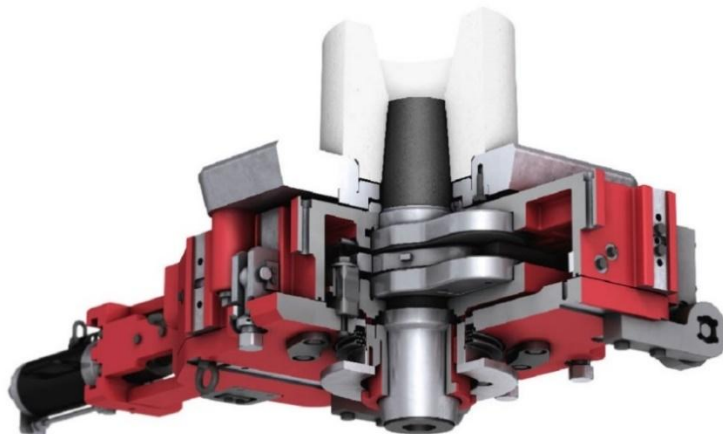


Рисунок 1.11 – Общий вид трехплитного шиберного затвора модели Interstop SLG (Швейцария)

В конструкции шиберных систем третьего поколения появились решения, позволяющие эффективно контролировать температурный режим работы силовых узлов (пружин) при помощи направленной и постоянной подачи сжатого воздуха или инертного газа в область их непосредственного размещения. Трубопровод охлаждения монтируют как поверх корпуса отдельной сборочной единицей, так и формируют за счет сложной системы отверстий внутри корпуса.

Современные шиберные затворы получили определенную долю гибкости в наладке и регулировке ключевых рабочих параметров, в том числе за счет возможности корректировать величину усилия на силовых элементах.

Такая функция позволяет решить сразу две технические задачи:

1) Регулировать усилие на силовых узлах устройства с целью адаптации рабочей нагрузки под прочностные характеристики конкретного огнеупорного комплекта. Результат – достигается такая величина нагрузки, которой достаточно для обеспечения безопасной разливки, но она не несет угрозы снижению ресурса огнеупоров из-за чрезмерно нагруженного состояния (раскрашивание, растрескивание и т.д.).

2) Корректировать величину усилия на силовых узлах по мере их износа или ослабления вследствие термических воздействий. Результат – при замене огнеупорного комплекта непосредственно на ковше можно сразу же проверить состояние пружин и корректировать положение ослабленных таким образом, чтобы вновь достигнуть нужного усилия.

Технологическим прорывом в комплектации шиберных устройств стало применение особых силовых узлов – т.н. термодинамических элементов. Это пружинные изделия, чье действие основано на суммарной упругой работе механической и газовой части. Внутри герметичной емкости размещают многослойный сильфон, обладающий собственной жесткостью. Он передает около 20% результирующего усилия, а остальную нагрузку создает уплотнение инертного газа (азота), закаченного в полость с определенным давлением. В гибридном исполнении такую конструкцию дополняют витой пружиной из жаропрочного хромоникелевого сплава. Изображение подобной газовой пружины приведено на рисунке 1.12.

В стартовом состоянии при размещении в шиберном затворе такие термодинамические силовые элементы демонстрируют усилие, достаточное для неподвижного удержания плит огнеупорного комплекта. Вместе с началом разливки и сопутствующим нагревом газ в полости расширяется, соразмерно увеличивается и действующее усилие на каждой газовой пружине. Подобное

решение было реализовано на шиберных затворах производства «Knollinger-FLOTEC GmbH» (Германия) [28-31].

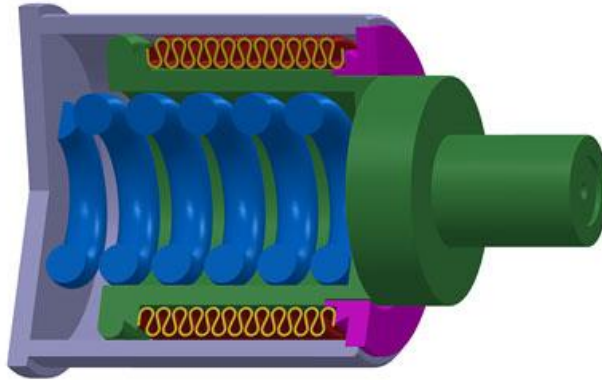


Рисунок 1.12 – Термодинамический элемент (газовая пружина), предложенная фирмой «Nutberry Limited» (Великобритания)

Радикальное повышение надежности работы ковшовых затворов было достигнуто за счет отказа от привычных направляющих скольжения «плоскость по плоскости», за счет которых было реализовано основное рабочее перемещение подвижной части устройства. В процессе эксплуатации неоднократно возникали ситуации, когда вследствие продолжительного интенсивного нагрева при разливке (от 30 до 120 минут) происходило заклинивание подвижной тележки и закрытие затвора становилось невозможным. Также использование плоских направляющих скольжения, даже усовершенствованных износостойкой наплавкой специальными твердыми сплавами, всегда сопряжено с весьма ощутимым механическим износом рабочих поверхностей [32].

Решением стал переход на линейные направляющие качения. Было предложено два основных варианта: сборка дорожки из роликовых подшипников, по которой будет катиться плоская лыжа-направляющая, и система перемещения вдоль паза, внутри которого установлены опорные ролики [33, 34]. Оба конструктивных исполнения приведены на рисунке 1.13.

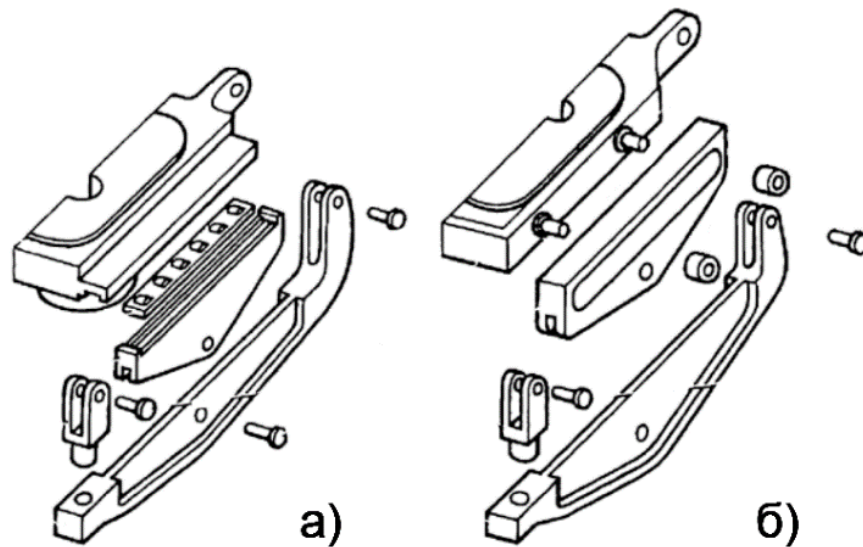


Рисунок 1.13 – Переоборудование шиберного затвора направляющими качения: а) плоская лыжа ездит по дорожке из роликов; б) опорные ролики движутся внутри паза

Отдельной веткой развития современных шиберных систем для разливки стали следует назвать устройства, предназначенные не для металлургического производства, а для литейных цехов и ковшей малой вместимости. Выпуск жидкого металла из таких емкостей в 100% случаев выполняют при помощи стопорных механизмов, но перевод ковшей на шиберную разливку открывает обширные перспективы для повышения производительности литейных процессов.

О первых отечественных опытах в этой области докладывали ОАО «Шибер» и ООО НПП «Вулкан-ТМ», предложив потребителю новую линейку уникальных затворов именно для литейных ковшей [35–41].

Среди преимуществ шиберной разливки в области промышленного литья указывают:

- сокращение операционного времени за счет увеличения скорости закрытия и открытия канала при переезде между формами;
- снижение потерь металла на выпуске из емкости;
- повышение уровня безопасности обслуживания оборудования в процессе разливки;

- увеличение ресурса использования огнеупорных изделий;
- улучшение конечного качества отливок.

Таким образом, благодаря достижениям в области разливки стали за последнее двадцатилетие, применяемые в настоящее время шиберные системы, разработанные ведущими европейскими и российскими фирмами, позволяют повысить кратность использования комплекта огнеупорных изделий затвора с 1–2 до 3–8, сократить общую длительность его подготовки к работе с 2–3 часов до 20–30 минут и довести обеспечиваемое им число разливок до 500.

Дальнейшее развитие скользящих шиберных систем для выпуска жидкого расплава перспективно как в условиях классических заводов черной металлургии, для высокопроизводительных слябовых и сортовых МНЛЗ, так и в условиях мини-металлургических заводов и литейных цехов.

Ключевым ориентиром должна стать стратегия комплексного повышения надежности функционирования таких устройств и их модернизация с целью совмещения операций разливки с иными технологическими воздействиями на жидкий расплав.

1.2 Проблемы, требующие решения при разливке стали с использованием шиберных затворов

В процессе подготовки металлургического ковша к приему расплава полость сталевыпускного канала в комплекте огнеупоров затвора заполняют специальной стартовой смесью, представляющей собой огнеупорный порошок, устойчивый к смачиванию со стороны жидкой стали и спеканию под действием температуры около 1600–1650°C [42, 43]. При открытии затвора стартовая смесь должна свободно высыпаться, освобождая полость сталевыпускного канала для истечения стали.

Однако в ряде случаев, когда хранение и подготовка стартовой смеси реализованы с нарушениями технического регламента, а смесь была переувлажнена и недостаточно просушена перед использованием, в зоне контакта поверхностных слоев порошка с жидким металлом образуется тонкая корка, представляющая собой результат единовременного смачивания и спекания, дополнительно уплотненная ввиду воздействия высокого ферростатического давления со стороны расплава в полости ковша [44, 45]. Подобная перемычка способна выдерживать действующее на нее усилие со стороны столба расплава и препятствовать свободному истечению металла при открытии ковшового затвора. Это явление в том числе наблюдается при разливке стали с повышенным содержанием марганца и алюминия [46, 47]. Также известны исследования, связывающие увеличение частоты спекания стартовой смеси в корку с присутствием хрома [48]. Таким образом, можно сделать вывод, что проблема образования непроницаемой перемычки на входе в сталевыпускной канал разливочного устройства актуальна при разливке легированных, особо ценных марок сталей.

Для оперативной ликвидации подобного препятствия используют прожигание кислородом, который подают по изогнутой металлической трубке, вводимой снизу через полость стакана-коллектора. Операцию производят вручную, что влечет за собой не только дополнительные потери во времени, но и представляет неудобство и даже опасность для рабочего. Кроме того, использование кислорода влечет за собой повреждение поверхности стенок выпускного канала, искажение исходного профиля сечения канала и образование значительного количества оксидных включений. Всё это в сумме в конечном итоге способствует ухудшению условий организации струи, истекающей из ковша, и загрязнению жидкого металла нежелательными примесями.

Поэтому одним из направлений исследований, проводившихся в последние годы и связанных с повышением эффективности функционирования шиберных затворов металлургических и литейных ковшей, выступил поиск технических и

технологических решений, которые бы позволили избежать появления твердой корочки в верхнем слое стартовой смеси в канале ковшового огнеупорного стакана.

Результаты анализа информации, опубликованной за последнее десятилетие в технической литературе, а также в описаниях изобретений, запатентованных в ряде промышленно развитых стран, дали возможность выявить три основных пути обеспечения начала разливки стали без промывания кислородом канала сталеразливочного ковша:

1) за счет подбора новых составов стартовых смесей с ингредиентами, препятствующими их спеканию при контакте с жидкой сталью;

2) благодаря формированию с помощью специальных приспособлений на свободной поверхности сыпучего материала лунок или углублений, профиль которых обеспечивает снижение несущей способности перемычки в случае ее возникновения;

3) посредством размещения в канале стакана-коллектора специальных пружинных катапульти, срабатывающих после полного открытия затвора и выталкивающих вверх металлические элементы, оказывающие динамическое силовое воздействие на спекшийся слой стартовой смеси «снизу вверх».

Множество прикладных научных исследований посвящено разработке специальных стартовых смесей, подобранных в соответствии с химсоставом разливаемой стали, в составе которых присутствуют дополнительные ингредиенты, препятствующие спеканию порошка при контакте с расплавом [49–52]. Такой подход придерживается стратегии строгой индивидуализации применения стартовых смесей в соответствии с особенностями разливки различных марок сталей, что в существенной степени усложняет процедуру подготовки металлургических ковшей.

Также известен российский патент [53], предлагающий засыпку полости сталевыпускного канала в огнеупорах стартовой смесью поверх слоя силикагеля, двухслойным наполнением. Предложенное решение проиллюстрировано на рисунке 1.14.

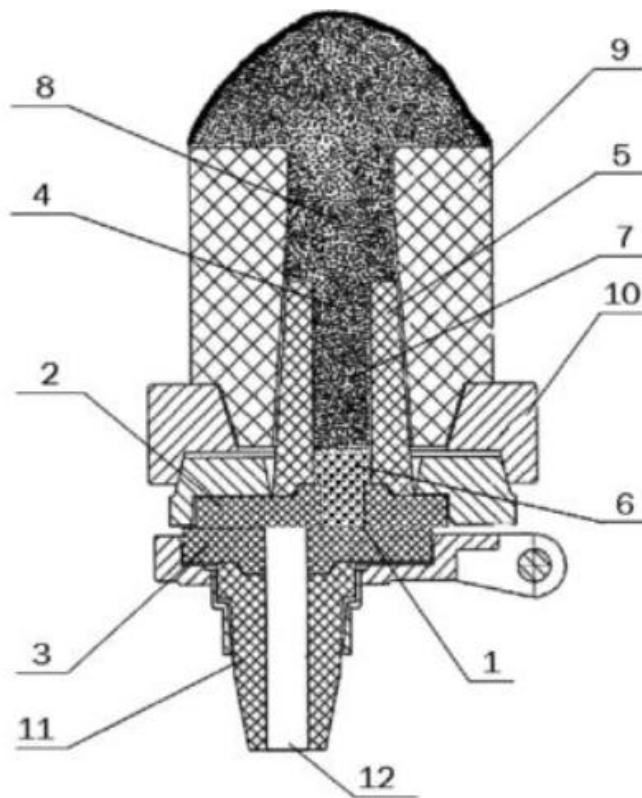


Рисунок 1.14 – Схема двухслойного заполнения канала ковшового стакана разными материалами:

- 1 – канал верхней огнеупорной плиты; 2 – неподвижная обойма затвора;
 3 – нижняя огнеупорная плита; 4 – канал ковшового стакана;
 5 – ковшовый стакан; 6 – слой силикогеля; 7 – стенка канала ковшового стакана;
 8 – слой стартовой смеси; 9 – гнездовой блок; 10 – днище ковша;
 11 – стакан-коллектор; 12 – канал стакана-коллектора.

Первый слой толщиной, превышающей на 30 мм уровень стыка верхней огнеупорной плиты затвора и ковшового стакана, образован силикогелем, предварительно просушенным до температуры 50–100°C, а второй (верхний слой) состоит уже непосредственно из стартовой смеси, нагретой до температуры 30–40°C. Благодаря адсорбции силикогелем влаги из стартовой смеси она не спекается при контакте с жидкой сталью и не образует твердой перемычки над входным отверстием канала ковшового стакана.

Следует отметить то обстоятельство, что наибольшую эффективность работы разливочного устройства ковша следует ожидать при использовании методик на основе третьего пути, предполагающего механическое разрушение затвердевшей перемычки на входе в сталевыпускной канал.

Как показал анализ результатов патентного поиска, в настоящее время имеются патенты на десятки конструктивных схем пружинных катапульти, заявленных за рубежом для использования в составе шиберных затворов, которыми оборудованы сталеразливочные и промежуточные ковши МНЛЗ. Однако практический интерес представляют только те, что нашли промышленное применение.

На рисунке 1.15 показана схема применения катапульти, защищенной патентом США [54] и предполагающая размещение в нижней части перекрытого канала шиберного затвора металлической капсулы цилиндрической формы. Ее положение фиксируют внутри стакана-коллектора с помощью трех распорных лепестков. Более подробное изображение устройства приведено на рисунке 1.16.

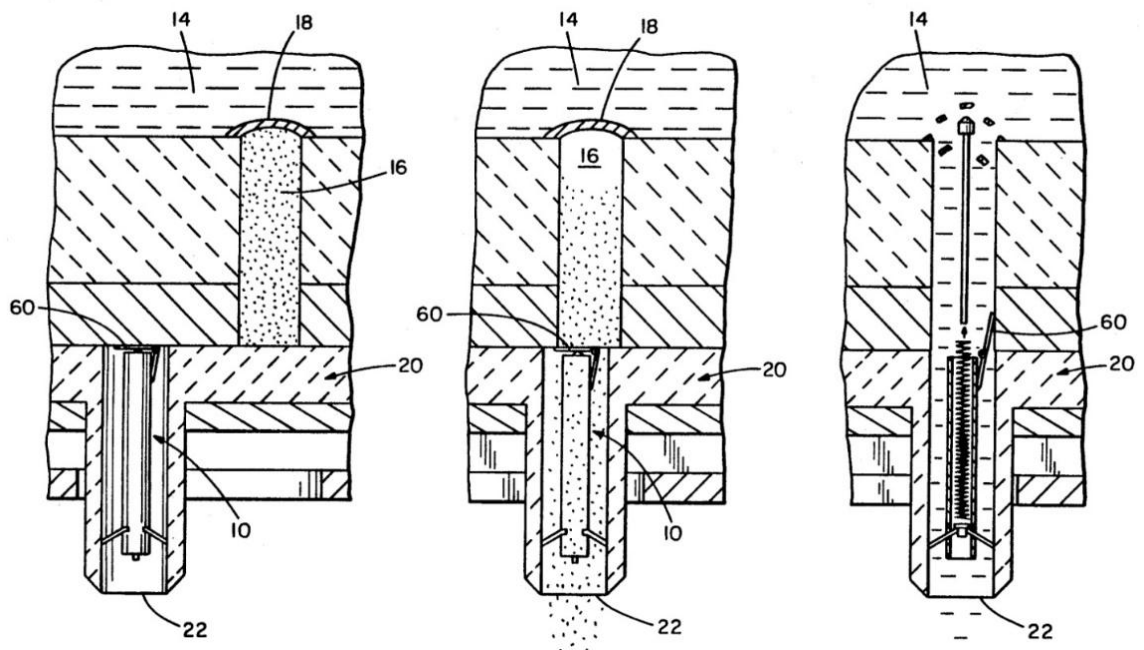


Рисунок 1.15 – Схема действия устройства для разрушения твердой корочки на входе в сталевыпускной канал разливочного ковша, запатентованного в США

Верхняя торцевая часть капсулы закрыта подпружиненной крышкой, упирающейся в рабочую поверхность верхней огнеупорной плиты. Она же удерживает в полости самой капсулы в напряженном состоянии высокую цилиндрическую пружину сжатия, которая оказывает силовое воздействие на заостренную головку стержня, размещенного соосно внутри ее витков.

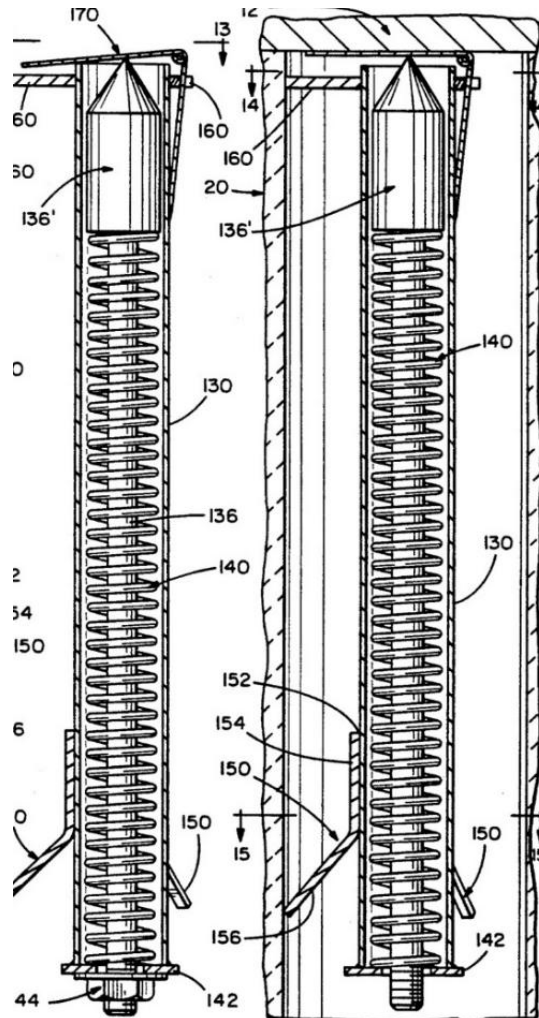


Рисунок 1.16 – Конструктивное исполнение пружинной катапульты ковшового затвора

При открытии затвора стартовая смесь высыпается из канала ковшового стакана через зазор между стенками капсулы и канала стакана-коллектора. В момент полного совмещения отверстий огнеупорных плит затвора крышка капсулы открывается, и стержень упругой силой сжатой пружины выталкивается

вверх и своей заостренной головкой разрушает твердую корку, сформировавшуюся на поверхности стартовой смеси. Предполагается, что хлынувшая через образовавшуюся пробойну жидкая сталь практически мгновенно разрушит распорные лепестки капсулы и вытеснит ее из канала затвора, после чего она, двигаясь в потоке металла, должна расплавиться.

К недостаткам данной системы следует отнести значительную трудоемкость изготовления входящих в ее состав 15 структурных элементов из-за необходимости выполнения токарных, фрезерных и сварочных операций, а также возможность только разового использования всего комплекта составных деталей, что в итоге приводит к повышенным эксплуатационным затратам.

Устройство, защищенное патентом ФРГ [55] и схематично представленное на рисунке 1.17, в сравнении с предыдущей системой в своем составе содержит меньшее количество деталей, но может быть использовано только в комплекте с погружным стаканом. Этот огнеупор должен быть снабжен дополнительным металлическим элементом, который послужит опорой для находящейся в напряженном состоянии цилиндрической пружины.

Пружина поджимает к рабочей поверхности верхней огнеупорной плиты затвора металлический стержень и выталкивает его вверх при полном открытии сталевыпускного канала. Наряду с этим данное устройство также является одноразовым в применении, что влечет за собой дополнительные финансовые издержки.

Таким образом можно утверждать о том, что известные системы катапульта для открытия канала сталеразливочного ковша имеют сложную конструкцию, высокую стоимость и обеспечивают только одноразовое использование, что вызывает повышенные расходы, связанные с их практическим использованием.

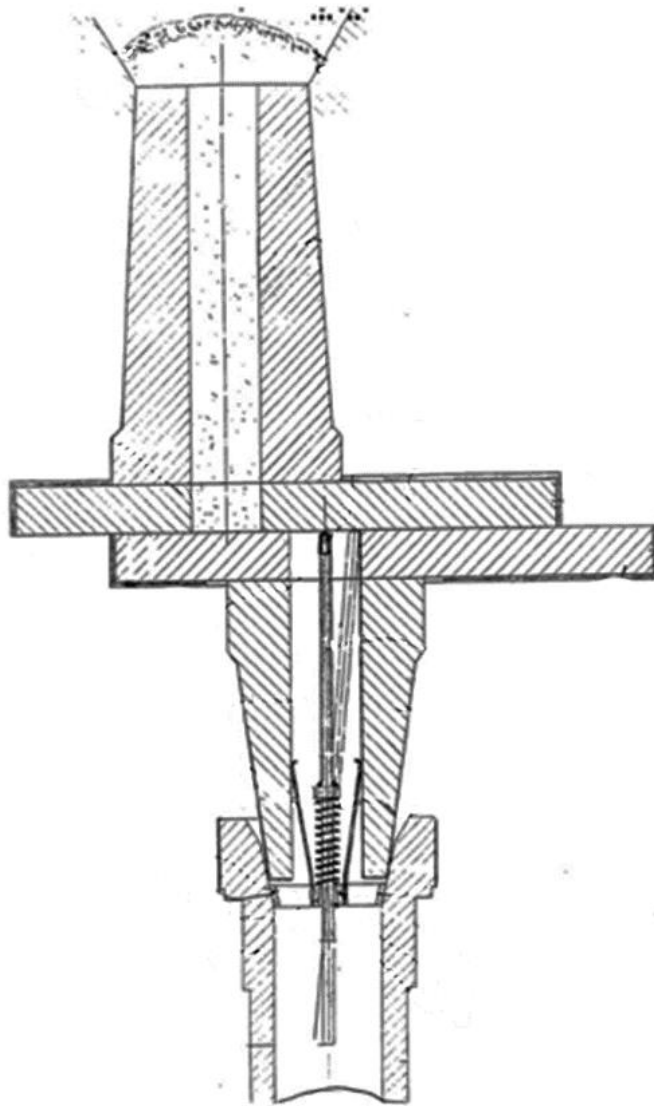


Рисунок 1.17 – Схема катапульты, предназначенной для применения в условиях экранирования струи металла с использованием огнеупорного стакана

Как известно, при замене стопорных систем шиберными затворами длина сталевыпускного канала увеличилась минимум в 2 раза. Это соотношение наглядно представлено на рисунке 1.18.

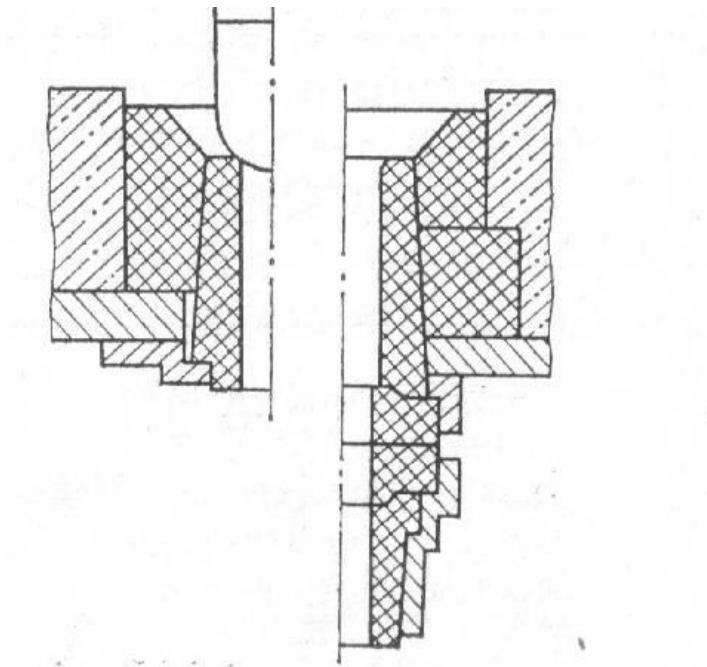


Рисунок 1.18 – Форма и соотношение длин выпускного канала ковша при стопорной (слева) и шиберной разливке (справа)

Это повлекло за собой снижение коэффициента расхода жидкого металла при его истечении из ковша с 0,88 до 0,75 [5] и повысило вероятность уменьшения проходного сечения канала из-за отложения на его стенках тугоплавких частиц, что является второй проблемой, которую также до настоящего времени не удалось полностью решить, несмотря на многочисленные исследования, проводившиеся в последнее десятилетие на ряде отечественных и зарубежных металлургических предприятий.

Сложность проблемы, связанной с возникновением отложений на стенках разливного канала, обусловлена тем, что формирование в канале шиберного затвора слоя отложений (фото на рисунке 1.19) зачастую связано с одновременным развитием в разной степени тепловых, гидродинамических и химических процессов [56–61].



Рисунок 1.19 – Продольный разрез настыли, образовавшейся в канале разливочного стакана при его зарастании

В связи с этим предлагаемые меры по снижению интенсивности затягивания канала ковшовых затворов предполагают применение разнообразных технических и технологических решений, призванных ослабить негативное влияние установленных ранее факторов.

В качестве действенных приемов, позволяющих замедлить процесс зарастания каналов огнеупорных элементов шибберного затвора, ранее предлагались [62–70]:

- применение огнеупоров со специальным профилем продольного сечения сталевыпускного канала, который за счет особенностей своей геометрии минимизирует местное гидравлическое сопротивление;

- нанесение на стенки канала специального покрытия, образующего при взаимодействии с неметаллическими включениями легкоплавкие соединения, смываемые с контактной поверхности потоком разливаемой стали;
- подача в канал шиберного затвора через пористые вставки инертного газа, пузырьки которого препятствуют образованию слоя включений;
- прогрев корпуса разливочного стакана за счет тепла, выделяемого при сгорании специальной газовой смеси, вдуваемой через пористый элемент нижней огнеупорной плиты затвора при кратковременном перекрытии его выпускного канала;
- электрический прогрев корпуса разливочного стакана с помощью специального нагревательного элемента, вмонтированного в гнездовой блок днища ковша.

Сотрудниками российской фирмы ООО «Шибер» (г. Москва) разработана конструкция затвора, содержащего неподвижную и подвижную огнеупорные плиты с системой отверстий. Обе плиты размещены соответственно в монтажной раме и каретке и прижаты одна к другой двумя пружинными блоками. Каждый из них снабжен системой воздушного охлаждения и двумя опорными роликами. Ролики поджимают снизу каретку, а также ковшевой стакан, связанный с неподвижной огнеупорной плитой, и стакан-коллектор, связанный с подвижной огнеупорной плитой.

Новая конструкция затвора оснащена системой предотвращения зарастания разливочного канала ковшевого стакана [35]. Она включает цилиндрическую пористую огнеупорную вставку, размещенную в теле подвижной огнеупорной плиты на некотором удалении от ее отверстия (рисунок 1.20).

Пористая вставка контактирует своей нижней частью со штуцером, жестко закрепленным на каретке и связанным с трубопроводом для подачи при закрытом шиберном затворе в разливочный канал ковшевого стакана газовой смеси. При сгорании смесь выделяет тепло, достаточное для предотвращения образования на

стенках канала отложений, которые могли бы превратиться в корку и исказить его проходное сечение.

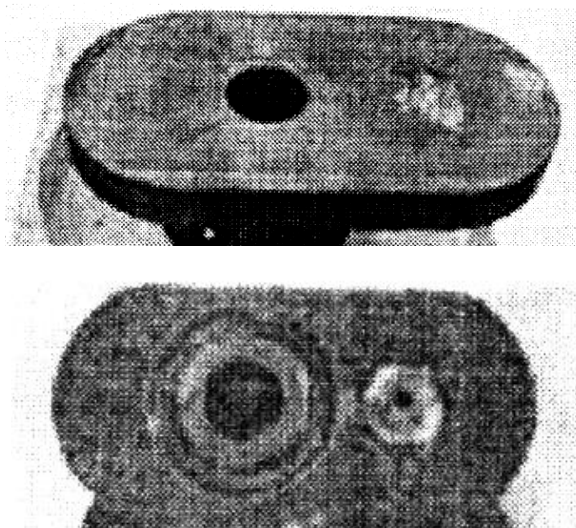


Рисунок 1.20 – Конструкция нижней огнеупорной плиты шибера затвора для подогрева огнеупоров за счет сгорания газовой смеси

К сожалению, описанное устройство не обеспечивает достижения требуемого технического результата, поскольку используемая в нем система предотвращения зарастания разливочного канала имеет невысокую длительность активного функционирования. Период ее эксплуатации ограничен временем, когда канал ковшового стакана находится в перекрытом состоянии, т.е. когда подвижная огнеупорная плита занимает положение, при котором пористая вставка совмещена с отверстием неподвижной огнеупорной плиты. Это становится возможным лишь во время пауз при разливке. Подобное ограничение снижает эффективность функционирования данной системы, поскольку процесс зарастания разливочного канала ковшового стакана протекает в том числе и при открытом канале, в процессе непосредственной разливки.

К особенностям данной конструкции затвора также следует отнести необходимость обеспечения в процессе его эксплуатации одновременного подвода сжатого воздуха к системе воздушного охлаждения пружинных блоков и газовой смеси – к пористой огнеупорной вставке, обеспечивающей при сгорании

поддержание теплового баланса в разливочном канале ковшевого стакана в период пауз. Наличие двух трубопроводов для подачи разных энергоносителей не только увеличивает громоздкость всей конструкции, но и требует при его обслуживании выполнения дополнительных операций, связанных с подключением и отключением самих трубопроводов.

Фирмой ООО НПП «Вулкан-ТМ» (г. Тула, РФ) разработан и запатентован шиберный затвор (рисунок 1.21), содержащий монтажную раму 1, в которой размещена неподвижная огнеупорная плита 7. В каретке 2 установлена подвижная огнеупорная плита 8 и стакан-коллектор 9. Защиту шиберного затвора от теплового излучения и брызг обеспечивают за счет размещения защитного экрана 4 [71–76].

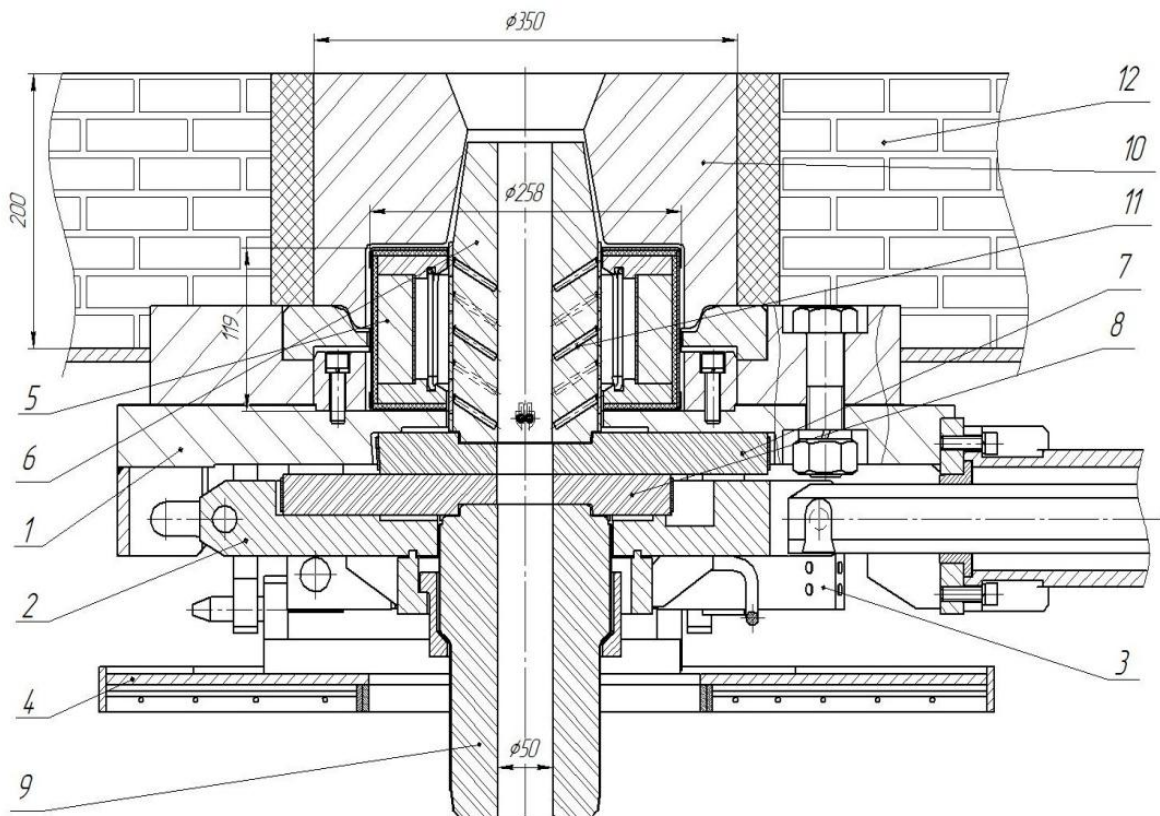


Рисунок 1.21 – Вариант компоновки шиберного затвора линейного типа с устройством подогрева с установкой его в днище ковша

На монтажной раме 1 установлено устройство дополнительного подогрева разливочного канала. Верхняя часть этого устройства располагается в полости,

предусмотренной для него в огнеупорном гнездовом блоке 10, вмонтированном в футеровку 12 разливочного ковша. Внутри устройства подогрева расположен ковшовый стакан 6. Для улучшения передачи тепла в зону возможного застывания канала ковшевой стакан 6 выполнен с радиальным армированием металлическими стержнями 11. Нагревательный элемент устройства имеет форму волнообразной поверхности с равным шагом. Питание нагревательного элемента осуществляется от низковольтного трансформатора [75].

Промышленная эксплуатация данного затвора сопряжена с необходимостью принятия дополнительных мер по обеспечению электробезопасности (защита подводящих проводов от брызг жидкой стали и их перемещение во время выполнения маневров с разливочным ковшом) и подключением еще одного типа энергоносителя, помимо сети подачи воздушного охлаждения на силовые пружинные элементы шиберного затвора.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о необходимости поиска рациональных решений при создании усовершенствованной системы, позволяющей снизить интенсивность процесса зарастания сталевыпускного канала разливочного ковша с учетом минимального усложнения обеспечения нормальной работы шиберного ковша. Принимаемые технические решения должны обеспечить ожидаемый результат с минимально возможными временными, трудовыми и материальными затратами.

Анализ информации об эффективности использования на практике отмеченных мероприятий позволяют сделать вывод о том, что данный вопрос по-прежнему остается актуальным, а поиски его решения должны быть продолжены.

1.3 Пути повышения эффективности функционирования затворов разливочных и литейных ковшей

Многолетний опыт эксплуатации ковшовых затворов свидетельствует о том, что, несмотря на применявшиеся специальные меры, 5% разливок приходится начинать с прожигания твердой перемычки, блокирующей вход сталевыпускного канала ковша и препятствующей свободному истечению жидкого металла, а в 3% разливок требуется по ходу опорожнения ковша прибегать к промыванию канала из-за резкого уменьшения его проходного сечения вследствие затягивания отложениями.

Материальные потери из-за возникновения нештатных ситуаций в начале разливки составляют до 200 кг стали в скрап, 1 метра стальной трубки диаметром 15 мм и толщиной стенки 0,6 мм, а также около 0,5 м³ кислорода. В случае необходимости промывания канала потери жидкого металла в скрап достигают 600 кг, а выполнение указанной операции потребует не менее 3 метров трубки и 1,5 м³ кислорода.

Учитывая ранее отмеченные факторы, оказывающие негативное влияние на эффективность функционирования ковшовых затворов, дальнейшие научные изыскания, связанные с совершенствованием шибберных систем, должны быть направлены на уменьшение издержек относительно применения дополнительных мер и приспособлений для внешнего силового воздействия на твердую перемычку, блокирующую входное отверстие выпускного канала, а также на разработку способов снижения интенсивности процесса его зарастания.

Сокращения материальных затрат, связанных с использованием катапульт для разрушения затвердевшего поверхностного слоя стартовой смеси, можно добиться путем увеличения кратности применения деталей, входящих в состав указанных устройств. Эту стратегию можно реализовать только за счет выноса их силового блока за пределы полости выпускного канала сталеразливочного ковша.

Но применение известных систем механического разрушения образующейся перемычки до сих пор остается ограниченным не только из-за их достаточно сложного конструктивного исполнения. Существенное влияние оказывает и отсутствие методик расчета и обоснования конструктивных и энергосиловых параметров пружинных блоков катапульта, при которых можно добиться гарантированного разрушения затвердевшей корки.

В качестве альтернативы известным способам активного влияния на интенсивность процесса налипания тугоплавких частиц на рабочие стенки канала шибера затвора по ходу разливки следует указать использование вибрационного воздействия на его огнеупорные элементы. Сущность воздействия состоит в приложении вертикально направленных колебаний с заданной частотой и требуемой интенсивностью.

В пользу такого технического решения свидетельствуют положительные результаты, опубликованные ранее в ряде научных работ, которые посвящены изучению влияния вибрации на характер и динамику конвективных потоков жидкой стали в замкнутом объеме во время ее кристаллизации [77–83], на улучшение качества отливаемых слитков и отливок [84–89], а также на протекание усадочных процессов и подавление усадочных дефектов [90, 91].

Чтобы достигнуть ожидаемого эффекта от использования вибрационного воздействия по отношению к элементам сталевыпускного узла разливочного ковша, необходимо провести комплексные исследования, связанные с разработкой новой конструктивной схемы ковшового затвора, снабженного специальным механизмом возбуждения вертикально направленных колебаний. Также следует получить обоснование параметров процесса внешнего вибрационного влияния на интенсивность зарастания шибера канала.

1.4 Выводы

1. Достигнутый уровень конструктивного совершенства шибберных ковшовых затворов, выпускаемых ведущими зарубежными и отечественными фирмами, обеспечивает кратность применения одного комплекта огнеупорных изделий в пределах 3–8 разливок, снижение продолжительности процесса замены керамических частей сталевыпускного узла разливочного ковша с 2–3 часов до 20–30 минут.

2. В качестве главных факторов, отрицательно влияющих на эффективность функционирования ковшовых затворов, является необходимость применения кислорода для прожигания твердой корки, образующейся на поверхности стартовой смеси и препятствующей свободному истечению жидкой стали при первом открывании затвора, а также зарастание его канала по ходу разливки, вызывающее нарушение ее скоростного режима.

3. Для обеспечения начала разливки в штатном режиме и снижения интенсивности процесса 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.

4. Критерием повышения эффективности функционирования систем ковшовых затворов за счет внедрения в их структуру дополнительных устройств, обеспечивающих разрушение барьерной корки на поверхности стартовой смеси и снижение интенсивности затягивания сталевыпускного канала отложениями в процессе разливки, следует считать полное исключение ситуаций, требующих прожигания корки кислородом, подающимся через трубку вручную, и промывания стенок сталевыпускного канала им же. Если учесть частоту возникновения таких ситуаций в 5% и 3% случаев, то критерием эффективности становится обеспечение протекания режима разливки в штатном режиме в 100% случаев.

2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО НАЧАЛО РАЗЛИВКИ БЕЗ НЕОБХОДИМОСТИ ПРОЖИГАНИЯ КИСЛОРОДОМ КОРКИ НА ВХОДЕ В КАНАЛ КОВШОВОГО ЗАТВОРА

Для разработки новых устройств механического разрушения твердых перемычек, образующихся на поверхности стартовой смеси, которой заполнен канал ковшового затвора, и обоснования их конструктивных и энергосиловых параметров необходимо иметь информацию о прочностных свойствах этого мелкодисперсного материала и несущей способности оболочки, образующейся в его поверхностном слое при контакте с жидкой сталью.

Непрозрачность стенок сталеразливочного ковша и высокая температура находящегося в нем расплава затрудняет эффективное натурное исследование происходящих процессов. Получить интересующие данные можно только методами математического и физического моделирования.

2.1 Теоретические и модельные исследования прочностных параметров перемычки, блокирующей входное отверстие выпускного канала сталеразливочного ковша

При разработке математической модели, описывающей прочностные параметры твердой корки на входе в выпускной канал сталеразливочного ковша, следует предположить, что в начальный момент выпуска стали падающая с высоты нескольких метров струя жидкого металла вызовет циркуляцию расплава в зоне расположения гнездового блока, под действием которой верхняя часть порошкообразного материала будет смыта и на входе в выпускной канал появится

выемка, и тогда в первом приближении образующаяся перемычка представляет собой асимметричную оболочку в виде вогнутой полусферы.

Ключевой действующей нагрузкой на данную оболочку выступает равномерно распределенное давление жидкой стали, нормальное к поверхности. При этом толщина оболочки настолько мала, что она не может воспринимать изгибающие напряжения. Из-за потери устойчивости работа на сжатие фактически отсутствует (рисунок 2.1).

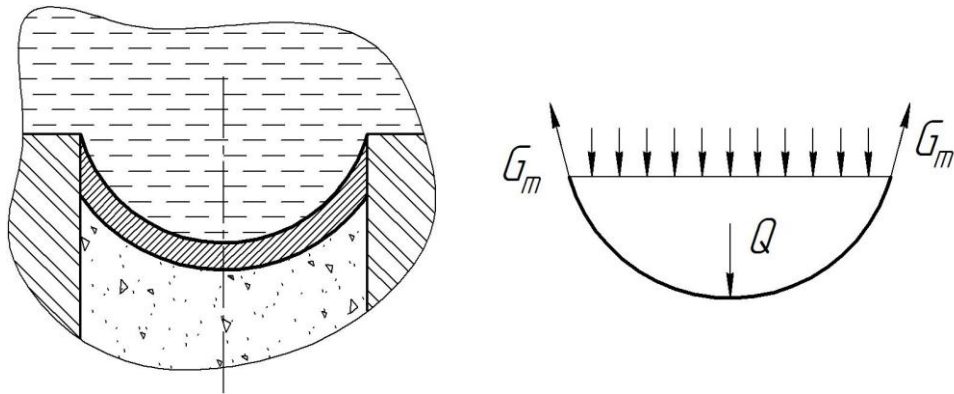


Рисунок 2.1 – Схема нагружения перемычки на входе в сталевыпускной канал ковша

В этом случае, в соответствии с положениями, приведенными в работе [92] профессора Ф.Л. Шевченко, в теле корки могут возникать только растягивающие напряжения в кольцевом и меридиональном направлениях, как показано на рисунке 2.2. На нем представлен находящийся в равновесии малый элемент оболочки, вырезанный бесконечно близкими меридиональными и кольцевыми сечениями.

В процессе формирования адаптированной математической модели твердой корки, образующейся спеканием на границе контакта жидкой стали и поверхностных слоев стартовой смеси, которой заполнена полость сталевыпускного канала, была использована теория подобия как метод приведения физической задачи к обобщённому безразмерному описанию.

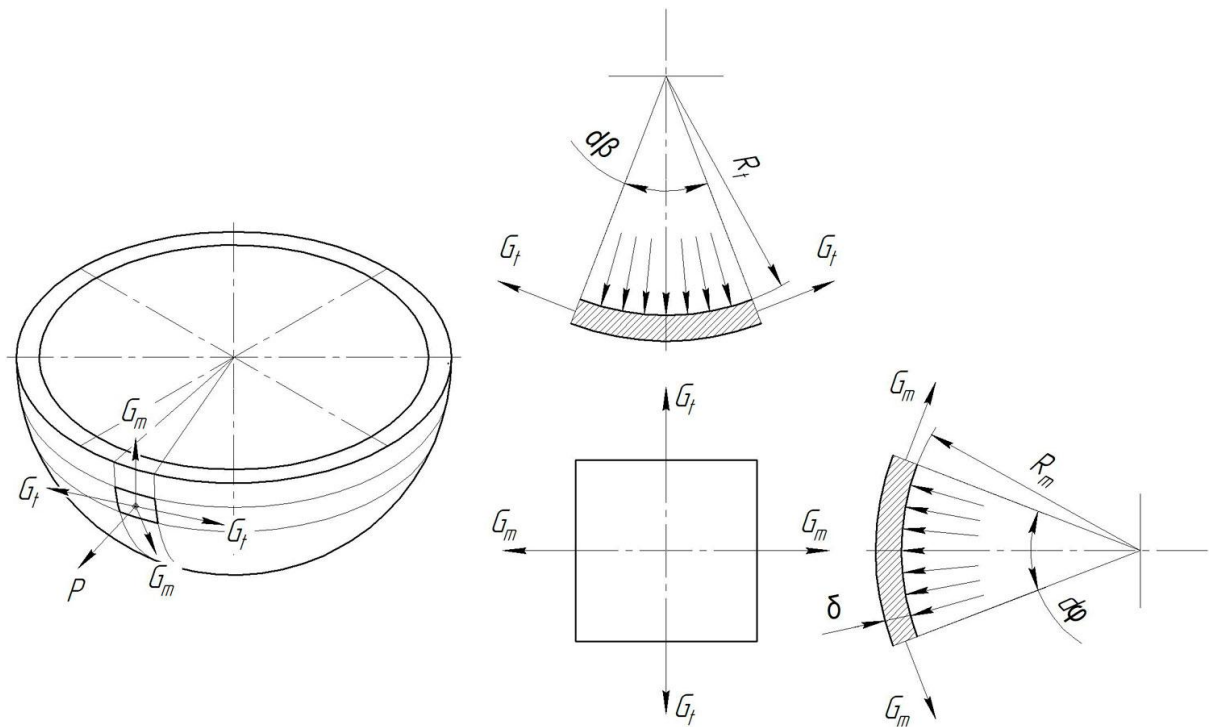


Рисунок 2.2 – Схема для определения напряжений в теле оболочки

Геометрическое подобие между рассматриваемым физическим объектом и его математической моделью реализовано за счёт соответствия радиуса сталевыпускного отверстия радиусу рассматриваемой полусферы, что позволяет сохранить масштабно-инвариантные характеристики формы. Принятыми допущениями при этом выступают идеализация формы и ее приведение к тонкостенной полусфере с постоянством толщины по всему объему. Это позволяет использовать методы аналитической механики тонкостенных оболочек при расчёте напряжённого состояния исследуемой перемычки. В реальных условиях формирующаяся корка будет лишь приближена по форме к полусфере, тогда как толщина сечения по всему объему также будет непостоянной, однако эти различия с идеализированной математической моделью не оказывают решающего влияния на характер распределения напряжений.

Механическое подобие реализуется через приложение к объекту равномерного внешнего давления, эквивалентного ферростатическому давлению, создаваемому столбом жидкой стали в полости ковша. Принятым допущением выступает то, что радиус столба металла равен радиусу сталевыпускного

отверстия, а высота столба — высоте жидкой стали в наполненном ковше. Таким образом, моделируемая механическая нагрузка полностью соответствует нагрузке, приложенной к натурному объекту.

В рассматриваемом случае математического моделирования тепловой фактор исключен. Это допустимо, поскольку тепловые процессы играют определяющую роль при образовании корки, тогда как основное внимание в рамках настоящей модели сосредоточено на её прочностном состоянии уже после формирования, в момент открытия шиберного затвора и начала разливки, т.е. при устоявшемся тепловом режиме.

При математическом моделировании исходили из ключевых положений теории осесимметричных оболочек.

На перемычку, показанную в виде тонкостенной полусферы, воздействуют растягивающие силы в кольцевом направлении:

$$F_t = \sigma_t \delta R_m d\varphi \quad (2.1)$$

где σ_t — растягивающие напряжения в кольцевом направлении;

δ — толщина оболочки;

R_m — радиус сферы в меридиональном направлении.

В меридиональном направлении действующие растягивающие силы будут выражены в виде:

$$F_m = \sigma_m \delta R_t d\beta \quad (2.2)$$

где σ_m — растягивающие напряжения в меридиональном направлении;

R_t — радиус сферы в кольцевом направлении.

Также присутствует нормальная сила:

$$F_n = P R_m d\varphi R_t d\beta \quad (2.3)$$

где P – ферростатическое давление жидкой стали в разливочном ковше в зоне размещения его стакана, равное:

$$P = \rho_c g H_c \quad (2.4)$$

где ρ_c – плотность жидкой стали, равная 7000 кг/м³;

g – ускорение силы тяжести, 9,8 м/с²;

H_c – высота столба жидкого металла над ковшовым стаканом, м.

Проецируя отмеченные силы на нормаль к выделенную элементу, получим условие:

$$2\sigma_t \delta R_m d\varphi \cdot \sin \frac{d\beta}{2} + 2\sigma_m \delta R_t d\beta \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} - P R_m d\varphi R_t d\beta = 0 \quad (2.5)$$

Так как оболочка имеет форму полусферы с радиусом R_c , принимаем зависимость:

$$R_m = R_t = R_c \quad (2.6)$$

Тогда:

$$2\sigma_t \delta R_c d\varphi \cdot \sin \frac{d\beta}{2} + 2\sigma_m \delta R_c d\beta \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} = P R_c^2 d\varphi d\beta \quad (2.7)$$

Заменяя синусы углами, получим:

$$\sigma_t \delta R_c d\varphi d\beta + \sigma_m \delta R_c d\beta d\varphi = P R_c^2 d\varphi d\beta \quad (2.8)$$

$$\frac{\sigma_t}{R_c} + \frac{\sigma_m}{R_c} = \frac{P}{\delta} \quad (2.9)$$

Для сферы справедливо утверждение:

$$\sigma_t = \sigma_m = \sigma \quad (2.10)$$

Получим зависимость:

$$\frac{\sigma}{R_c} + \frac{\sigma}{R_c} = \frac{P}{\delta} \quad (2.11)$$

$$\sigma = \frac{PR_c}{2\delta} \quad (2.12)$$

Задаваясь значениями σ для стали при температуре начала ее кристаллизации, а также ферростатического давления P и радиуса канала ковшового стакана R_c , по формуле (2.12) рассчитаем минимальные толщины перемычек, при которых начало разливки не может произойти в штатном режиме [93, 94]. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Расчетные значения толщины корочки, выдерживающей давление столба стали при открытии затвора сталеразливочного ковша.

Вместимость ковша, т	Высота столба металла в ковше, м	Ферростатическое давление, МПа	Радиус канала ковшового стакана, мм	Толщина перемычки на входе в канал ковшового стакана, мм		
				$\sigma = 20$ МПа	$\sigma = 30$ МПа	$\sigma = 40$ МПа
100	3,0	0,21	25	0,13	0,09	0,07
150	3,5	0,25	30	0,19	0,13	0,09
200	4,0	0,29	35	0,25	0,17	0,13
250	4,5	0,32	40	0,32	0,21	0,16
300	5,0	0,36	45	0,41	0,27	0,20

Возможность визуального наблюдения за поведением верхнего слоя сыпучего материала, подвергаемого воздействию со стороны падающей с высоты нескольких метров струи металла, отсутствует, из-за чего нельзя установить истинные форму и размеры образовавшейся корочки, а также картину ее разрушения на отдельные фрагменты в случае наносимого снизу удара

металлическим элементом, движущегося вверх по каналу ковшового стакана. Кроме того, части разбиваемой перемычки уносятся потоком металла и не могут быть отобранными для последующего контроля толщины образовавшегося твердого слоя и его прочностных характеристик.

Данные обстоятельства побуждают к получению необходимых сведений с помощью метода физического моделирования. При соблюдении соответствующих условий подобия такой путь дает возможность качественной и количественной оценки параметров симулируемых процессов [95–97]. Поэтому была разработана методика модельных исследований, позволяющая оценить толщину твердой корки, выдерживающей давление столба жидкой стали после перевода ковшового затвора в открытое положение. Реализация поставленной задачи предполагает наличие лабораторного комплекса, содержащего испытательный стенд и контрольно-измерительную аппаратуру [98, 99]. Общая схема и фотография оборудования, используемого при проведении экспериментальных исследований, приведены на рисунке 2.3.

Стенд включает опорную рамку 2 с вертикально установленным на ней огнеупорным разливочным стаканом 1. На верхнюю торцевую поверхность этого стакана опирается цилиндрический кессон 7, прижимаемый к стакану крышкой 9, имеющей форму диска и посредством четырех шпилек 3 с гайками 8 связанной с опорной рамкой 2. В полости кессона над входным отверстием канала разливочного стакана на его верхней торцевой поверхности с обеспечением герметичности можно устанавливать имитаторы перемычки 5, имеющей различную форму и толщину. В центральное резьбовое отверстие крышки 9 вкручен тройник 10 для подключения трубки 6, подающей воздух от компрессора 4 в полость кессона, и трубки 11 для его пневматической связи с рабочей полостью тензорезисторного преобразователя давления 12, который закреплен на штативе 14 и снабжен соединительным экранированным кабелем 13. Используемый в составе комплекса компрессор типа СА–040–15S обеспечивает избыточное давление до 0,7 МПа и расход воздуха до 40 л/мин.

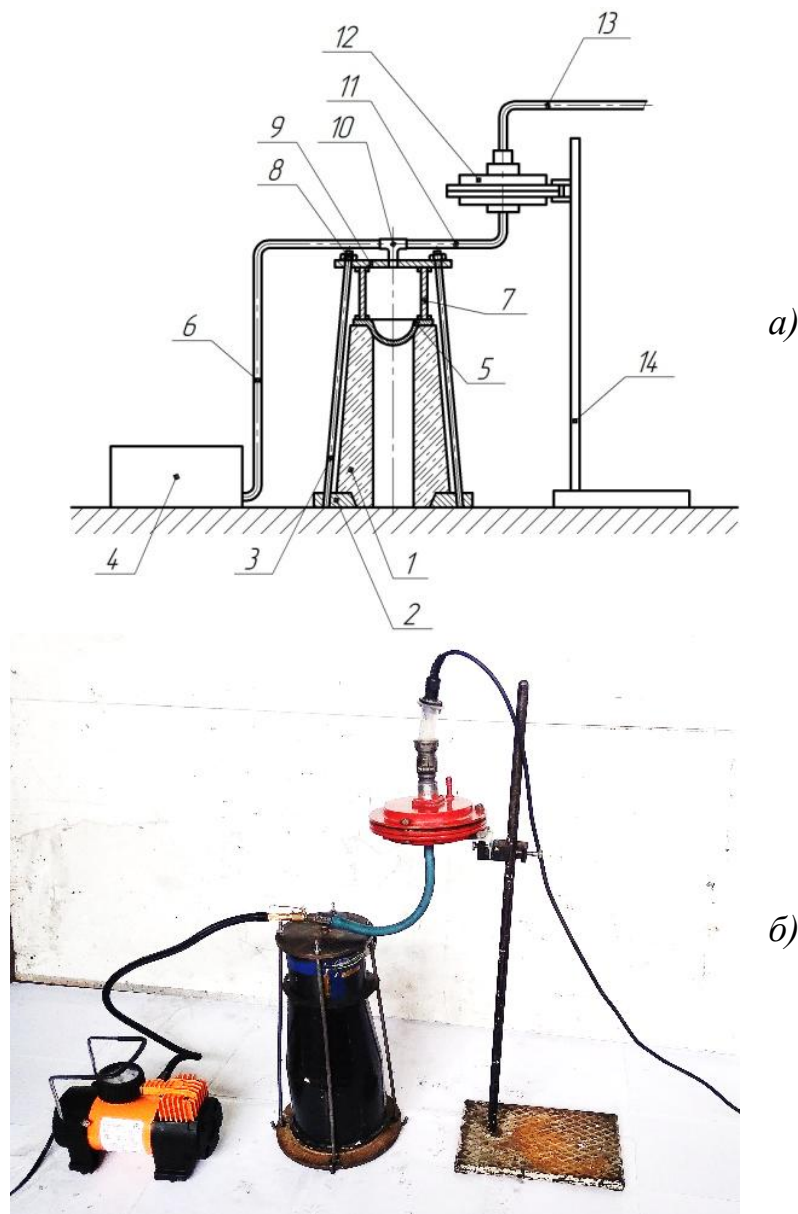


Рисунок 2.3 – Схема (а) и конструктивное исполнение (б) лабораторного стенда

Контрольно-измерительная система, также входящая в состав лабораторного комплекса, предназначена для фиксации значений давления, эквивалентного ферростатическому давлению столба жидкого металла, которое действует на образовавшуюся корку при конкретных условиях разливки. Система функционирует на основе тензорезисторного преобразователя давления, показанного на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Внешний вид тензорезисторного преобразователя давления (а) и размещение в нем рабочих и компенсационных датчиков (б)

Упомянутый тензорезисторный преобразователь давления конструктивно выполнен в виде двух металлических камер, герметично связанных посредством фланцев, между которыми размещена стальная диафрагма. На одной из ее поверхностей с помощью специального клея закреплены два фольговых тензодатчика, ориентированных в радиальном направлении. Эти датчики являются рабочими и включены в противоположные плечи моста сопротивлений, смежные плечи которого составляют два других однотипных датчика, наклеенные на отдельную пластинку и не подвергаемые деформации, т.е. служащие для температурной компенсации с целью исключения влияния на точность измерений нагрева резисторов.

В состав измерительной системы (рисунок 2.5а) входит также усилитель переменного тока, аналого-цифровой преобразователь и компьютер с печатающим устройством.

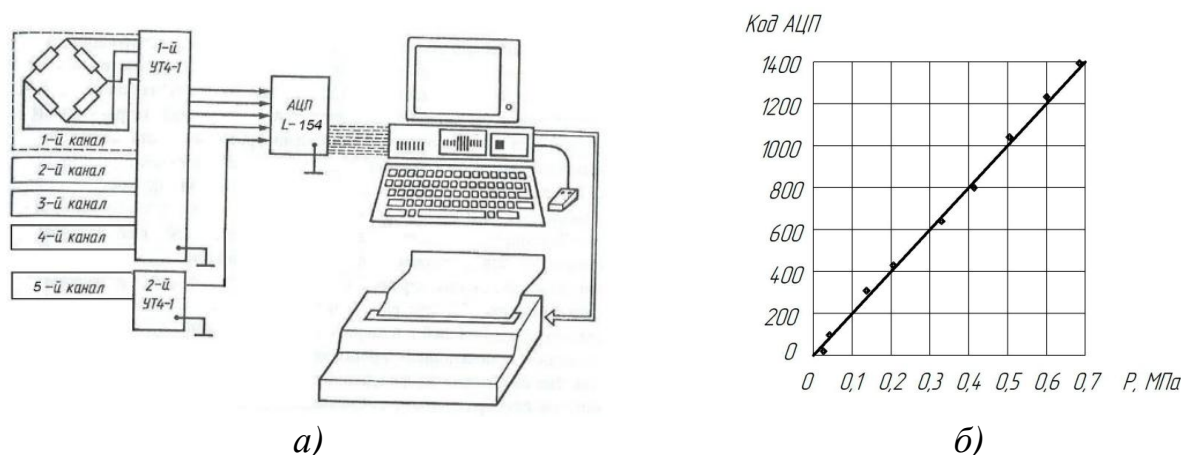


Рисунок 2.5 – Структурная схема применявшейся контрольно-измерительной системы (а) и график тарировочной зависимости тензорезисторного преобразователя (б)

При создании избыточного давления в рабочей камере преобразователя под его воздействием происходит деформация диафрагмы и наклеенных на ее поверхность двух рабочих датчиков, вызывающая изменение их сопротивление, что повлечет за собой разбаланс моста и появление на его выходе электрического сигнала. Усиленный аналоговый сигнал после преобразования в цифровой код поступает в системный блок компьютера для обработки с помощью прикладной программы и визуализации на экране монитора, а также для последующей распечатки на принтере при необходимости. Таким образом, данная измерительная система позволяет в режиме реального времени контролировать изменение давления на имитатор переключки.

Статистическая обработка результатов тарировки преобразователя свидетельствует о том, что погрешность измерений с его помощью не превышает 5%. Данные тарировки сохраняются в памяти ПЭВМ и используются при декодировании значений амплитуд регистрируемого сигнала, соответствующих давлению воздуха в МПа.

Материалом для изготовления имитаторов переключки служил свинец, который в твердом состоянии обладает такими же реологическими свойствами, как и сталь сразу после образования ее кристаллической структуры, т.е. при

температуре ниже равновесной [100], что соответствует условиям появления твердой металлической перемычки над поверхностным слоем стартовой смеси во время заполнения разливочного ковша жидким металлом.

Форма, наружный диаметр и толщина имитаторов перемычек должны выбираться с учетом того, что комбинации указанных геометрических характеристик в реальных условиях могут быть различными из-за действия таких факторов, как вместимость разливочного ковша, температура и скорость циркуляции жидкой стали в зоне расположения его выпускного канала. При этом считается, что минимальную прочность имеет перемычка, имеющая вогнутость со стороны действующего на нее давления. Поэтому методами литья и последующей штамповки изготовили комплект свинцовых перемычек вогнутой формы (фото на рисунке 2.6) с толщиной стенок сферической части 0,25, 0,50, 1,00 и 1,25 мм для стаканов с диаметром канала 50, 60 и 80 мм. Для этого на круглую стальную подкладку соответствующего диаметра выливали рассчитанный заранее объем расплавленного свинца, что позволяет получить диск определенной толщины. После остывания свинцовый диск помещали в прессформу и подвергали силовому воздействию с помощью штока с нижней частью в виде полусферы с требуемым радиусом.



Рисунок 2.6 – Внешний вид свинцовой перемычки

В соответствии с разработанной методикой, опыты на изготовленном стенде проводят в следующей последовательности. На верхнюю торцевую часть разливочного стакана наносят тонкий слой специальной пасты, обеспечивающей

герметичное прилегание размещаемого сверху имитатора перемишки. После этого на стакан устанавливают кессон, который прижимают к огнеупору посредством четырех шпилек, затягивая на их верхних резьбовых концах гайки. Затем, подключив к тройнику связанный с компрессором гибкий шланг, предварительно проверяют собранную систему на герметичность. Для этого осуществляют пробный пуск компрессора и после создания в кессоне избыточного давления воздуха порядка 0,01 МПа выключают его. Неподвижное состояние стрелки манометра свидетельствует о наличии герметичности, в противном случае по слышимому характерному свисту воздуха устанавливают место его выхода из кессона в окружающее пространство и устраняют обнаруженную протечку. После этого включают измерительную систему в режим работы, запускают компрессор и следят по изображению на мониторе за изменением амплитуды регистрируемого сигнала. В момент, когда его амплитуда мгновенно снижается, измерение прекращают. Зафиксированное на записи максимальное значение сигнала (рисунок 2.7) отображает давление на свинцовую перемишку, при котором произошло ее разрушение.

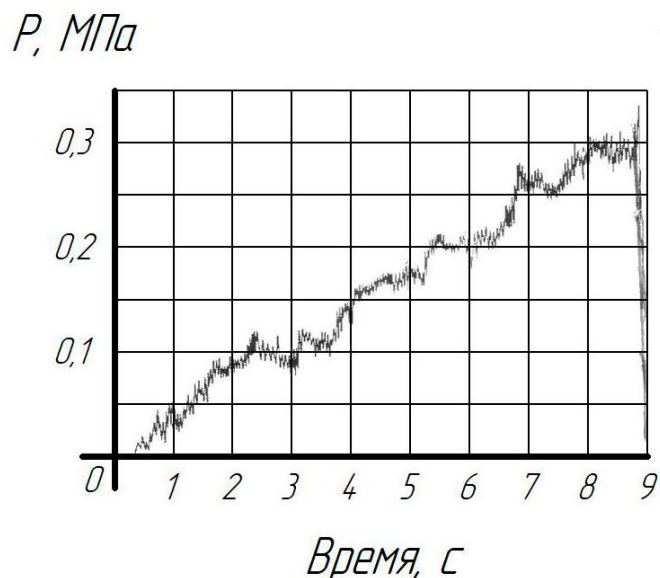


Рисунок 2.7 – Вид сигнала, регистрировавшегося при разрушении свинцовой перемишки

После проведения каждого опыта стенд разбирают для извлечения испытанного образца и изучения характера его разрушения. В качестве примера на рисунке 2.8 показана перемычка толщиной 0,5 мм для канала диаметром 80 мм с остаточными повреждениями, наступившими при воздействии на нее избыточного давления, соответствующего условиям начала разливки стали из 250-тонного ковша.

Результаты экспериментальных исследований были зафиксированы и сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Экспериментально определенные значения давления, при которых происходило разрушение свинцовой перемычки, МПа

Диаметр сталевыпускного канала, мм	Толщина разрушаемой перемычки, мм				
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
50	0,18	0,29	0,35	-	-
60	0,15	0,21	0,28	0,35	-
80	0,11	0,14	0,24	0,27	0,35



Рисунок 2.8 – Характер разрушения свинцового имитатора перемычки толщиной 0,5 мм для канала диаметром 80 мм

По завершении всего запланированного комплекса лабораторных опытов при различных возможных комбинациях диаметров каналов ковшовых стаканов и геометрических параметров имитаторов перемычек, в результате обработки полученных данных построили графики зависимостей (рисунок 2.9).

Чтобы сравнить данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, с результатами расчета с использованием предложенной математической модели, построим аналогичный график зависимости на основе расчетных данных на основе формулы 2.13, для тех же значений диаметра канала ковшового стакана и толщины перемычки. Вместо значений напряжений, которые испытывает корка-оболочка под нагрузкой без разрушения, в расчете используется предел прочности литого свинца на растяжение, составляющий 12 МПа. График, полученный в результате расчета, показан на рисунке 2.10.

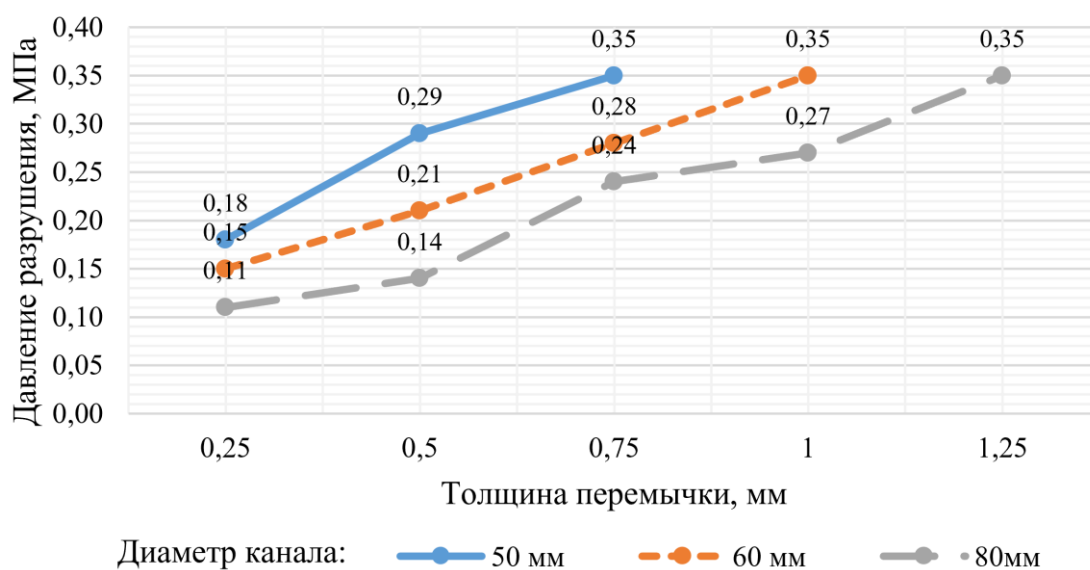


Рисунок 2.9 – Графики, отражающие зависимость давления, вызывающего разрушение свинцовой перемычки, от ее толщины при различном диаметре канала ковшового стакана, построенные по результатам эксперимента

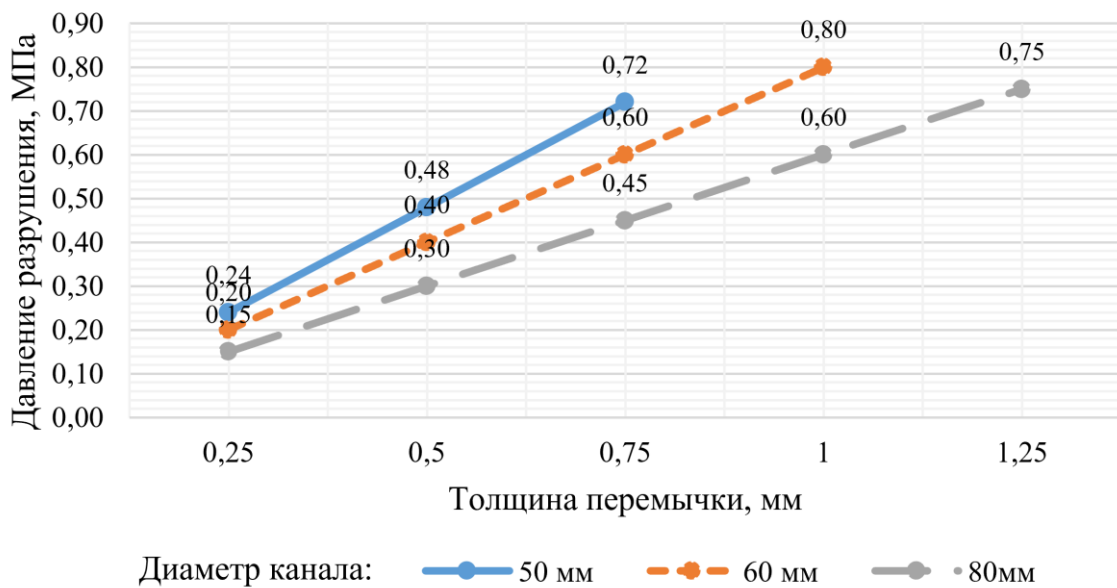


Рисунок 2.10 – Графики, отражающие зависимость давления, которое способна выдержать свинцовая перемычка без разрушения, от ее толщины при различном диаметре канала ковшового стакана, построенные по расчетным данным

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что давление, необходимое для разрушения перемычки, закономерно возрастает вместе с ее толщиной. Количества опытов в эксперименте недостаточно, чтобы уверенно утверждать о линейной зависимости, однако общая картина распределения данных указывает именно на это.

Однако из сравнения графиков экспериментальных и расчетных данных становится очевидно, что расчетное значение давления, которое способна выдержать перемычка, существенно больше, чем значение давления, при котором в ходе эксперимента происходило разрушение имитатора, при одних и тех же толщине и диаметре сферы. Можно предположить, что радикальное снижение прочностных характеристик литой свинцовой перемычки, используемой в качестве имитатора твердой корки, связано с дефектами ее структуры: наличием микропор и микротрещин, разнотолщинностью сферы и ее отклонением от идеальной геометрии, а также присутствием неучтенных концентраторов напряжений в виде неметаллических включений. Справедливость выдвинутого предположения

подтверждает фото перемычки, представленное на рисунке 2.8, на котором отчетливо заметно поверхностное несовершенство элемента. Кроме того, достаточное значимое расхождение между результатами математического и физического моделирования также показывает, насколько сложный в теоретическом описании процесс представляет собой существование подобной спекшейся перемычки и насколько существенную погрешность влечет за собой комплекс необходимых упрощений в отношении построения ее математической модели.

Подводя итоги сопоставительного анализа результатов прошедшего эксперимента по определению давления разрушения свинцовой перемычки и результатов расчета давления, которое свинцовая перемычка выдержит без разрушения, на основе предложенной математической модели, можно сделать вывод, что в обоих случаях рассматриваемый параметр находится в линейной зависимости от учтенных факторов.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при расчете усилия, необходимого для разрушения перемычки посредством специального ударного механизма, устанавливаемого в сталевыпускном канале огнеупорного комплекта ковшового шибера затвора. То обстоятельство, что расчетные значения давления, выдерживаемого перемычкой без разрушения, в отношении проведенного эксперимента оказались значительно выше фактического значения давления при пробое, в том числе указывает на то, что использование предложенной математической модели позволит рассчитать нагрузку, необходимую для гарантированного разрушения перемычки ударным механизмом, с некоторым запасом.

2.2 Разработка рациональной конструкции катапульты для пробивания застывшей корки на поверхности стартовой смеси в канале разливочного стакана

При разработке усовершенствованной катапульты ковшового затвора были учтены основные недостатки существующих зарубежных устройств, описанные в разделе 1.

В основе предложенного технического решения лежит возможность вывода основных элементов катапульты из зоны воздействия струи жидкого расплава, что позволит уберечь их от разрушения и увеличить кратность использования при снижении расходов на эксплуатацию ковшового шиберного затвора [101].

На рисунке 2.11 представлены продольный разрез и вид снизу затвора, снабженного катапульти для разрушения твердой корки на входе выпускного канала сталеразливочного ковша.

Подвижным расходным элементом конструкции выступает металлическая стрела 1. Она размещена в канале стакана-коллектора 2, примыкающего к нижней подвижной огнеупорной плите 3 шиберного затвора, который закреплен на днище сталеразливочного ковша 4. В огнеупорной футеровке его днища установлен разливочный стакан 5, примыкающий к верхней неподвижной огнеупорной плите 6 шиберного затвора.

Стрела 1 установлена так, чтобы ее верхний конец упирался в рабочую плоскость неподвижной огнеупорной плиты 6, а нижний вилкообразный – был поджат находящимися в напряженном состоянии упругими элементами. Последние представлены двумя съемными листовыми пружинами 7, которые консольно закреплены на металлической обойме 8 стакана-коллектора 2.

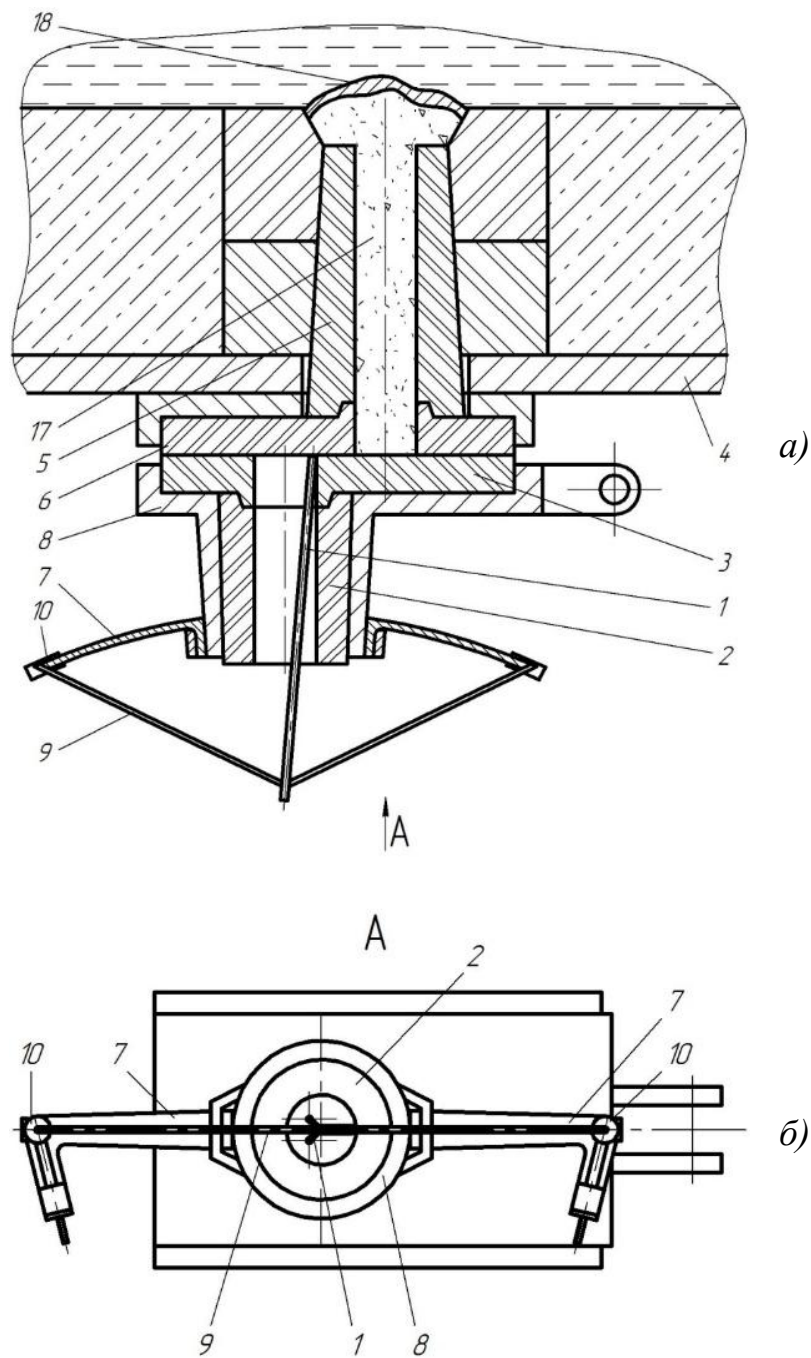


Рисунок 2.11 – Продольный разрез (а) и вид снизу (б) затвора с катапультой для открывания выпускного канала разливочного ковша

Свободные концы листовых пружин 7 связаны со струной 9 с обеспечением возможности одностороннего сброса струны в момент полного ослабления ее натяжения. Более детально это представлено на рисунке 2.12.

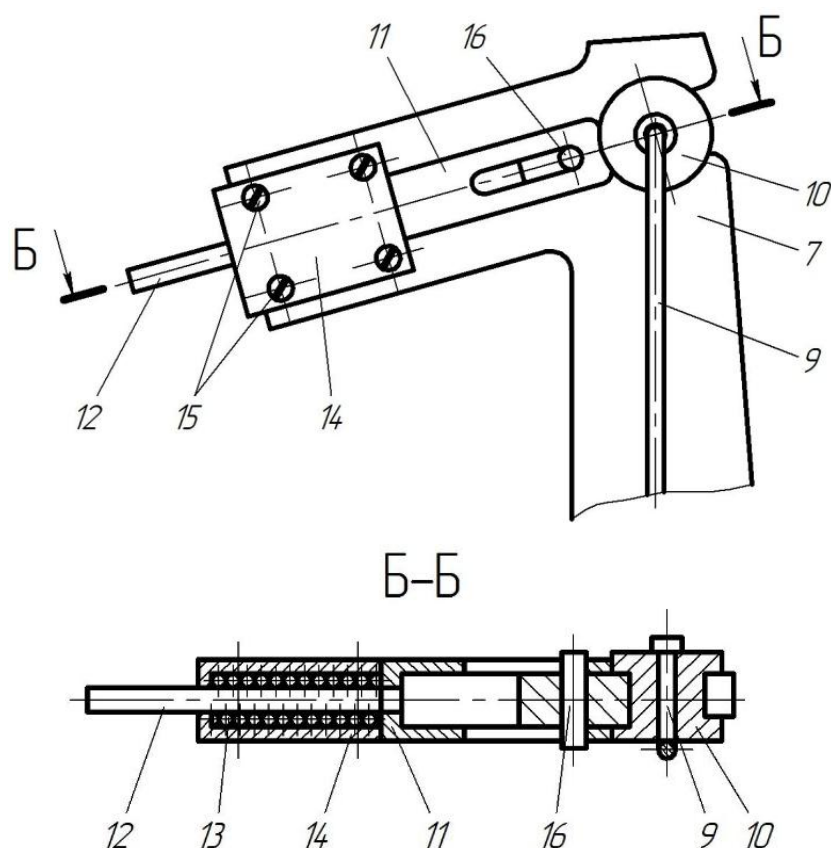


Рисунок 2.12 – Конструктивная схема узла соединения струны со свободным концом листовой пружины

Соединение пружины 7 со струной 9 выполнено посредством катушки 10, размещенной с охватом ее двумя ребрами листовой пружины 7 в выполненной на ее свободном конце прорези так, что продольные оси пружины 7 и прорези, лежащие в одной плоскости, расположены под острым углом.

Катушка 10 размещена в прорези на свободном конце пружины 7 с возможностью относительного перемещения вдоль прорези посредством пружинного механизма в момент полного ослабления натяжения струны 9.

Основу пружинного механизма составляет вилочный толкатель 11, снабженный направляющим стержнем 12 с цилиндрической пружиной сжатия 13. Эта витая пружина поджата П-образной крышкой 14, которая зафиксирована винтами 15 на свободном конце листовой пружины 7.

Вилочный толкатель 11 установлен во второй прорези, выполненной соосно с прорезью, в которой размещена катушка 10. Обе прорези разделены перемычкой,

снабженной жестко закрепленным штифтом 16. Вилочный толкатель 11 имеет возможность перемещения вдоль второй прорези под действием цилиндрической пружины 13 сжатия относительно штифта 16 и катушки 10.

Для наглядной иллюстрации принципа действия предложенной катапульти приведен рисунок 2.10, отражающий положение ключевых узлов и элементов в момент перед полным открытием шиберного затвора.

Перед подачей сталеразливочного ковша 4 к плавильному агрегату для слива из него жидкой стали нижняя подвижная огнеупорная плита 3 шиберного затвора переводится в положение «закрыто», а полость канала разливочного стакана 5 засыпается порошкообразной стартовой смесью 17.

После заполнения ковша жидкой сталью его транспортируют к месту разлива, где на шиберный затвор устанавливают навесную катапульти. Для этого в пазах корпуса металлической обоймы 8 стакана-коллектора 2 консольно крепят две листовые пружины 7 и в прорези их свободных концов вводят катушки 10, прикрепленные к концам струны 9.

Предварительное натяжение за счет возникающей боковой силовой составляющей со стороны катушки 10, охватывающей своими ребордами листовые пружины, влечет за собой смещение пружин вдоль прорези по ее продольной оси, сдвигая относительно закрепленных на перемычках штифтов 16 до упора вилочные толкатели 11 во вторых прорезях. При этом цилиндрические пружины 13, размещенные на направляющих стержнях 12, сжимаются и удерживаются П-образными крышками 14, зафиксированными винтами 15 на свободных концах листовых пружин 7.

Вместе с увеличением изгиба листовых пружин 7 увеличивается и натяжение струны 9. Ее заводят в вилкообразный нижний конец стрелы 1, размещенной в канале стакана-коллектора 2 с упором в плоскость верхней неподвижной огнеупорной плиты 6.

Во время открытия шиберного затвора отверстие его нижней подвижной огнеупорной плиты 3 плавно совмещается с отверстием верхней неподвижной огнеупорной плиты 6 и через образующийся проем стартовая смесь 17 начинает

высыпаться из канала разливочного стакана 5. Вместе с этим верхний конец стрелы 1 сдвигается к кромке отверстия в огнеупорной плите (рисунок 2.13).

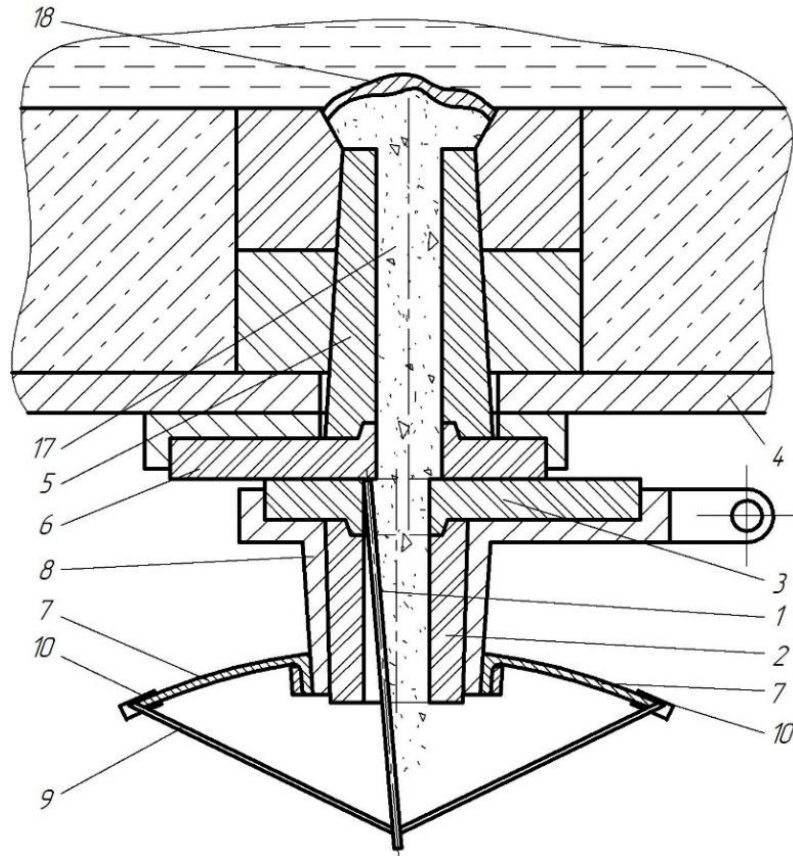


Рисунок 2.13 – Положение элементов катапульты перед полным открытием канала затвора

В момент полного совмещения отверстий огнеупорных плит шибера затвора стрела 1 катапультируется вдоль выпускного канала ковша под действием силы, развиваемой изогнутыми листовыми пружинами 7 при их выпрямлении.

Состояние силовых узлов при этом показано на рисунке 2.14. Происходит полное ослабление натяжения струны 9. Под действием сжатых цилиндрических пружин 13 с помощью вилочных толкателей 11 катушки 10 вместе с ослабленной струной 9 практически мгновенно выталкиваются из прорезей свободных концов листовых пружин 7, обеспечивая вывод катушек 10 со струной 9 из зоны воздействия струи жидкой стали. Тем самым механика действия катапульты сохраняет эти элементы от разрушения под струей расплава.

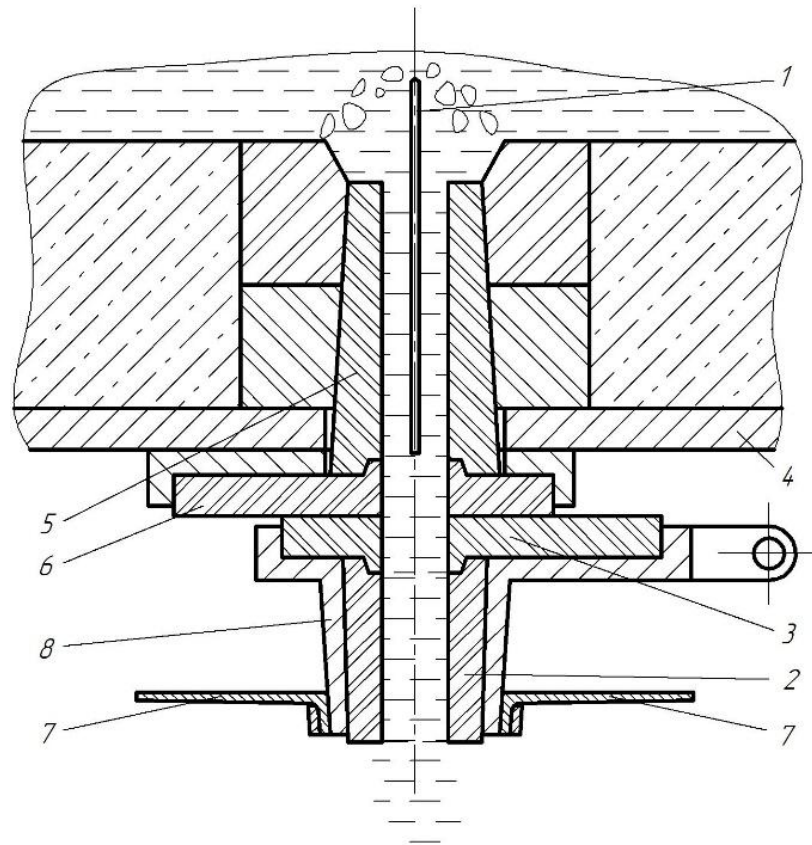


Рисунок 2.15 – Разрушение твердой корки за счет силового воздействия движущейся стрелой

Таким образом, за счет конструктивных особенностей катапульты обеспечивается возможность вывода основных элементов ее конструкции из зоны воздействия струи металлического расплава. Указанный подход увеличивает кратность их использования при снижении суммарных расходов на эксплуатацию катапульты – они сводятся только к расходу металлических стрел, которые разрушаются в общем объеме жидкого расплава внутри ковша.

Конструкция предложенной катапульты защищена патентом на изобретение RU 2751946 C2 [102], информация о котором приведена в Приложениях 4 и 5.

2.3 Исследование на физической модели функционирования катапульти во время ее срабатывания при открытии затвора

Для предварительной оценки работоспособности предложенной катапульти в масштабе 1:2 изготовили плоскую и натурную объемную модели ковшового затвора, укомплектованные двумя типами пружинных систем [103].

Плоская прозрачная модель затвора, снабженная катапультой с пластинчатыми пружинами, использовалась для решения двух задач:

- изучение особенностей процесса взаимодействия ее рабочего стержня (аналога стрелы) с мелкодисперсной засыпкой;
- изучение процесса разрушения корочки, образовавшейся на ее поверхности, этим же рабочим стержнем.

Объемная натурная модель затвора с гидравлическим приводом, снабженная катапультой с двумя цилиндрическими пружинами растяжения, использовалась для имитации начала разливки при различных условиях открывания разливочного устройства.

Прозрачность стенок обеих моделей сделала возможной видеосъемку процессов, протекающих при первом открытии затвора и срабатывании катапульти.

Чтобы получить характерные картины моделируемого процесса начала разливки с разрушением твердой перемычки из спекшейся стартовой смеси, образовавшейся на входе выпускного канала, использовали съемку в режиме «стоп-кадр». Благодаря этому были установлены особенности силового взаимодействия движущегося вверх металлического стержня как со стартовой смесью различного фракционного состава, так и с образовавшейся на ее поверхности затвердевшей коркой, обладающей пластичностью или хрупкостью.

Прежде всего следует отметить заметное влияние на эффективность срабатывания катапульти формы и размеров головной части ее ударного элемента. Если стержень имел малое лобовое сопротивление, то он проходил навывлет через

затвердевшую корочку, оставляя в ней лишь отверстие (фото на рисунке 2.16), что в реальных условиях разливки может происходить в случае, когда образовавшийся застывший слой будет пластичным. Следовательно, для его успешного разрушения потребуется применение стрелы с головкой специальной конфигурации.



Рисунок 2.16 – Картина процесса взаимодействия стрелы катапульты с малым лобовым сопротивлением при хрупком слое перемычки на входе в выпускной канал модели ковшового затвора

Наличие утолщения на верхнем конце стержня способствовало отрыву всего пластичного слоя перемычки и ее выбросу в полость модели ковша (фото на рисунке 2.17).

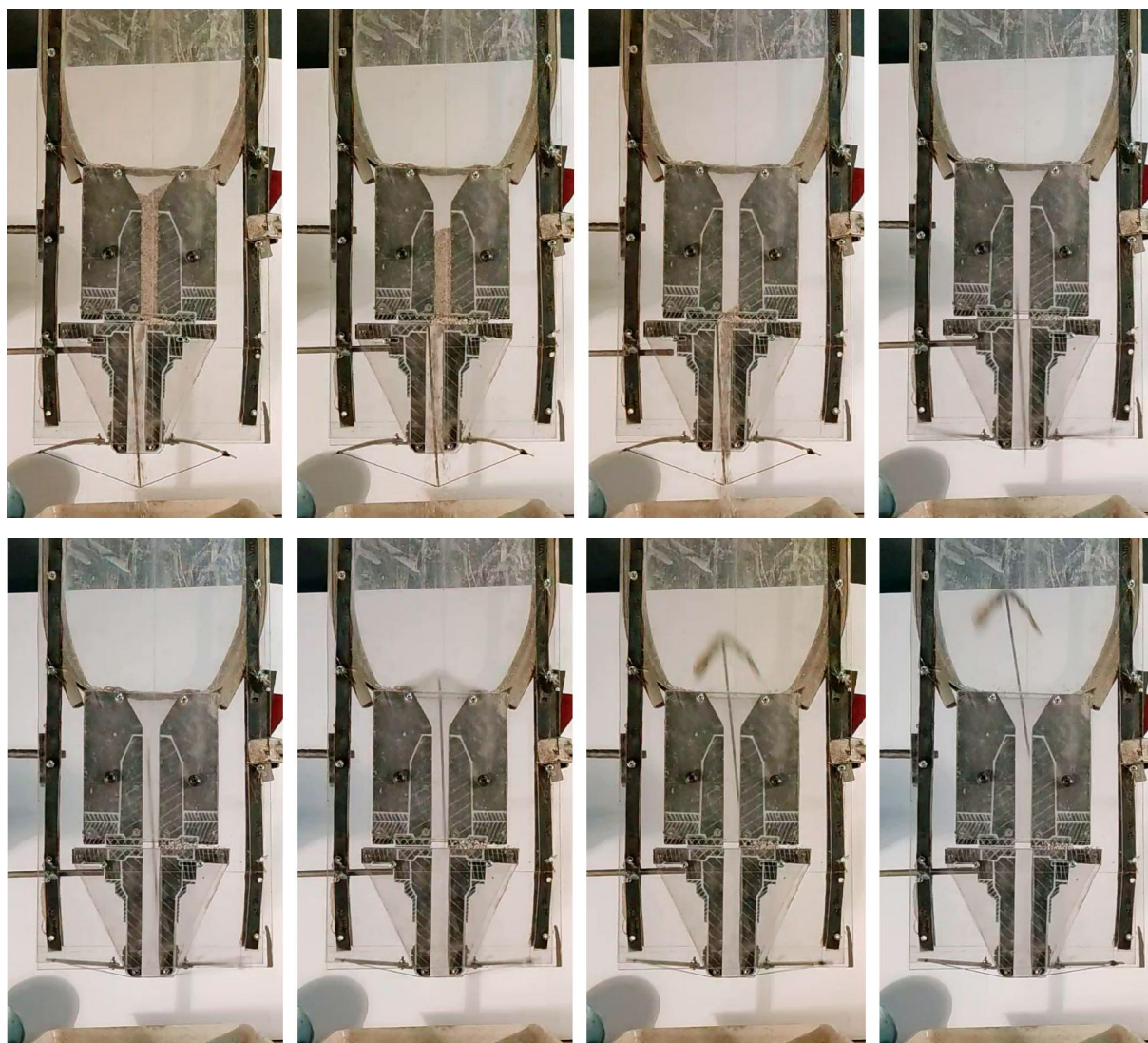


Рисунок 2.17 – Картина процесса взаимодействия стрелы катапульты с малым лобовым сопротивлением при вязком слое перемычки на входе в выпускной канал модели ковшового затвора

Однако при определенном соотношении диаметров головной части ударного элемента и канала модели ковшового стакана в случае его заполнения зернистой стартовой смесью наблюдалось ее реверсное движение вверх в момент срабатывания катапульты, что было вызвано повышенным лобовым сопротивлением элемента и приводило к его полной остановке на подступах к образовавшейся корочке и последующему выпадению вместе с остатками смеси из разливочного канала (фото на рисунке 2.18). В этом случае катапульта не обеспечивала выполнения своей функции.

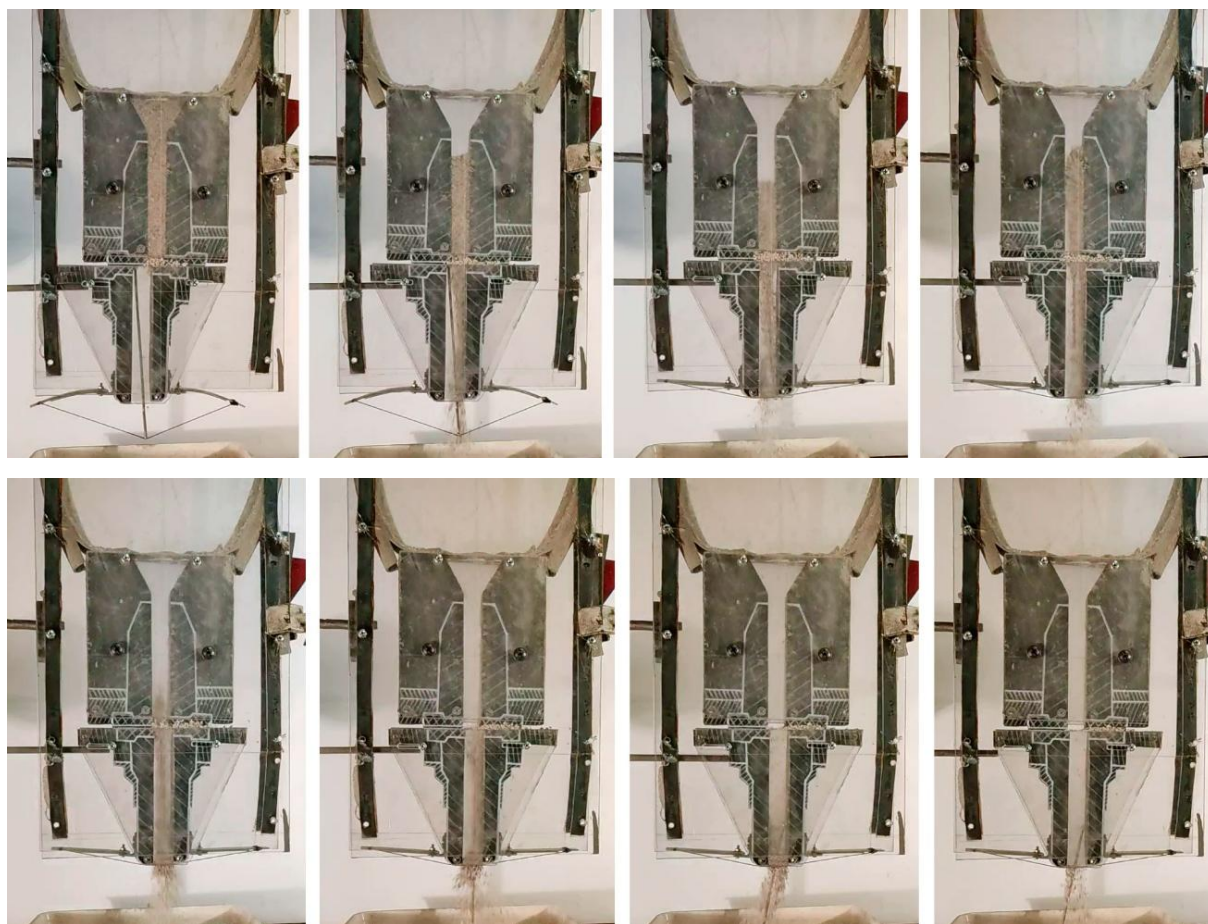


Рисунок 2.18 – Картина процесса взаимодействия стрелы катапульты с высоким лобовым сопротивлением при вязком слое перемишки на входе в выпускной канал модели ковшового затвора

Вторая серия опытов была проведена на объемной модели разливочной системы, в ходе которых симулировали начало разливки для случаев отсутствия твердой корки на поверхности стартовой смеси и при ее наличии, когда затвердевший слой был хрупким.

На рисунке 2.19 приведены фотографии придонной части модели разливочного ковша. На них последовательно отражен процесс проникновения стрелы катапульты в полость канала при отсутствии твердой перемишки на входе в отверстие разливочного стакана. В этом случае некоторое количество дисперсного материала, имитирующего стартовую смесь, выбрасывается стрелой катапульты над входным отверстием выпускного канала модели ковша, после чего из нее начинается стабильное истечение модельной жидкости.

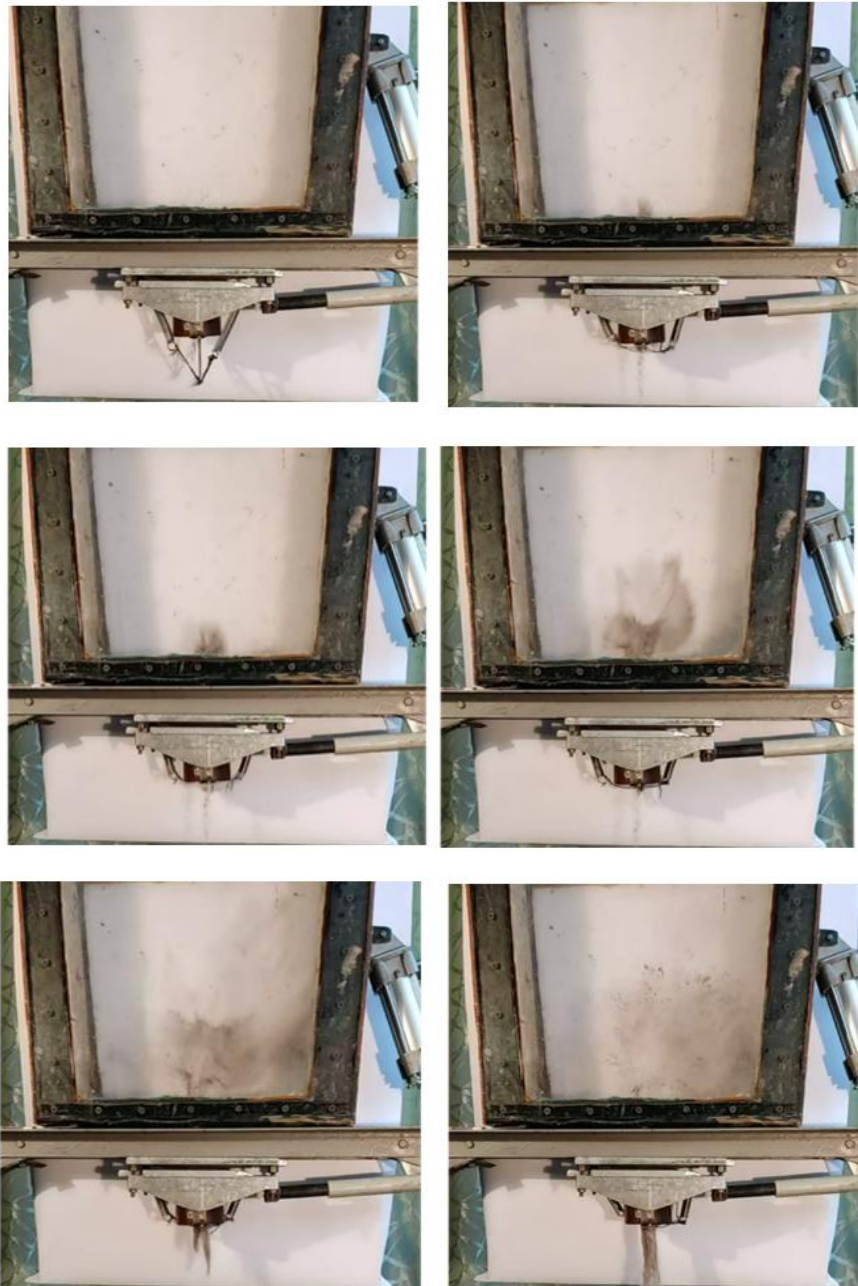


Рисунок 2.19 – Срабатывание катапульты при имитации начала разливки в случае отсутствия твердой корки на поверхности стартовой смеси

Имитация начала разливки при наличии хрупкой корки на входе в выпускной канал модели ковша (фото на рисунке 2.20) позволила установить особенности ее разрушения: образующиеся куски корки отбрасываются в сторону и не препятствуют началу разливки в штатном режиме.

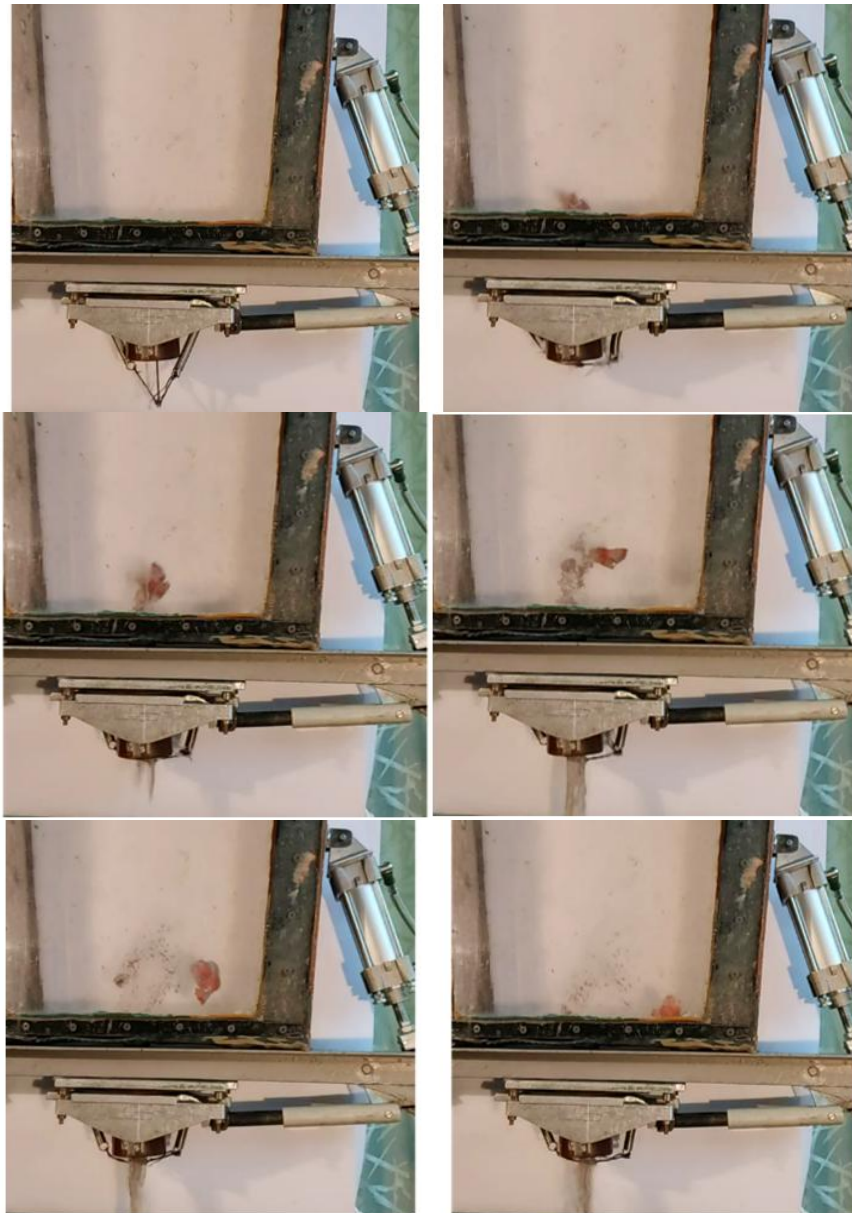


Рисунок 2.20 – Процесс разрушения хрупкой корки на поверхности стартовой смеси при срабатывании катапульты

Учитывая отмеченные моменты, следует признать целесообразным детальное изучение условий, способствующих своевременному высыпанию стартовой смеси.

Необходимо также обоснование силовых параметров катапульты, при которых будет обеспечено движение ударного элемента по направлению к образовавшейся перемычке со скоростью, достаточной для разрушения затвердевшего слоя стартовой смеси.

2.4 Получение теоретических зависимостей для определения энергосиловых параметров катапульты промышленного образца затвора и экспериментальная проверка правильности расчетных данных

Одной из ключевых задач проектирования технологической оснастки для различного рода операций и модернизации уже существующего оборудования будет разработка математического аппарата для точного расчета силовых параметров работы рассматриваемого устройства.

Получение аналитических зависимостей между силовой и геометрической составляющей конструкции катапульты позволит взвешенно и аргументированно подойти к вопросам конструирования подобных устройств для существующих шиберных затворов, а также обеспечить наиболее эффективный режим работы катапульты при минимальных расходах на ее изготовление.

Для математического исследования и обоснования энергосиловых параметров работы такого устройства следует использовать упрощенную расчетную схему (рисунок 2.21) [104, 105].

В рамках схематического описания необходимо учесть ряд ключевых параметров: длину канала ковшевого стака́на, диаметр и длину стержня, степень прогиба и вылет каждого упругого элемента, а также толщину спекшейся корки. Для определения последнего указанного параметра используем данные, полученные в п. 2.1 данной исследовательской работы. На схеме также указываем основные движущие силы, непосредственно участвующие в работе катапульты.

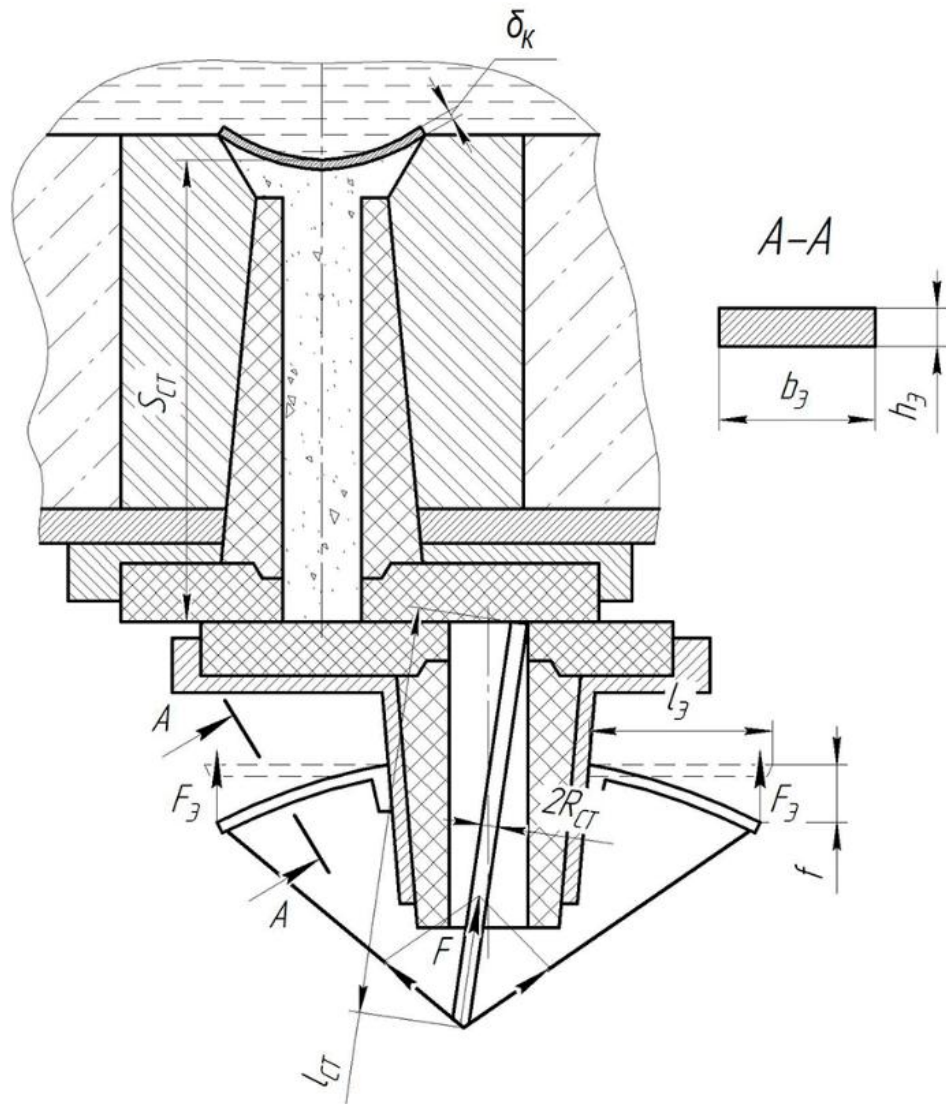


Рисунок 2.21 – Расчетная схема для определения энергосиловых параметров катапульты

Рассмотрим ситуацию, когда катапульта находится в статичном взведенном положении. Ее плоские упругие элементы – листовые пружины – деформируются с определенной степенью прогиба. Потенциальная энергия каждой при этом составит

$$W_{\Pi} = \frac{Kf^2}{2} \quad (2.13)$$

где K – коэффициент упругости элемента;

f – степень прогиба.

В момент открытия шиберного затвора стержень теряет точку опоры. Суммарная потенциальная энергия обеих плоских пружин преобразуется в кинетическую энергию, затрачиваемую на перемещение стержня вертикально вверх по каналу огнеупорного комплекта. Эту величину можно выразить через зависимость между массой стержня и скоростью его движения

$$W_K = \frac{m_{\text{СТ}} v_{\text{СТ}}^2}{2} \quad (2.14)$$

Кинетическую энергию стержня можно также выразить через сумму работ действующих на него сил

$$W_K = A_{\text{ДС}} + A_{\text{РК}} \quad (2.15)$$

где $A_{\text{ДС}}$ – работа силы динамического сопротивления со стороны сыпучей стартовой смеси, движущейся навстречу под действием силы тяжести и воздействующей на лобовую часть стержня;

$A_{\text{РК}}$ – работа силы, необходимой для непосредственного разрушения спекшейся корки, которая возникла в зоне смачивания расплавом поверхности стартовой смеси на входе в канал разливочного стакана.

Работу силы динамического сопротивления следует выразить через значение динамического сопротивления потока высыпающейся стартовой смеси, действующего на площадь поперечного сечения металлического стержня при его перемещении, равном сечения канала разливочного стакана:

$$A_{\text{ДС}} = F_{\text{ДС}} S_{\text{СТ}} = \frac{\rho_{\text{СР}} v_{\text{СТ}}^2 \pi R_{\text{СТ}}^2 S_{\text{СТ}}}{2} \quad (2.16)$$

где $\rho_{\text{СР}}$ – условная плотность среды, в которой движется стержень (свободно высыпающаяся стартовая смесь);

$R_{\text{СТ}}$ – радиус поперечного сечения стержня;

$S_{СТ}$ – длина пути металлического стержня в потоке смеси.

Плотность среды в данных расчетах носит исключительно условный характер, поскольку рассчитать фактическую плотность потока свободно движущихся дисперсных частиц не представляется возможным. Для получения расчетных данных используем зависимость

$$\rho_{СР} = (0,3 \dots 0,5)\rho_{СМ} \quad (2.17)$$

где $\rho_{СМ}$ – известная насыпная плотность стартовой смеси при полном заполнении полости верхнего комплекта огнеупоров.

Указанная выше зависимость (2.17) была получена в результате проведения модельных исследований.

Работа силы, необходимой для непосредственного разрушения спекшейся корки, следует выразить, исходя из прочностных характеристик самой корки

$$A_{РК} = 2\pi R_{СТ}\delta_K\sigma S_P = 2\pi R_{СТ}^2\delta_K\sigma \quad (2.18)$$

где δ_K – толщина корки;

σ – предел прочности материала спекшейся корки;

S_P – перемещение стержня, необходимое для разрушения корки и условно равное радиусу стержня.

Собственную массу стального стержня следует выразить, исходя из известных геометрических характеристик и свойств выбранного материала

$$m_{СТ} = \pi R_{СТ}^2 l_{СТ} \rho_{СТ} \quad (2.19)$$

где $l_{СТ}$ – габаритная длина стержня.

Подставим в формулу (2.14) выражение (2.19) и получим зависимость

$$W_K = \frac{\pi R_{\text{СТ}}^2 l_{\text{СТ}} \rho_{\text{СТ}} v_{\text{СТ}}^2}{2} \quad (2.20)$$

Тогда равенство (2.16) принимает вид

$$\frac{\pi R_{\text{СТ}}^2 l_{\text{СТ}} \rho_{\text{СТ}} v_{\text{СТ}}^2}{2} = \frac{\rho_{\text{СР}} v_{\text{СТ}}^2 \pi R_{\text{СТ}}^2 S_{\text{СТ}}}{2} + 2\pi R_{\text{СТ}}^2 \delta_K \sigma \quad (2.21)$$

После некоторых преобразований получим

$$v_{\text{СТ}}^2 (l_{\text{СТ}} \rho_{\text{СТ}} - \rho_{\text{СР}} S_{\text{СТ}}) = 4\delta_K \sigma \quad (2.22)$$

Выразим скорость движения стержня

$$v_{\text{СТ}} = \sqrt{\frac{4\delta_K \sigma}{\rho_{\text{СТ}} l_{\text{СТ}} - \rho_{\text{СР}} S_{\text{СТ}}}} = 2 \sqrt{\frac{\delta_K \sigma}{\rho_{\text{СТ}} l_{\text{СТ}} - \rho_{\text{СР}} S_{\text{СТ}}}} \quad (2.23)$$

Приравняем запас кинетической энергии движущегося по каналу разливочного стакана стержня к суммарному запасу потенциальной энергии двух взведенных плоских пружин

$$W_K = 2W_{\Pi} = 2 \frac{Kf^2}{2} = Kf^2 \quad (2.24)$$

При известном максимальном значении прогиба упругих элементов (плоских пружин катапульты) коэффициент упругости каждой и развиваемая сила будут равны

$$K = \frac{W_K}{f^2} \quad (2.25)$$

$$F_{\text{Э}} = Kf \quad (2.26)$$

Базовыми геометрическими параметрами каждого упругого элемента выступают эффективная длина $l_э$ и ширина сечения $b_э$. Эти параметры принимают конструктивно, отталкиваясь от размеров основных узлов шибберного затвора и наличия свободного пространства между плоскостью корпуса затвора и защитным экраном. Последняя деталь формально выступает нижней границей ковшевого затвора.

При конструировании плоских пружин также задаемся известным модулем упругости выбранного материала (рессорно-пружинной стали) E .

Определим осевой момент инерции упругого элемента

$$I = \frac{F_э l_э^3}{3Ef} \quad (2.27)$$

Известно, что для упругого элемента с прямоугольным сечением осевой момент инерции также равен

$$I = \frac{b_э h_э^3}{12} \quad (2.28)$$

Определим высоту сечения упругого элемента

$$h_э = \sqrt[3]{\frac{12I}{b_э}} \quad (2.29)$$

Исходные данные, которые используем при расчетах, сводим в таблицу 2.3, результаты расчетов – в таблицу 2.4.

Таблица 2.3 – Исходные значения параметров катапульты

Вместимость ковша, т	Длина канала неподвижной части огнеупорного комплекта $S_{ст}$, мм	Длина стержня катапульты $l_{ст}$, мм	Радиус поперечного сечения стержня $R_{ст}$, мм	Масса стержня $m_{ст}$, кг	Максимальная толщина разрушаемой корки δ_k , мм	Предел прочности материала корки σ , МПа
100	300	250	4	0,1	3	30
150	300	250	4	0,1	3	30
200	300	250	4	0,1	3	30
250	370	320	5	0,2	3	30
300	370	320	5	0,2	3	30

Таблица 2.4 – Результаты расчетов

Вместимость ковша, т	Требуемая скорость движения стержня $v_{ст}$, м/с	Кинетическая энергия стержня W_k , Дж	Длина упругого элемента l_3 , мм	Максимальный прогиб упругого элемента f , мм	Коэффициент упругости элемента K , Н/мм	Сила, развиваемая упругим элементом F_3 , Н	Осевой момент инерции сечения упругого элемента I , мм ⁴	Ширина поперечного сечения упругого элемента b , мм	Толщина поперечного сечения упругого элемента h , мм
100	14,2	10	200	60	2,8	168	37,3	25	2,6
150	14,2	10	200	60	2,8	168	37,3	25	2,6
200	14,2	10	200	60	2,8	168	37,3	25	2,6
250	12,8	16,4	250	80	2,6	208	67,7	30	3
300	12,8	16,4	250	80	2,6	208	67,7	30	3

Практический интерес для дальнейшего конструирования рабочей модели катапульты под конкретный шибберный затвор представляют: длина (вылет) упругого элемента, его толщина и высота сечения. Вместе со степенью прогиба при переводе устройство во взведенное состояние эти три параметра полностью характеризуют функциональные возможности пары плоских пружин, используемых для создания требуемого усилия.

2.5 Выводы

1. Результаты комплексного использования математического и физического моделирования силового воздействия статического давления жидкого металла на корку, блокирующую входное отверстие выпускного канала ковшового шиберного затвора, позволили установить для разливочных ковшей различной вместимости прочностные параметры материала и толщины образующейся перемычки, при которых потребуется ее разрушение внешним воздействием.

2. Разработанная и запатентованная конструкция катапульты, предназначенной для комплектования ковшового шиберного затвора, выгодно отличается от известных зарубежных аналогов меньшими эксплуатационными затратами, что обеспечено многократным использованием ее пружинных элементов за счет их выноса за пределы разливочного канала.

3. Результаты физического моделирования процесса силового взаимодействия металлического стержня катапульты с материалом стартовой смеси во время ее высыпания из полости канала ковшового стакана после открытия затвора подтвердили правильность принятых технических решений и являются исходной информацией при проведении теоретических исследований, связанных с изучением энергетических показателей функционирования разработанной катапультной системы.

4. Полученные аналитические зависимости позволяют обосновать силовые параметры катапульты, при которых гарантировано разрушение с ее помощью корки, образующейся в верхнем слое стартовой смеси на входе в выпускной канал сталеразливочного ковша с учетом его вместимости. Они могут быть оформлены в виде методики расчета геометрических и энергосиловых параметров катапульты для открытия выпускного канала металлургического ковша с донным шиберным затвором, пример которого приведен в Приложении 6.

3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОГНЕУПОРНУЮ ЧАСТЬ КОВШОВОГО ЗАТВОРА С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЗАТЯГИВАНИЯ ЕГО КАНАЛА

Предпосылки и необходимость к созданию вибрационной системы, которая бы эффективно препятствовала зарастанию канала ковшового затвора, были подробно изложены в 1 разделе данной работы.

Процесс проектирования и разработки подобной вибрационной системы включил несколько этапов:

- теоретическое и экспериментальное подтверждение воздействия вибрации на интенсивность процесса зарастания сталевыпускного канала разливочного ковша;
- поиск принципиальной схемы вибрационной системы шиберного затвора и рациональных значений ее конструктивных и рабочих параметров;
- конструирование и подготовка соответствующей технической документации;
- изготовление опытного образца разливочного устройства и экспериментальная проверка эффективности его функционирования.

Итоги исследования должны дать четкую картину понимания результатов применения вибрационных систем относительно модернизации классической шиберной разливки.

3.1 Теоретическое обоснование возможности влияния вибрационного воздействия на интенсивность зарастания канала ковшового затвора

В реальных условиях разливки сталей налипшая на стенку канала частица, как показано на рисунке 3.1а, подвергается воздействию гравитационной силы $P_{\text{г}}$ и силы $F_{\text{с}}$, вызванной гидродинамическим давлением потока стали. Развитие процесса зарастания канала можно объяснить тем, что действующие на частицу указанные внешние силы не могут в совокупности разрушить ее связь с поверхностью рабочей стенки огнеупора [106].

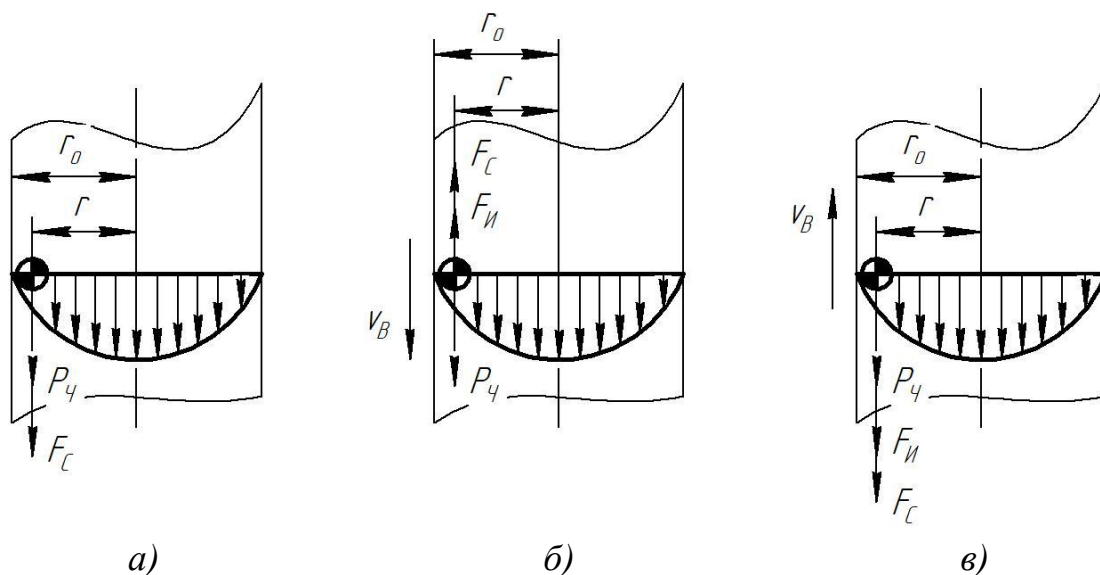


Рисунок 3.1 – Схема силового воздействия на твердую частицу, имеющую связь со стенкой выпускного канала, при отсутствии (а) и наличии (б, в) вертикально направленного вибрационного воздействия на разливочный узел ковша

При сообщении разливочному узлу вертикально направленных колебаний вероятность отрыва частиц от стенки канала определяется соотношением между упомянутыми силами и вибрационной нагрузкой $F_{\text{в}}$ (рисунки 3.1б и 3.1в). Значение последней зависит от амплитуды и частоты влияния периодического воздействия.

Подбирая данное воздействие определенным образом, можно усилить влияние невибрационных сил.

Математическое описание процесса работы вибрационной системы затвора должно содержать теоретические зависимости, при помощи которых можно связать механические параметры движения ее рабочего органа с показателями снижения интенсивности процесса зарастания сталевыпускного канала, достигнутыми за счет воздействия вибрации.

Допустим, что твердая частица, отложившаяся на стенке сталевыпускного канала, имеет форму сферы с радиусом $R_{\text{ч}}$. Тогда значения действующих на нее сил могут быть определены из приведенных ниже выражений.

Силу тяжести определим по формуле:

$$P_{\text{г}} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} g \quad (3.1)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частицы;

g – ускорение силы тяжести.

Силу инерции определим по формуле:

$$F_{\text{и}} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} a \quad (3.2)$$

где a – виброускорение, сообщаемое разливочному узлу ковша.

Силу сопротивления, действующую на частицу при обтекании ее потоком жидкой стали, определим по формуле:

$$F_{\text{с}} = \frac{1}{2} C_{\text{д}} \pi R_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{с}} v_{\text{отн}}^2 \quad (3.3)$$

где $C_{\text{д}}$ – коэффициент сопротивления давлению;

$\rho_{\text{с}}$ – плотность жидкой стали;

$v_{\text{отн}}$ – скорость движения жидкой стали относительно частицы.

Коэффициент сопротивления давления C_D зависит от формы частицы, ее ориентации по отношению к потоку и от числа Рейнольдса, которое характеризует отношение инерционных сил к силам вязкого трения в вязких жидкостях и газах.

На значение относительной скорости $v_{\text{отн}}$ влияет реализуемый способ разлива стали. При отсутствии вибрационного воздействия на разливочный узел $v_{\text{отн}}$ соответствует осредненной местной скорости v истечения жидкой стали в зоне ее контакта с частицей, отложившейся на стенке канала.

В случае воздействия на разливочный узел вертикально направленных колебаний относительную скорость можно выразить как сумму двух скоростей:

$$v_{\text{отн}} = (v \pm v_{\text{в}}) \quad (3.4)$$

где $v_{\text{в}}$ – виброскорость, сообщаемая стенкой выпускного канала прилипшей к ней частице.

Для определения скорости металлического потока в слое, граничащем с поверхностью стенки канала огнеупорного стакана, на которой происходит отложение частиц, можно использовать формулу А.Д. Альтшуля:

$$v/v_{\text{max}} = \left(1 - \frac{r}{r_o}\right)^{0,9\sqrt{\lambda}} \quad (3.5)$$

где v – осредненная местная скорость на рассматриваемом расстоянии от продольной оси канала разливочного стакана;

v_{max} – скорость на оси выпускного канала;

r – расстояние от оси канала до рассматриваемого слоя жидкого металла;

r_o – радиус канала;

λ – коэффициент гидравлического трения.

В условиях реализации разливки стали с использованием шиберных затворов радиус канала ковшового стакана r_o составляет 40–50 мм, а значение коэффициента λ можно принять равным 0,03.

Максимальная скорость истечения жидкой стали по оси канала составит:

$$v_{\max} = \varphi \sqrt{2gh_m} \quad (3.6)$$

где φ – коэффициент скорости, учитывающий потери напора жидкого металла;

h_m – высота столба жидкого металла в разливочном ковше.

У металлургических сталеразливочных ковшей вместимостью от 100 до 300 т значение h_m находится в пределах от 3 до 5 м, а коэффициент скорости φ для их выпускных каналов следует принимать равным 0,97–0,98.

С учетом вышеизложенного, результирующие силы, действующие на отрыв твердой частицы от стенки выпускного канала, для схем нагружения, приведенных на рисунке 3.1, составят:

$$F_{O1} = F_c + P_{\text{ч}} = \frac{1}{2} C_d \pi R_{\text{ч}}^2 \rho_c v^2 + \frac{4}{3} \pi R_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} g \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} F_{O2} &= F_c + F_{\text{и}} - P_{\text{ч}} = \frac{1}{2} C_d \pi R_{\text{ч}}^2 \rho_c (v - v_{\text{в}})^2 + \frac{4}{3} \pi R_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} a - \frac{4}{3} \pi R_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} g = \\ &= \frac{1}{2} C_d \pi R_{\text{ч}}^2 \rho_c (v - v_{\text{в}})^2 + \frac{4}{3} \pi R_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} (a - g) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} F_{O3} &= F_c + F_{\text{и}} + P_{\text{ч}} = \frac{1}{2} C_d \pi R_{\text{ч}}^2 \rho_c (v + v_{\text{в}})^2 + \frac{4}{3} \pi R_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} a + \frac{4}{3} \pi R_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} g = \\ &= \frac{1}{2} C_d \pi R_{\text{ч}}^2 \rho_c (v + v_{\text{в}})^2 + \frac{4}{3} \pi R_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} (a + g) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Подставив в данные формулы предварительно определенные значения C_d , v , v_b и a , при известных ρ_q и ρ_c получим значения результирующих сил, действующих на сферические частицы различного радиуса.

Расчетные данные свидетельствуют о том, что при вибрационном воздействии на разливочный узел ковша с виброускорением 100–160 м/с² для частицы радиусом 0,5 мм значения сил, отрывающих частицы от стенки выпускного канала, увеличивается в 1,6–2,5 раза, т.е. создаются условия, способствующие отрыву частиц от стенки канала и снижению интенсивности процесса его затягивания. Указанный диапазон виброускорений 100–160 мм/с² выбран как обеспечивающий превышение порога инерционного сдвига для зарождающихся пристеночных отложений при сохранении гидродинамической устойчивости потока жидкой стали и предотвращении возможного виброразрушения огнеупорной футеровки. Иначе говоря, предложенные режимы вибровоздействия недостаточны, чтобы интенсифицировать развитие сетки трещин в нагруженных огнеупорных шибберных плитах и нарушить сплошность струи металла при разливке, но достаточны, чтобы эффективно препятствовать формированию отложений в пограничных слоях потока.

Информация, полученная расчетным путем, требует экспериментальной проверки. Для этого, с учетом непреодолимых трудностей проведения опытов в реальных производственных условиях, наиболее приемлемым остается физическое моделирование.

3.2 Изучение на физической модели процесса затягивания канала затвора при различных условиях реализации разливки стали

Для качественной оценки возможности снижения интенсивности процесса отложений твердых частиц на рабочих стенках каналов огнеупорных элементов ковшевого затвора использовали метод физического моделирования.

В соответствии с методикой, подробно описанной в работе [107], изготовили экспериментальную установку (рисунок 3.2). Ее конструкция включает выполненную в масштабе 1:2 плоскую прозрачную модель шибера затвора 6. К ее конструктивной особенности следует отнести наличие двух вертикальных полостей 5, параллельно и симметрично расположенных относительно разливочного канала (с двух сторон).

Подаваемая по трубкам 7 в полости из напорной емкости 10 вода, имеющая температуру $+20^{\circ}\text{C}$, интенсифицирует направленный отвод тепла от стенок разливочного канала, контактирующих с жидкостью-имитатором металлического расплава. Проходя через полости, вода по трубкам 4 сливалась в расположенный под моделью сосуд 2, из которого затем с помощью насоса 1 закачивалась в напорную емкость 10. Имитатором жидкого металла служил расплав тиосульфата натрия, нагреваемый до температуры $+95^{\circ}\text{C}$.

В качестве возбудителя вертикальных колебаний, воздействующих на плоскую прозрачную модель ковшевого затвора, использовали жестко закрепленный к ее нижней части двухдебалансный вибратор направленного действия (фото на рисунке 3.3), изготовленный специально для данных исследований.

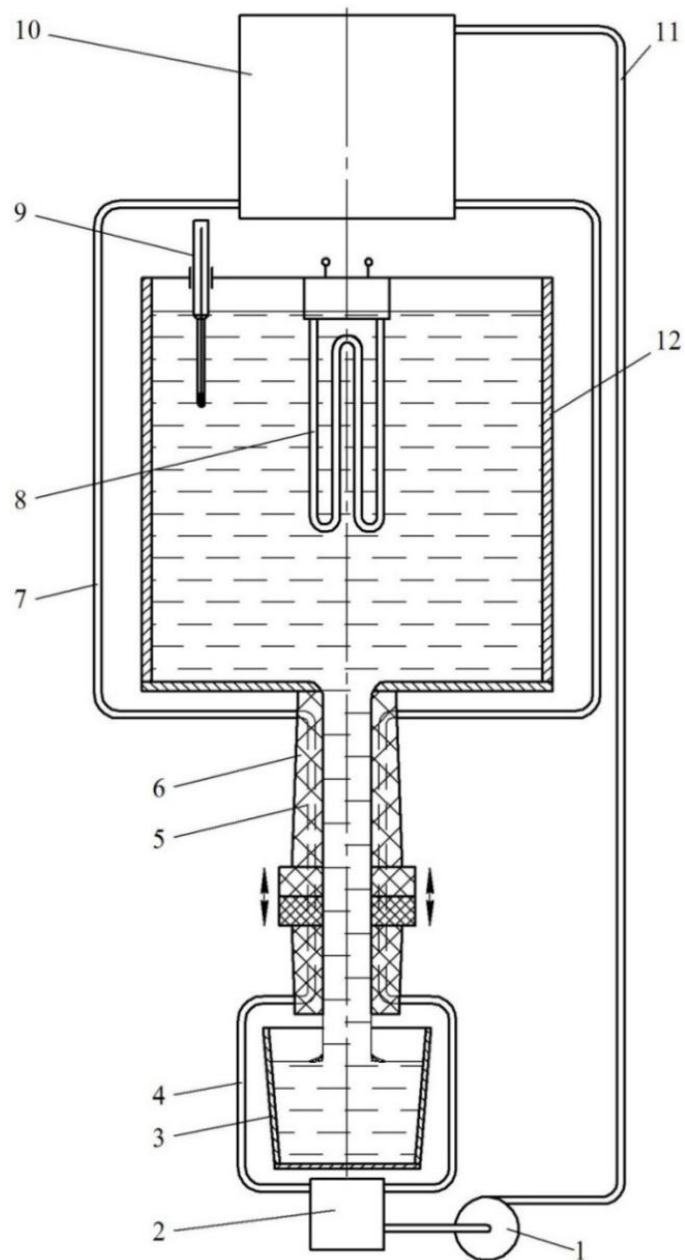


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки для моделирования процесса застывания канала ковшового затвора:

1 – насос; 2 – приемная емкость для воды; 3 – приемный желоб для имитатора жидкой стали; 4 – сливной трубопровод; 5 – полости для охлаждающей воды; 6 – плоская модель затвора; 7 – подающий трубопровод; 8 – электрический нагревательный элемент; 9 – ртутный термометр; 10 – напорная емкость с охлаждающей водой; 11 – напорный трубопровод; 12 – емкость с жидким тиосульфатом натрия.

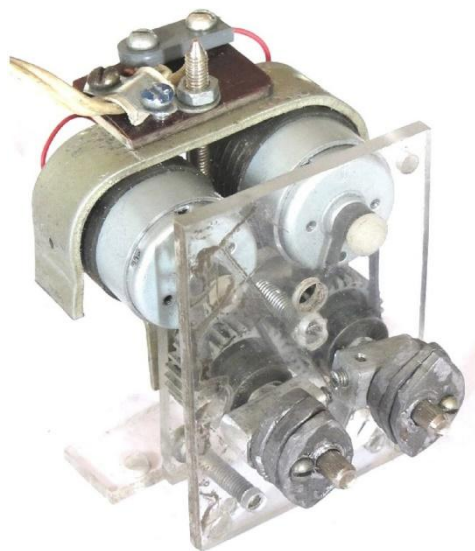


Рисунок 3.3 – Вибратор для возбуждения колебаний в модели затвора

Устройство включает два параллельных вала, установленных в подшипниковых опорах. Они синхронизированы между собой парой зубчатых колес с одинаковым числом зубьев и удерживают на консольных хвостовиках дебалансы. Крутящий момент каждому валу передают посредством клиноременной передачи от отдельного микродвигателя постоянного тока с регулируемой частотой вращения. Вибратор укомплектован набором съемных дебалансов, чтобы стала возможной реализация ступенчатого изменения обеспечиваемой им возмущающей силы за счет варьирования числа закрепляемых на его валах грузов со смещенным центром массы.

Вибрационную нагрузку, приложенную к модели ковшового затвора, задавали частотой колебаний и амплитудой, а интенсивность внешнего воздействия – виброускорением.

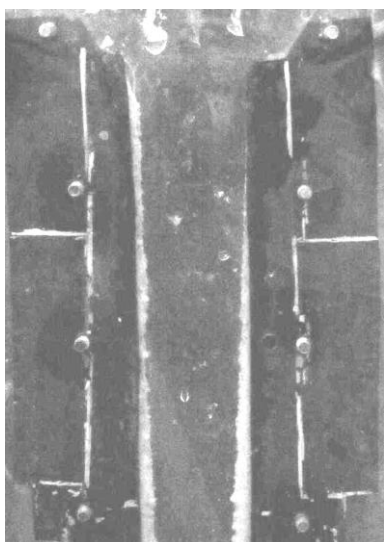
Многолетняя практика применения шибберных затворов свидетельствует о том, что процесс затягивания разливочного стакана ковша наиболее интенсивно развивается в те периоды, когда его сталевыпускной канал перекрыт. Такая картина характерна для условий эксплуатации затворов в литейных цехах, где перед

началом перемещения ковша к каждой последующей литейной форме шиберное устройство переводят в закрытое положение.

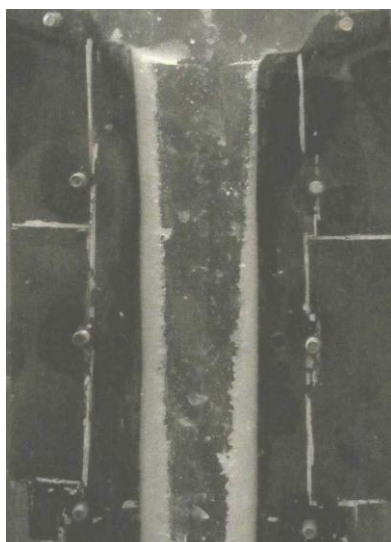
При непрерывной разливке стали процесс уменьшения эффективного сечения сталевыпускного канала путем застания особо остро проявляется у промежуточных ковшей, оборудованных шиберными затворами, когда металл разливают большими сериями. В связи с этим было принято решение в первую очередь смоделировать работу шиберной системы для указанных производственных условий.

На первом этапе модельных исследований планировалось выполнить проверку влияния вибрационного воздействия на скорость роста толщины слоя отложений в условиях отсутствия движущихся потоков металла, способных смывать их с контактной поверхности огнеупора. То есть – в ситуации подобной той, когда шиберный затвор перекрыт при перемещении литейного ковша от одной формы к другой.

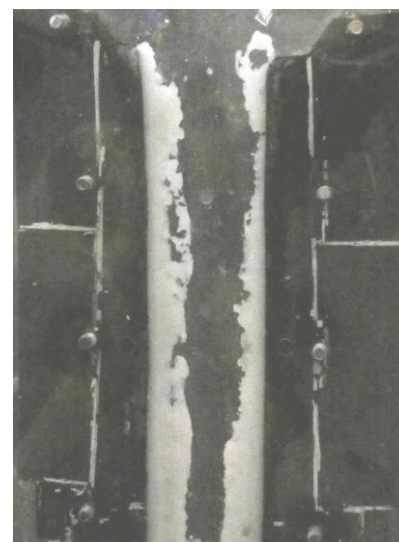
Опыты проводили последовательно по двум вариантам имитации процесса разливки [108]. В первом из них моделировали развитие процесса отложения на стенках канала модели слоя частиц с видеофиксацией его толщины через равные промежутки времени при отсутствии вибрационного воздействия (фото на рисунке 3.4a).



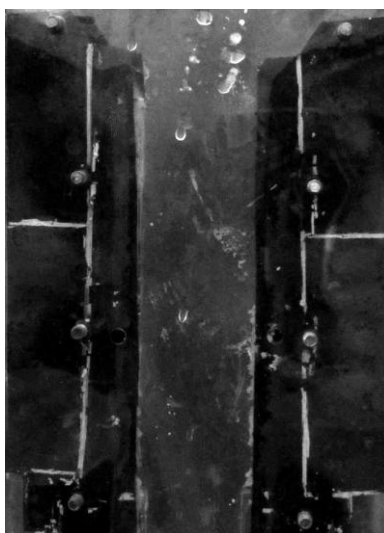
Выдержка 2 минуты



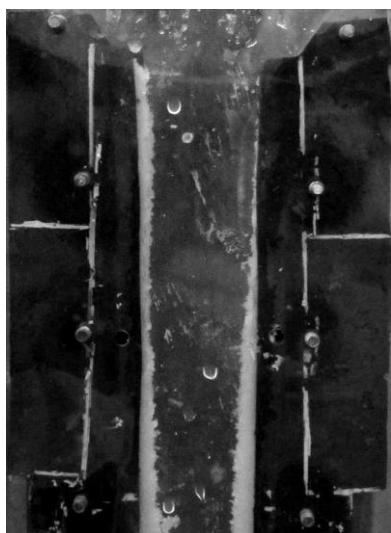
Выдержка 5 минут



Выдержка 10 минут

a)

Выдержка 2 минуты



Выдержка 5 минут



Выдержка 10 минут

б)

Рисунок 3.4 – Форма слоев имитатора настыли, образовавшихся в канале плоской модели затвора в случае отсутствия (*a*) и наличия вибрационного воздействия на нее (*б*) при нахождении в перекрытом состоянии в течение указанного времени.

Во втором опыте при моделировании процесса зарастания канала шибберного затвора его модель подвергали воздействию вибрации с фиксированными частотой и амплитудой возбуждаемых колебаний, генерируемых вибратором направленного действия.

Для условий проводившегося эксперимента значения параметров вибратора составили: $m = 45$ г; $\varepsilon = 10$ мм; $m_b = 450$ г; $A = 1$ мм; $\omega = 30$ с⁻¹.

Информация, полученная после завершения первого этапа модельных исследований, свидетельствует о том, что вибрация наиболее эффективна для разобращения образующихся кристаллов со стенкой канала разливочного стакана в начальный период развития процесса его зарастания (фото слева на рисунке 3.4б).

По мере роста толщины слоя отложений влияние вибрационного воздействия на данный процесс ослабляется (центральное фото на рисунке 3.4б). Отделяемые во время вибрационного воздействия от стенок канала стакана частицы при закрытом разливочном канале накапливаются над верхней неподвижной плитой модели затвора (фото справа на рисунке 3.4б), что в производственных условиях может препятствовать нормальному продолжению разливки металла при последующем открытии затвора. Поэтому длительность перекрытия канала при включенном вибраторе должна быть минимально возможной.

При организации и проведении второго этапа эксперимента, предполагалось изучение влияния интенсивности вибрационного воздействия на процесс зарастания канала модели ковшового затвора, находящегося в открытом положении, т.е. при наличии в нем потоков имитатора жидкого металла.

Температуру используемого в жидком состоянии тиосульфата натрия, поступавшего из емкости 12 в канал модели шибберного затвора, контролировали по показаниям термометра 9 и, поддерживали в интервале температур от +92 до +95°С с помощью вмонтированного электрического нагревательного элемента 8. Имитатор жидкой стали, истекавший из канала модели затвора, накапливался в приемном желобе 3, откуда его с помощью сменных емкостей порциями переливали обратно в емкость 12.

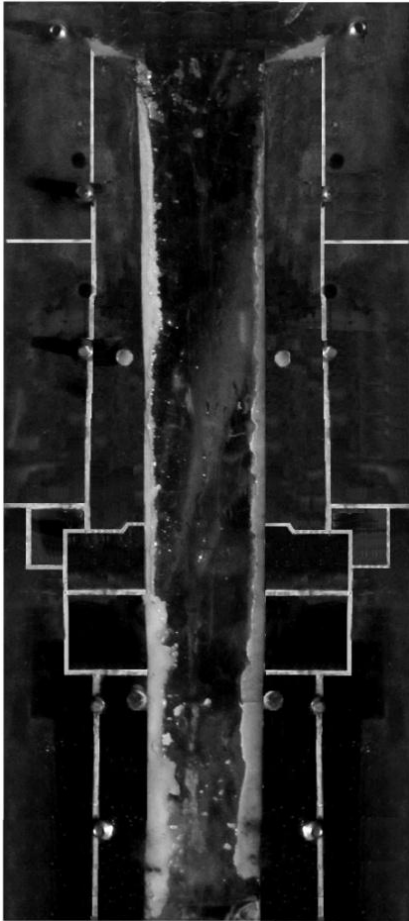
В соответствие с планом второго этапа эксперимента, в ходе проводившихся опытов, длительность которых составляла 20 минут, варьировали значения амплитуды и частоты колебаний, в совокупности определяющих интенсивность вибрационной нагрузки на модель ковшового затвора. Для каждого из опробованных режимов вибрационного воздействия на модель контролировали массу отложений на стенках ее разливочного стакана. С этой целью после проведения каждого опыта модель разбирали и тщательно соскабливали со стенок ее канала отложения тиосульфата натрия, массу которых затем определяли с помощью точных весов.

Результаты измерений приведены в таблице 3.1. Они свидетельствуют о том, что процесс зарастания канала модели ковшового затвора замедляется с увеличением интенсивности вибрационного воздействия на разливочную систему.

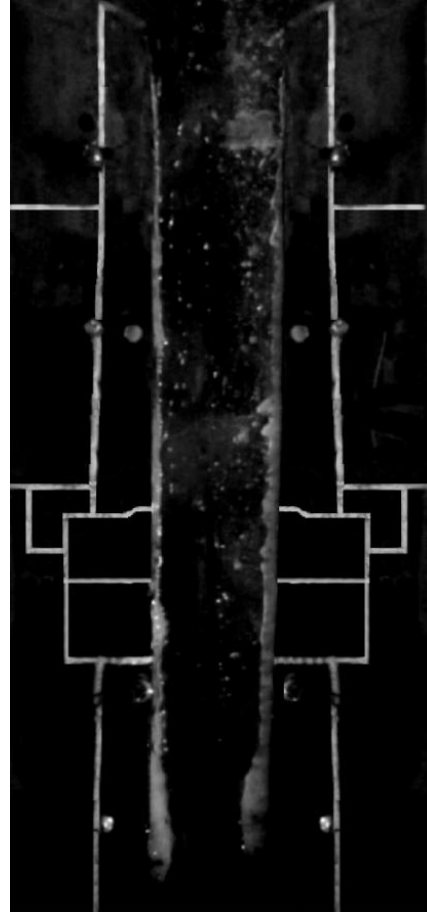
Таблица 3.1 – Зафиксированная масса отложений на стенках канала модели шибберного затвора при различной интенсивности вибрационного воздействия

Номер опыта	Угловая скорость дебалансов, с^{-1}	Амплитуда колебаний, мм	Интенсивность вибрационного воздействия, м/с^2	Масса отложений, г
1	15	0,7	0,16	39
2		1,3	0,29	36
3		2,0	0,45	34
4	30	0,7	0,63	30
5		1,3	1,17	26
6		2,0	1,81	21
7	50	0,7	1,75	17
8		1,3	3,25	13
9		2,0	5,00	10

Для наглядности на рисунке 3.5 показаны фотографии слоев отложений на стенках модели затвора, зафиксированные при истечении имитатора жидкого металла за одинаковые промежутки времени в случаях отсутствия и наличия вибрационного воздействия на модель разливочной системы.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Форма и толщина слоев отложений на стенках канала модели шибера затвора при отсутствии внешнего воздействия на нее (а) и в случае наложения вибрации низкой частоты (б)

Сопоставив форму и толщину слоев отложений, образовавшихся при различных вариантах имитации процесса разливки, можно констатировать факт влияния потоков жидкости, моделирующей разливаемую сталь, на скорость изменения проходного сечения канала, что выражается в снижении интенсивности

налипания частиц благодаря их смыванию. При этом наибольшую толщину слоя отложений на стенках канала модели затвора наблюдали в зонах расположения имевшихся неровностей и выступов, увеличивающих местное сопротивление жидкостному потоку, что особо проявлялось в местах стыковки огнеупорных элементов. Причем масса отложений при отсутствии внешнего воздействия на модель шиберного затвора составила 54 г, т.е. была заметно больше значений, полученных во время моделирования разливки с применением вибрации (данные таблицы 3.1).

Следует учесть, что проведенные модельные исследования позволили имитировать формирование слоя отложений в канале затвора, обусловленное только гидродинамическими и тепловыми процессами, протекающими в нем при контакте потока стали, истекающей из ковша, со стенками огнеупорных элементов его разливочной системы. Явления, связанные с химическими реакциями между компонентами расплава и самих огнеупоров, при данной методике проведения эксперимента не учитывали из-за невозможности симуляции в ходе моделирования химических процессов, имеющих развитие в реальных производственных условиях.

Стоит также отметить, что успех реализации предлагаемого технического решения будет во многом зависеть от совершенства конструктивного исполнения ковшового затвора, оборудованного специальными вибраторами направленного действия, возбуждающими колебания, которые должны препятствовать быстрому росту кристаллов на рабочих стенках сталевыпускного канала.

Эксплуатация такого затвора сопряжена с необходимостью подвода энергии, требуемой для функционирования вибратора. Поэтому второй этап запланированных модельных исследований был связан с получением исходной информации, позволяющей сделать обоснованный выбор типа вибрационной системы, предназначенной для использования в составе ковшового затвора с целью предотвращения зарастания его канала.

3.3 Выбор рациональной конструктивной схемы вибратора для применения в системе ковшового затвора

Предварительная конструктивная проработка предлагаемого технического решения показала, что эффективность его промышленного применения в значительной мере будет зависеть от того, в какой мере вибратор, являющийся вспомогательным структурным элементом системы ковшового затвора, отвечает комплексу требований: компактность; простота и безопасность подвода энергоносителя, необходимого для возбуждения низкочастотной вибрации; возможность гибкого регулирования параметров колебательного процесса; минимизация числа дополнительных операций, связанных с обслуживанием.

Для обоснования выбора конструктивного исполнения такого вибратора и выдачи рекомендаций по его практическому применению необходимо проведение при одинаковых условиях сопоставительных испытаний нескольких типов устройств, обеспечивающих возбуждение направленных колебаний с соответствующей частотой и амплитудой [109]. С этой целью из всего многообразия известных технических решений, позволяющих реализовать колебательный процесс, были отобраны три типа вибраторов и изготовлены их действующие образцы, имевшие одинаковую инерционную массу подвижных элементов. Речь идет об электромеханическом, пневматическом и электромагнитном вибраторах, схематично представленных на рисунках 3.6–3.8.

Первый из них являлся двухдебалансным вибратором направленного действия (рисунок 3.6). Он включал два параллельных вала 1, установленных в подшипниковых опорах вала, синхронизированных между собой парой зубчатых колес 2 и 8 с одинаковым числом зубьев и несущих на своих консольных хвостовиках дебалансы 7. Крутящий момент каждому валу передавался посредством клиноременной передачи 4 от отдельного микродвигателя постоянного тока 3 с регулируемой частотой вращения.

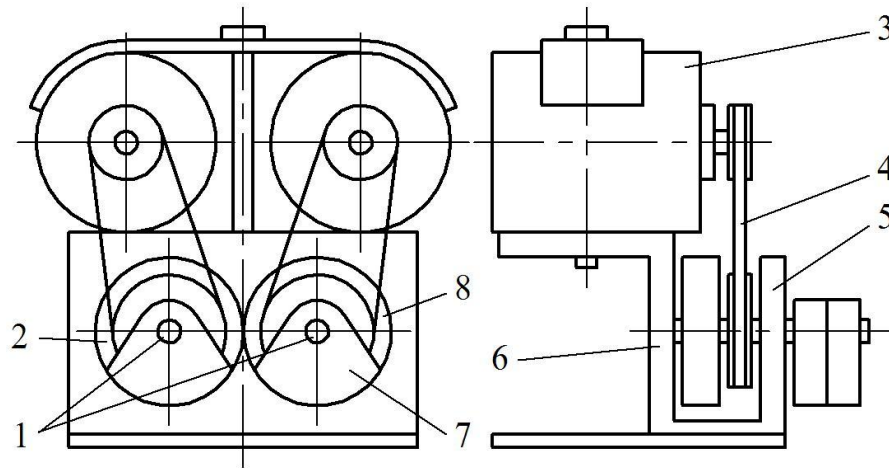


Рисунок 3.6 – Схема электромеханического вибратора направленного действия

Вибратор был укомплектован набором съемных дебалансов с целью возможности ступенчатого изменения обеспечиваемой им возмущающей силы за счет варьирования количества закрепляемых на его валах грузов со смещенным центром массы. Развиваемую им вибрационную нагрузку задавали частотой колебаний и амплитудой. Амплитуду A вычисляли, используя выражение:

$$A = \frac{m_d \varepsilon}{m_v} \quad (3.10)$$

где m_d – масса дебалансов вибратора;

ε – эксцентриситет дебаланса;

m_v – масса вибратора.

Интенсивность вибрационного воздействия, оцениваемую виброускорением, определяли по формуле:

$$W = A\omega^2 \quad (3.11)$$

где ω – угловая скорость дебалансов.

Пневматический вибратор направленного действия (рисунок 3.7) включал пустотелый цилиндрический корпус 5 с ввинченной в него крышкой 6 и снабженный хвостовиком 11 с наружной резьбой. Внутри корпуса размещен с возможностью относительного продольного перемещения сдвоенный поршень 2, удерживаемый в среднем положении частично сжатыми пружинами 4 и 10. В стенке пустотелого цилиндрического корпуса имеются два перепускных канала 7 и 9, а также два выпускных отверстия 1 и 3.

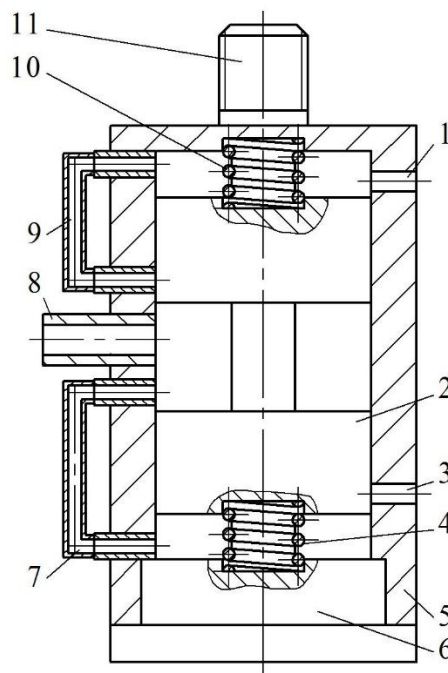


Рисунок 3.7 – Схема пневматического вибратора направленного действия

Подаваемый по трубопроводу 8 в среднюю часть рабочей полости сжатый воздух по каналу 7 поступает в нижнюю полость под сдвоенный поршень 2, который под действие давления переместится вверх, сжимая пружину 10 и вытесняя через открытое отверстие 1 в атмосферу воздух из полости, находящейся над ним.

Вблизи своего крайнего верхнего положения сдвоенный поршень 2 перекроет выпускное отверстие 1 и перепускной канал 7 и одновременно с этим откроет выпускное отверстие 3 и перепускной канал 9, в результате чего произойдет реверсирование движения самого поршня.

Под действием давления на верхнюю часть поршня он начнет перемещение вниз сжимаю пружину 4 и вытесняя воздух через отверстие 3 в атмосферу из нижней части рабочей полости. Достигнув своего крайнего нижнего положения, поршень открывает выпускное отверстие 1 и перепускной канал 7, т.е. начнет совершать колебания, частота и амплитуда которых зависит от давления воздуха и жесткости пружин 4 и 10.

Амплитуду колебаний A , возбуждаемых пневматическим вибратором, вычисляли по формуле:

$$A = \frac{m_{\pi} s_{\pi}}{m_{\text{в}}} \quad (3.12)$$

где m_{π} – масса сдвоенного поршня вибратора;

s_{π} – ход сдвоенного поршня из среднего положения в крайнее.

Электромагнитный вибратор (рисунок 3.8) включал катушку, помещенную в металлический корпус 2, закрепленный на основании 1. Внутри катушки размещен с возможностью относительного продольного перемещения медный боек-сердечник 4 с буртиком, упирающимся в несущую платформу 5, посредством двух шпилек 3 связанную с основанием катушки. Между верхним торцом корпуса катушки и буртиком бойка-сердечника коаксиально ему установлена цилиндрическая витая пружина 6.

Перемещение бойка-сердечника в одну сторону осуществляется электромагнитными силами катушки, а в другую силами упругости пружины. Частоту срабатывания электромагнитного вибратора задавали с помощью специального регулятора, включавшего электродвигатель постоянного тока 7, приводившего через клиноременную передачу 8 во вращение установленный вертикально в подшипниковой опоре диск 9, по краю которого крепились кулачки 10. При вращении диска кулачки поочередно замыкали контакт 11, через который от источника питания на обмотку катушки подавался ток. За счет изменения скорости вращения диска и количества равномерно рассредоточенных по его

периметру кулачков обеспечивалось регулирование в значительных пределах частоты колебаний сердечника катушки.

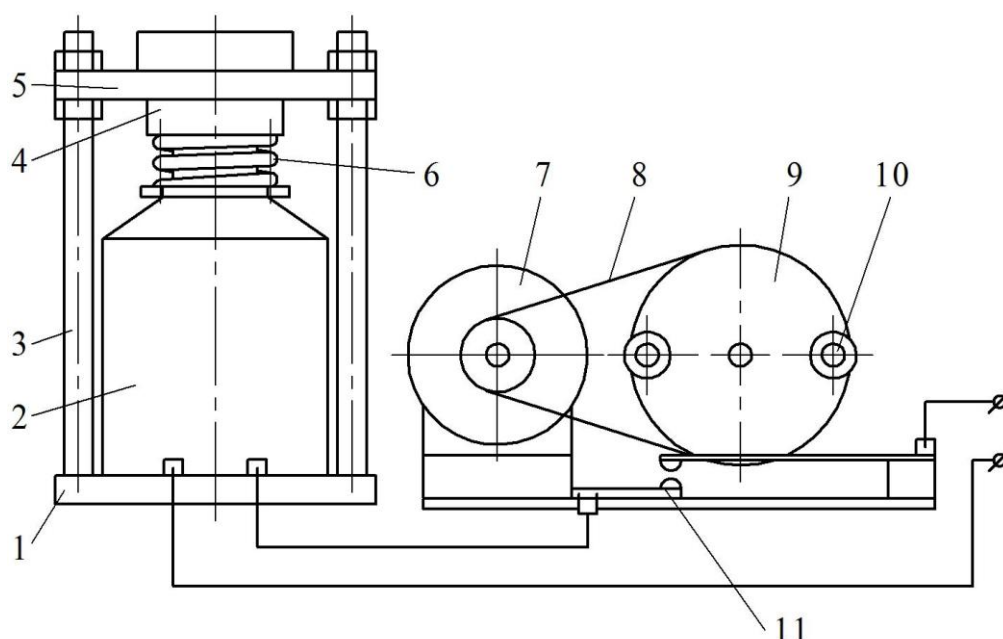


Рисунок 3.8 – Схема электромагнитного вибратора направленного действия

Амплитуду колебаний при работе электромагнитного вибратора A вычисляли по формуле:

$$A = \frac{m_6 s_6}{m_b} \quad (3.13)$$

где m_6 – масса бойка-сердечника;

s_6 – ход бойка-сердечника.

В соответствии с планом эксперимента в ходе проводившихся модельных исследований получили информацию, необходимую для сопоставления значений параметров функционирования трех выбранных вибраторов, а также потребляемую ими мощность при развиваемой силе вибрационного воздействия.

Для контроля параметров исследуемого вибрационного процесса применили контрольно-измерительный комплекс, включавший двух- координатный

акселерометр ADX 1.210 фирмы ANALOG DEVICES и IBM-совместимый компьютер с установленной на его шине платой L-154 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD.

Акселерометр позволял фиксировать линейное ускорение в пределах от $-10g$ до $+10g$ при частоте записи сигнала 1...10 кГц. Требуемую частоту опроса акселерометра назначали исходя из условия:

$$f_n < \frac{1}{T} < f_{\text{и}} \quad (3.14)$$

где T – длительность импульса, составляющая 0,0002 – 0,001 с.

Обработку цифрового представления сигналов, поступающих от акселерометра, выполняли на ЭВМ в реальном масштабе времени при помощи прикладной программы Power Graph 2.0.

Учитывая особенности функционирования каждого из трех выбранных вибраторов, во время проводившихся опытов для каждого из них внимание уделяли в первую очередь тем параметрам, которые оказывали превалирующее влияние на эффективность работы конкретной вибрационной системы.

При работе с электромеханическим вибратором провели три серии измерений, во время которых варьировали амплитуду и частоту возбуждаемых колебаний, чтобы оценить обеспечиваемую интенсивность вибрационного воздействия. одновременно по показаниям вольтметра и амперметра блока питания двигателей постоянного тока, приводивших во вращение дебалансы, фиксировали потребляемую ими электрическую мощность для каждого опыта.

Значения амплитуды колебаний, вызываемых вибратором, дискретно изменяли путем дискретного уменьшения массы его дебалансов с 45 до 15 г, а частоту их вращения – за счет регулирования напряжения питания приводных электродвигателей.

На рисунке 3.9 приведен характерный вид сигналов, зарегистрированных во время работы электромеханического вибратора направленного действия с различной частотой вращения двух дебалансов при неизменной их массе.

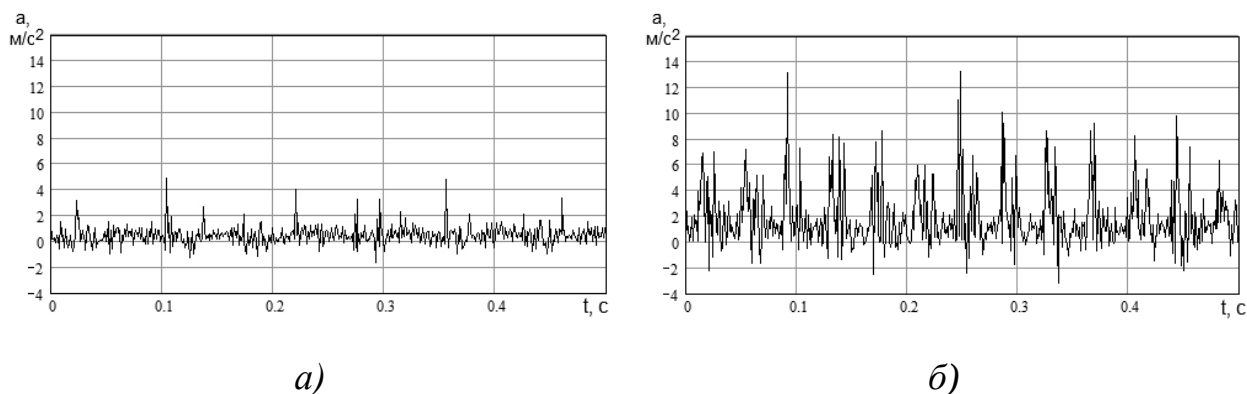


Рисунок 3.9 – Виброускорение, развиваемое электромеханическим вибратором при одинаковой массе дебалансов (45 г), вращающихся с частотой 50 с^{-1} (а) и 100 с^{-1} (б).

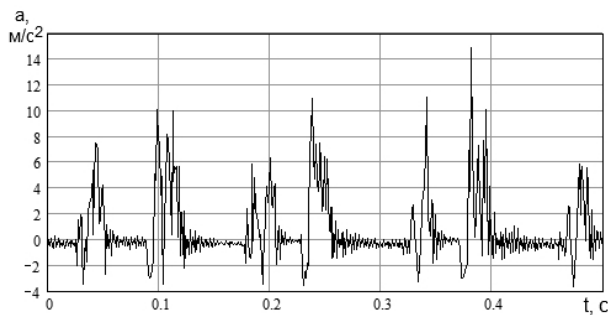
Зафиксированные значения параметров функционирования данной вибрационной системы представлены в таблице 3.2.

Во время исследования особенностей работы пневматического вибратора масса его подвижной части - сдвоенного поршня была неизменной и составляла 25 г. Наряду с этим меняли жесткость пружин, удерживавших его в среднем положении, а также варьировали давление и расход сжатого воздуха, выступавшего в качестве энергоносителя, обеспечивавшего функционирования вибрационной системы.

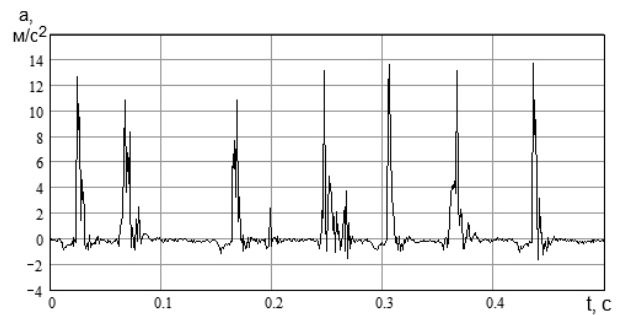
Характерный вид сигналов, зафиксированных при работе пневматического вибратора с пружинами разной жесткости, показан на рисунке 3.10.

Таблица 3.2 – Зафиксированные значения параметров функционирования электромеханического вибратора

Параметры дебалансов		Амплитуда колебаний вибратора, мм	Частота вращения дебалансов, с ⁻¹	Возникающее виброускорение, м/с ²	Развиваемая сила вибровоздействия, Н	Потребляемая вибратором мощность, Вт
Масса, г	Эксцентриситет, мм					
45	1	1	52	2,7	1,2	3
			104	10,82	4,87	6
			157	24,85	11,18	9
30	0,6	0,6	52	1,62	0,33	3
			10	6,49	2,92	6
			157	14,79	6,66	9
15	0,33	0,33	52	0,89	0,4	3
			104	3,57	1,6	6
			157	8,13	3,16	9



а)



б)

Рисунок 3.10 – Виброускорение, развиваемое пневматическим вибратором при жесткости пружин 0,45 Н/мм и расходе воздуха $11 \cdot 10^{-6}$ м³/с (а), а также 0,36 Н/мм и $18 \cdot 10^{-6}$ м³/с (б).

Расход и давление воздуха, поступавшего в рабочую полость вибратора от мини-компрессора, контролировали соответственно с помощью ротаметра и манометра. Значение указанных величин затем использовали для расчета значений потребляемой пневматическим вибратором мощности при различных исходных параметрах. Зафиксированные значения исследуемых величин приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Зафиксированные значения параметров функционирования пневматического вибратора

Амплитуда колебаний вибратора, мм	Жесткость пружин вибратора, Н/мм	Давление воздуха, Н/м ²	Расход воздуха, м ³ /с	Частота возбуждаемых колебаний, с ⁻¹	Возникающее виброускорение, м/с ²	Развиваемая сила вибровоздействия, Н	Потребляемая мощность, Вт
1,0	0,45	40·10 ³	11·10 ⁻⁶	5	11	3,30	0,44
			56·10 ⁻⁶	25	15	4,95	2,24
			110·10 ⁻⁶	50	18	5,95	4,40
	0,36	32·10 ³	18·10 ⁻⁶	8	12	3,60	0,58
			90·10 ⁻⁶	40	16	5,28	2,88
			110·10 ⁻⁶	80	20	6,60	5,76

При проведении опытов с использованием электромагнитного вибратора, как и в случае с пневматической вибросистемой, масса подвижной части, т.е. бойка-сердечника оставалась неизменной (50 г), а на параметры возбуждавшихся колебаний влияли за счет изменения жесткости пружины, выталкивающей его из катушки в момент отключения электропитания, а также напряжения, подаваемого на ее обмотки с различной частотой замыкания контактов с помощью кулачков, установленных на вращающемся диске (рисунок 3.8). Потребляемую электромагнитным вибратором электрическую мощность оценивали по произведению показаний вольтметра и амперметра использовавшегося блока питания вибрационной системы.

На рисунке 3.11 показаны формы сигналов о виброускорении, развиваемом электромагнитным вибратором при одинаковой жесткости его возвратной пружины и различной частоте замыкания контактов в цепи электропитания обмоток катушки, а в таблице 3.4 приведены значения параметров реализации колебательного процесса для разных соотношений влияющих на него величин.

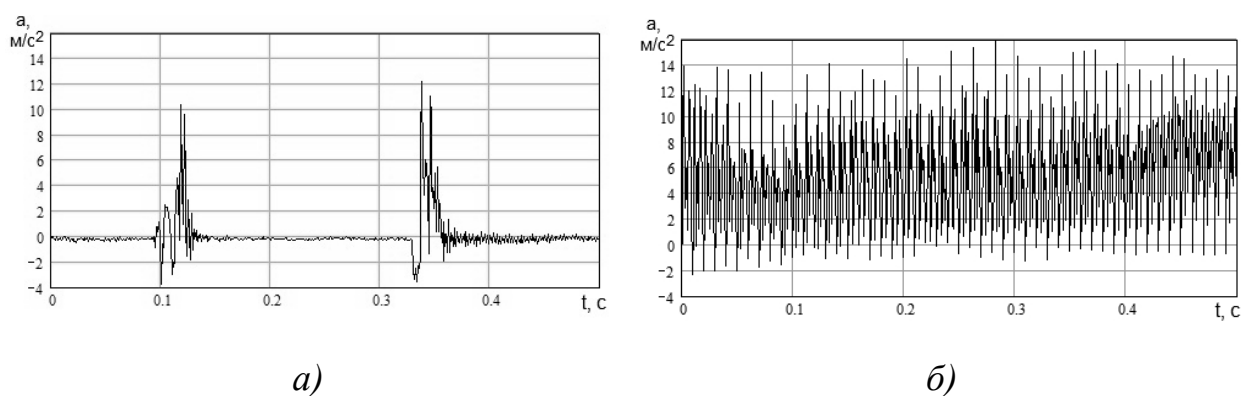


Рисунок 3.11 – Виброускорение, зафиксированное во время работы электромагнитного вибратора с частотой колебаний 4 с^{-1} (а) и 120 с^{-1} (б) при жесткости его возвратной пружины $0,36 \text{ Н/м}$

Таблица 3.4 – Зафиксированные значения параметров функционирования электромагнитного вибратора

Жесткость возвратной пружины вибратора, Н/мм	Масса бойка- сердечника вибратора, г	Амплитуда колебаний вибратора, мм	Частота возбуждаемых колебаний, с ⁻¹	Возникающее виброускорение, м/с ²	Развиваемая сила вибровоздействия, Н	Потребляемая вибратором мощность, Вт
0,25	40	1	4	10	3	5,5
			60	12	3,6	8
			120	14	4,2	12
0,36			4	11	3,3	11
			60	14	4,2	15
			120	16	4,8	20

Анализ информации, полученной в результате проведенных лабораторных экспериментов, позволил сделать несколько практических выводов относительно перспектив использования каждого из трех исследуемых вибраторов в составе системы шиберного затвора для активного влияния на интенсивность развития процесса затягивания сталевыпускного канала разливочного или промежуточного ковшей.

Электромеханический вибратор позволяет выполнять как плавное, так и дискретное регулирование обеспечиваемых им параметров колебательного процесса, а по потребляемой мощности занимает промежуточное положение среди опробованных вибрационных систем. Однако при его использовании потребуется подвод к шиберному затвору электрической энергии, что усложнит эксплуатацию и обслуживание всей системы в целом и потребует принятия дополнительных мер по обеспечению безопасности ее работы.

Электромеханический вибратор позволяет выполнять как плавное, так и дискретное регулирование обеспечиваемых им параметров колебательного процесса, а по потребляемой мощности занимает промежуточное положение среди опробованных вибрационных систем. Однако при его использовании потребуется подвод к шиберному затвору электрической энергии, что усложнит эксплуатацию и обслуживание всей системы в целом и потребует принятия дополнительных мер по обеспечению безопасности ее работы.

Такие же по сути проблемы могут возникнуть в случае применения в шиберном затворе электромагнитного вибратора, требующего для своей работы электрической энергии.

Поэтому для оборудования шиберного затвора в наибольшей мере подходит вибратор, работающий от сжатого воздуха, так как он соответствует таким предъявляемым требованиям, как компактность, безопасность и удобство в эксплуатации. Это обусловлено тем, что у современных ковшовых затворов кассетного типа для прижатия огнеупорных плит применяют блоки тарельчатых или витых пружин, в обязательном порядке охлаждаемых во время разливки стали воздухом, подаваемым по трубопроводу под избыточным давлением от цеховой

магистральной. Этот воздух можно одновременно использовать в качестве энергоносителя для приведения в действие возбудителя колебаний ковшового затвора. При этом параметры колебательного процесса, реализуемого в системе шиберного затвора, можно регулировать путем изменения в нужных пределах давления воздуха, подаваемого к вибратору, а также выбирая соответствующую жесткость его пружин.

Количество таких вибраторов и геометрические размеры их подвижных элементов, возбуждающих вертикально направленные колебания, воздействующие на ковшовый затвор, должны быть рассчитаны на основе положений теории динамики машин с последующей экспериментальной проверкой на натурных образцах разливочных устройств шиберного типа.

3.4 Разработка конструкции ковшового затвора, снабженного системой вибрационного воздействия на его комплект огнеупорных изделий

На основании результатов выполненного сопоставительного анализа достоинств и недостатков известных аналогов была разработана конструкция усовершенствованного ковшового шиберного затвора, в котором обеспечивается создание вертикально направленного вибрационного воздействия на огнеупорные элементы при открытом и перекрытом сталевыпускном канале разливочного ковша, способствующего непрерывному механическому разрушению связей между частицами отложений, формирующихся на рабочих стенках разливочного канала, что приводит к увеличению длительности активного функционирования системы предотвращения его зарастания.

На рисунках 3.12, 3.13 и 3.14 показаны соответственно продольный и поперечный разрезы, а также вид снизу предложенного ковшового шиберного затвора.

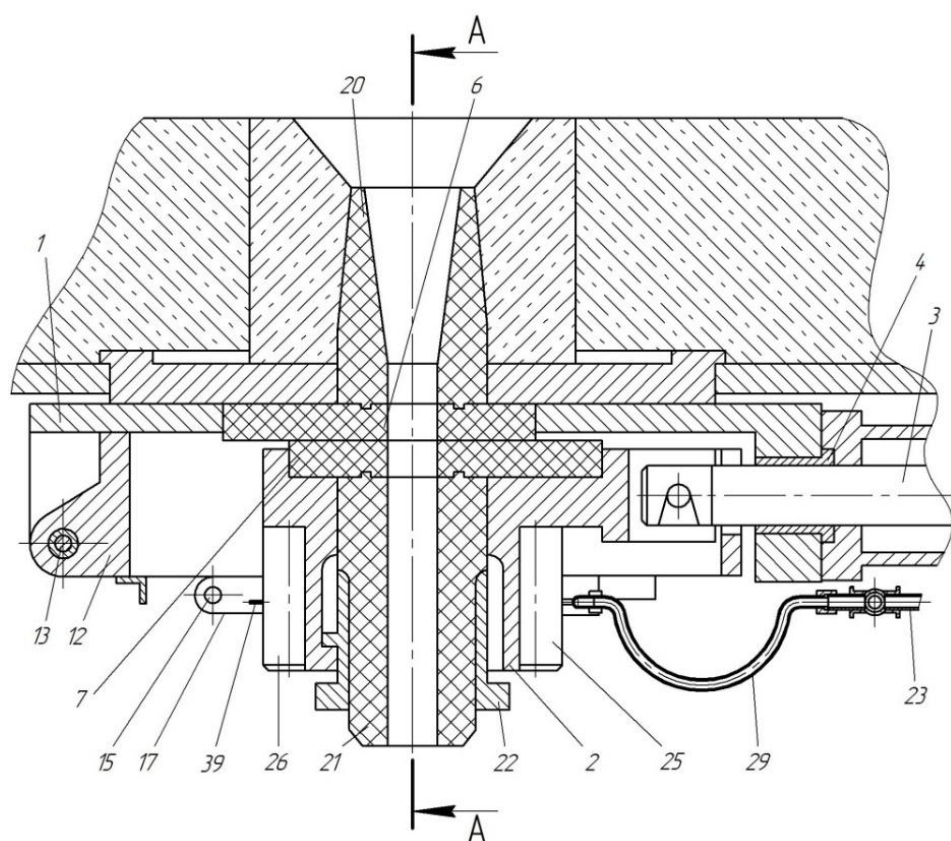


Рисунок 3.12 – Продольный разрез предлагаемого затвора

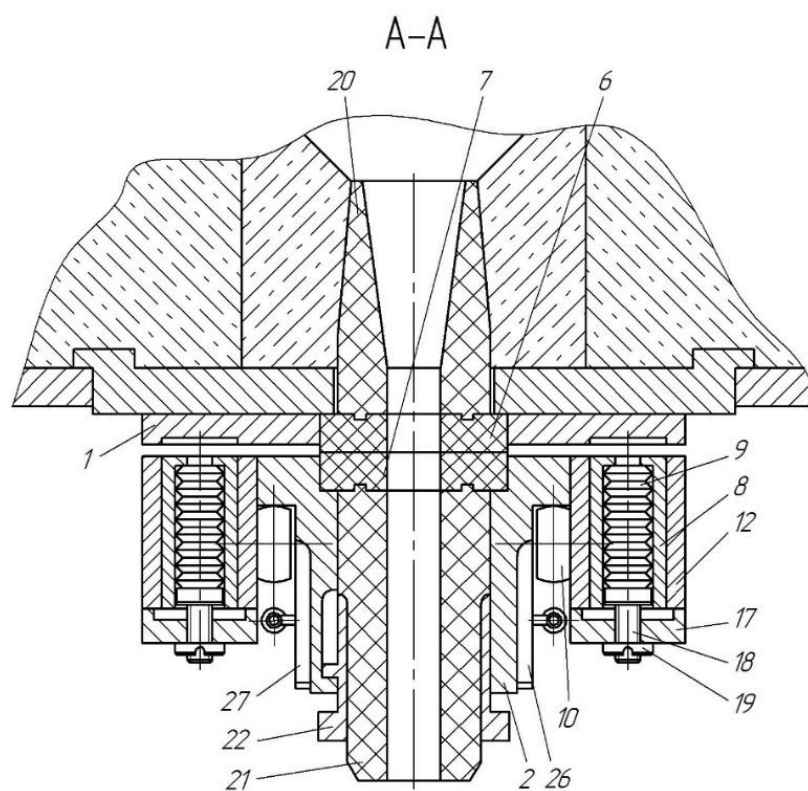


Рисунок 3.13 – Поперечный разрез затвора

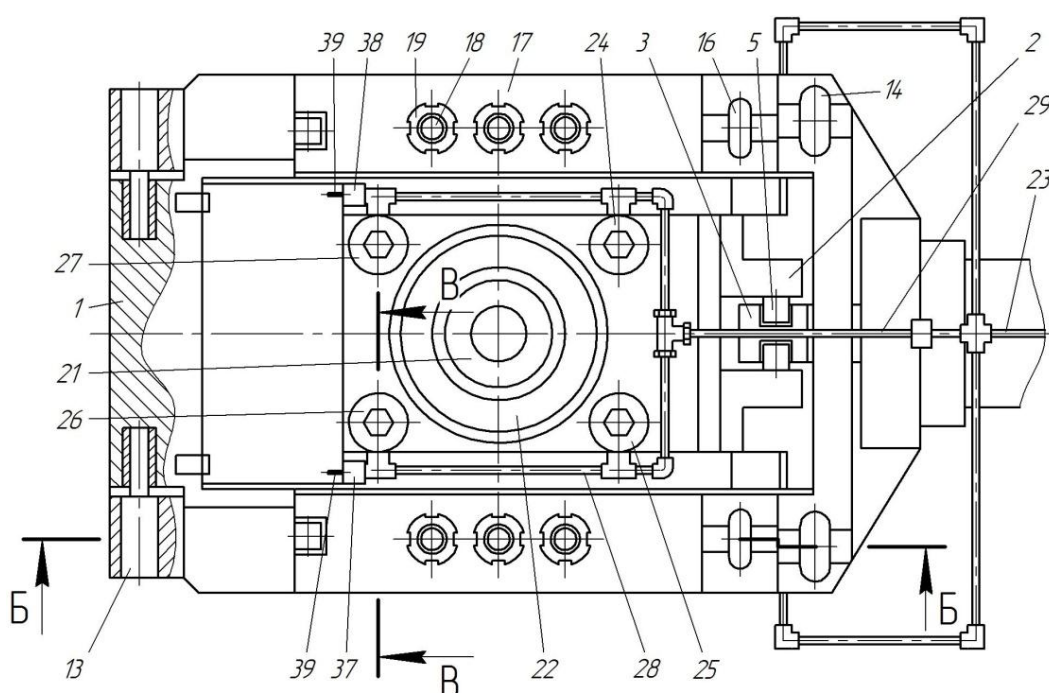


Рисунок 3.14 – Вид затвора снизу

Устройство содержит монтажную раму 1, каретку 2, для перемещения которой служит механизм, включающий толкатель 3, размещенный во втулке 4 монтажной рамы 1 и подвижно связанный передним концом с зацепами 5 каретки 2, а задним – со штоком силового гидроцилиндра (условно не показан).

В посадочных местах монтажной рамы 1 и каретки 2 соответственно размещены неподвижная и подвижная огнеупорные плиты 6, 7 с отверстиями, прижатые одна к другой двумя пружинными блоками, в корпусах 8 которых установлены по три упругих элемента в виде тарельчатых пружин 9 (рисунок 3.15), развивающих при сжатии расчетное усилие, передаваемое каретке 2 через два ролика 10, закрепленных с возможностью вращения на горизонтальных осях 11, жестко зафиксированных в корпусе 8 пружинного блока (рисунок 3.16).

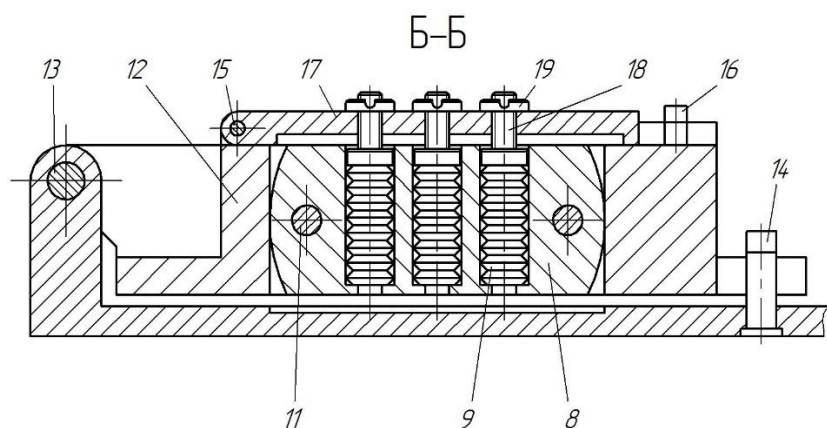


Рисунок 3.15 – Схема размещения пружинных блоков

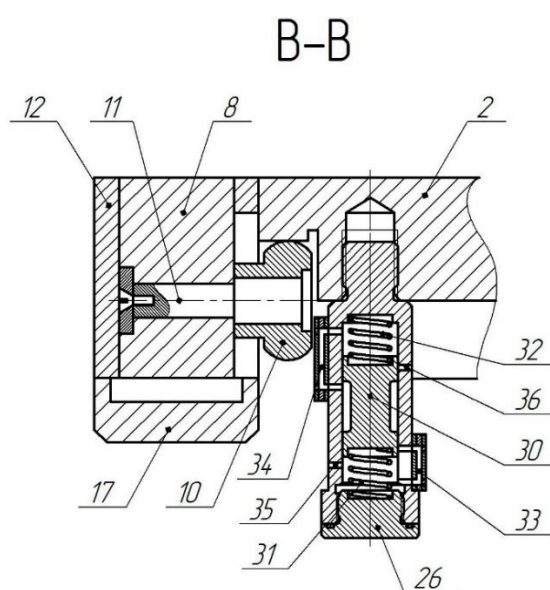


Рисунок 3.16 – Схема опорного узла подвижной обоймы

При этом корпуса 8 пружинных блоков размещены с возможностью относительного поворота на угол в несколько градусов в проемах несущих балок 12, посредством шарниров 13 и замковых элементов 14, связанных с монтажной рамой 1.

На каждой из двух несущих балок 12 посредством шарнира 15 и замкового элемента 16 прикреплен откидная планка 17, удерживающая три регулировочных винта 18, снабженных гайками 19 и контактирующих своей головной частью с тарельчатыми пружинами 9 пружинных блоков.

Сверху к неподвижной огнеупорной плите 6 соосно с ее отверстием примкнут ковшевой стакан 20 с разливочным каналом, а снизу к подвижной огнеупорной плите 7 соосно с ее отверстием примкнут стакан-коллектор 21 с разливочным каналом, прижимаемый к ней с помощью байонетной втулки 22, установленной в профилированном пазу, выполненном в нижней части каретки 2. Каждый из пружинных блоков имеет систему воздушного охлаждения его тарельчатых пружин 9 для устранения потери ими упругих свойств, включающую трубопровод 23 для подачи под избыточным давлением охлаждающего воздуха.

Система предотвращения зарастания разливочного канала ковша состоит из четырех вертикально расположенных пневматических вибраторов 24 – 27, жестко закрепленных с помощью резьбового соединения вертикально снизу на каретке 2 попарно противоположно на одинаковом расстоянии от оси разливочного канала стакана-коллектора 21 и взаимосвязанных своими рабочими полостями посредством трубопровода 28, подключенного с помощью гибкого металлического рукава 29 к трубопроводу 23 системы воздушного охлаждения пружинных блоков.

Каждый из четырех пневматических вибраторов конструктивно выполнен в виде пустотелого цилиндрического корпуса, внутри которого размещен с возможностью относительного продольного перемещения сдвоенный поршень 30, удерживаемый в среднем положении частично сжатыми пружинами 31 и 32 (рисунок 3.17).

В стенке пустотелого цилиндрического корпуса имеются два перепускных канала 33 и 34, а также два выпускных отверстия 35 и 36. На входе двух пневматических вибраторов 26 и 27 установлены концевые выключатели 37 и 38, каждый из которых имеет плунжер 39 с упорным диском и возвратную пружину 40 (рисунок 3.18).

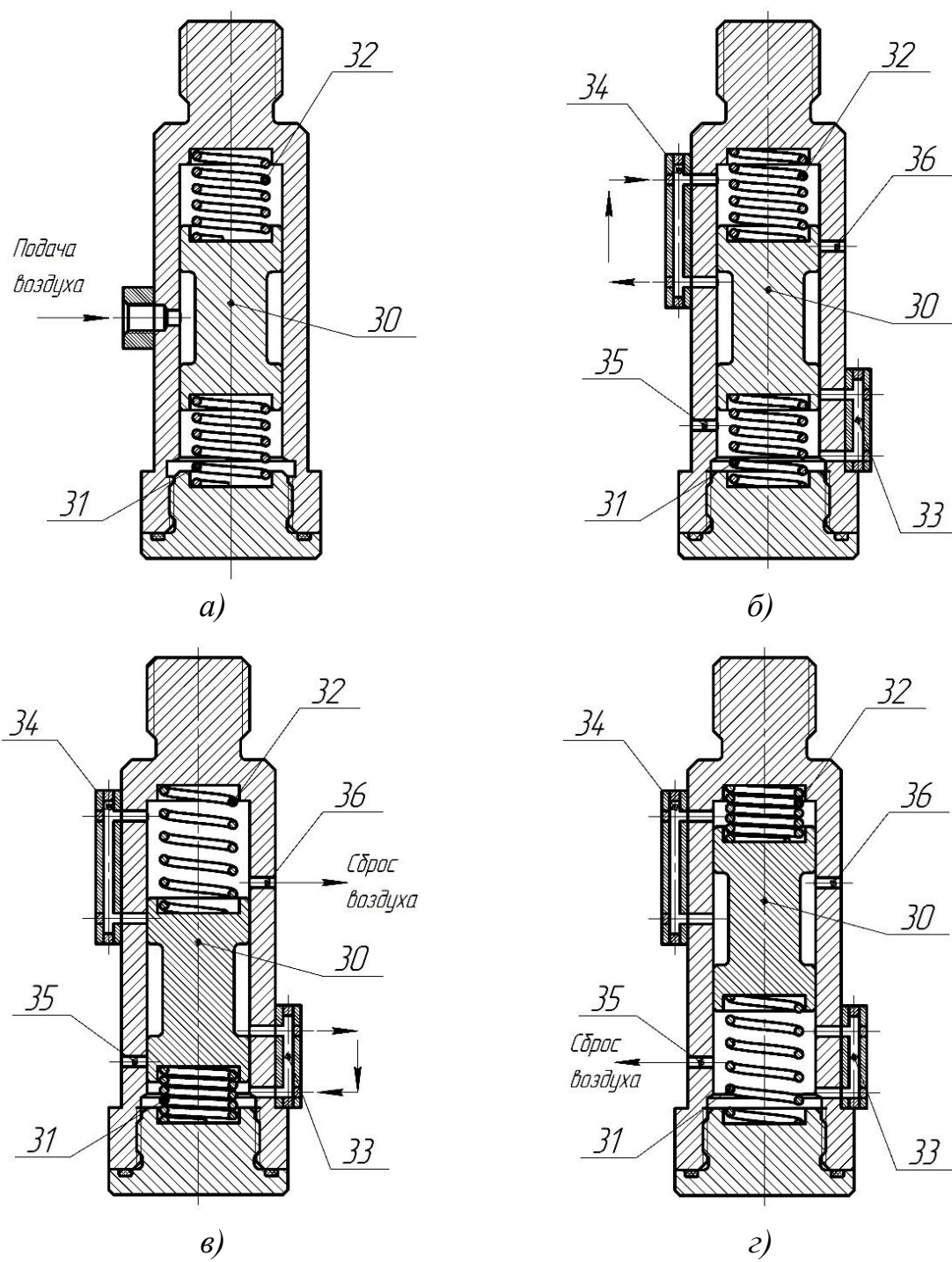


Рисунок 3.17 – Положения элементов пневматического вибратора при работе

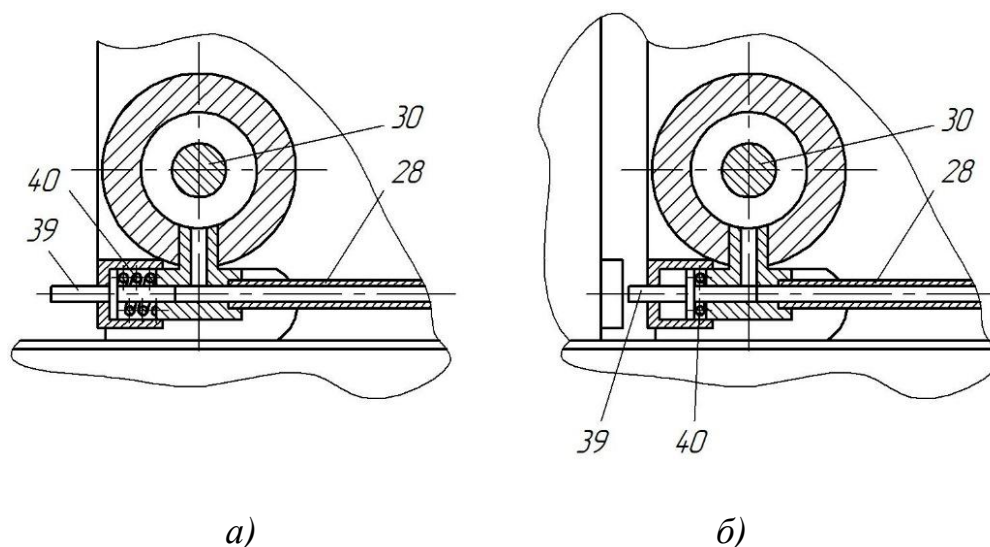


Рисунок 3.18 – Конструктивное исполнение концевых выключателей

Ковшовой шиберный затвор функционирует следующим образом. Перед началом его эксплуатации корпусные детали устанавливают огнеупорные элементы и обеспечивают настройку требуемого усилия их прижатия.

Предварительно сталеразливочный ковш с помощью цехового крана располагают горизонтально и раскрывают закрепленный на его днище шиберный затвор. Для этого его замковые элементы 14 переводят в положение, позволяющее осуществить поворот несущих балок 12 на шарнирах 13 вместе с кареткой 2 относительно монтажной рамы 1.

После размещения и фиксации в посадочных местах монтажной рамы 1 и каретки 2 соответственно неподвижной и подвижной огнеупорных плит 6, 7, несущие балки 12 поворачивают в обратном направлении на шарнирах 13 и с помощью замковых элементов 14 соединяют с монтажной рамой 1.

При этом обеспечивают центрирование зацепов 5 каретки 2 в прорезях переднего конца толкателя 3. Затем поочередно замковые элементы 16 переводят в положение, позволяющее повернуть на шарнирах 15 откидные планки 17.

В отверстия корпусов 8 пружинных блоков помещают тарельчатые пружины 9 и откидные планки 17 поворачивают на шарнирах 15 в обратном направлении и с помощью замковых элементов 16 фиксируют на несущих балках 12. Далее

вращением регулировочных винтов 18 и фиксацией их гайками 19 относительно откидной планки 17 обеспечивают заданное усилие сжатия тарельчатых пружин 9, при котором они создают требуемую суммарную силу, передаваемую от корпусов 8 пружинных блоков через закрепленные на осях 11 ролики 10 и контактирующей с ними каретки 2 огнеупорным плитам 6 и 7.

После этого байонетную втулку 22 с размещенным в ней стаканом-коллектором 21 заводят в профильный паз в нижней части каретки 2 и поворачивают до упора стакана-коллектора 21 в подвижную огнеупорную плиту 7.

В резьбовые отверстия в каретке 2 вкручивают хвостовики пневматических вибраторов 24–27 и их рабочие полости связывают между собой посредством трубопровода 28, который с помощью гибкого металлического рукава 29 подключают к трубопроводу 23 системы воздушного охлаждения пружинных блоков.

Подготовленный к работе ковшовой шиберный затвор с помощью приводного гидроцилиндра закрывают, а ковш переводят в вертикальное положение и после заполнения разливочного канала ковшового стакана 20 стартовой смесью подают под плавильный агрегат для приема жидкой стали. Заполненный жидкой сталью ковш краном переносят к месту разливки, где трубопровод 23 системы воздушного охлаждения пружинных блоков гибким шлангом подключают к цеховой магистрали сжатого воздуха.

Для начала разливки включают силовой гидроцилиндр, который, воздействуя на толкатель 3, сообщает ему линейное перемещение во втулке 4 относительно монтажной рамы 1. Благодаря зацепам 5 вместе с толкателем 3 в том же направлении по роликам 10, вращающимся на осях 11 относительно корпусов пружинных блоков 8, будет перемещаться каретка 2 с размещенной в ней подвижной плитой 7 относительно неподвижной огнеупорной плиты 6, зафиксированной в монтажной раме 1.

В момент совмещения отверстий обеих плит из разливочного канала ковшового стакана 20 высыпается стартовая смесь и начинается истечение жидкой стали. С началом разливки включают подачу под избыточным давлением воздуха

по трубопроводу 23 к пружинным блокам для исключения перегрева и потери упругих свойств их тарельчатыми пружинами 9. Одновременно с этим часть подаваемого сжатого воздуха по гибкому металлическому рукаву 29 и трубопроводу 28 поступает в рабочие полости четырех пневматических вибраторов 24 – 27, симметрично расположенных относительно стакана-коллектора 21.

При попадании в среднюю часть рабочей полости (рисунок 3.17а, 3.17б) сжатый воздух по перепускному каналу 33 поступает в нижнюю полость под сдвоенный поршень 30, который под действием давления перемещается вверх, сжимая пружину 32 и вытесняя через открытое выпускное отверстие 36 в атмосферу воздух из полости, находящейся над ним.

Вблизи своего крайнего верхнего положения сдвоенным поршнем 30 перекрывается выпускное отверстие 36 и перепускной канал 33 и одновременно с этим открывается выпускное отверстие 35 и перепускной канал 34 (рисунок 3.17в), в результате чего происходит реверсирование движения самого поршня.

Под действием давления на верхнюю часть поршня он начнет перемещение вниз, сжимая пружину 31 и вытесняя воздух через выпускное отверстие 35 в атмосферу из нижней части рабочей полости. Достигнув своего крайнего нижнего положения поршень открывает выпускное отверстие 36 и перепускной канал 33 (рисунок 3.17г), т.е. начнет совершать колебания, частота и амплитуда которых зависит от давления воздуха и жесткости пружин 31 и 32.

Установившийся колебательный процесс вызывает вертикально направленное вибрационное воздействие на огнеупорные плиты 6, 7 шибера затвора и ковшовый стакан 20 вдоль их разливочных каналов, которое способствует непрерывному разрушению связей между частицами отложений, формирующихся на стенках разливочного канала ковшевого стакана.

При перекрытии разливочного канала ковшевого стакана, когда каретка 2 с помощью приводного гидроцилиндра будет перемещаться в крайнее левое положение, концевые выключатели 37 и 38 двух пневматических вибраторов будут автоматически переведены из открытого положения (рисунок 3.18а) в закрытое (рисунок 3.18б).

Это достигается тем, что их плунжеры 39 с упорными дисками при контакте с корпусом монтажной рамы 1 перемещаются вправо, сжав возвратные пружины 40, и перекрывают поступление сжатого воздуха в полости пневматических вибраторов 26 и 27, которые остановятся.

Два других пневматических вибратора 24 и 25, находящиеся вблизи перекрытого разливочного канала, будут продолжать работать.

В момент повторного открывания канала ковшевого стакана, когда каретка 2 начнет перемещение в обратном направлении, возвратные пружины 40, воздействуя на упорные диски плунжеров 39, сдвигают их влево и открывают каналы для подачи сжатого воздуха в полости пневматических вибраторов 26 и 27 для начала их работы.

Таким образом, использование предлагаемого технического решения по сравнению с ближайшими аналогами позволяет повысить эффективность функционирования ковшевого шиберного затвора за счет обеспечения вертикально направленного вибрационного воздействия на его огнеупорные элементы, способствующего непрерывному механическому разрушению связей между частицами отложений, формирующихся на стенках разливочного канала, что приводит к снижению интенсивности его зарастания.

Кроме того, при эксплуатации данного затвора устраняется необходимость в применении дополнительных энергоносителей и трубопроводов для их подачи к используемой системе, что упрощает конструкцию и эксплуатацию разливочного устройства в целом. Предложенное техническое решение защищено патентом Российской Федерации RU 2751196 C2 [110], информация о котором приведена в Приложении 7.

3.5 Обоснование энергосиловых параметров работы вибрационной системы ковшового затвора

Эффективное применение системы направленного вибрационного воздействия для снижения интенсивности образования отложений на стенках сталевыпускного канала с его сопутствующим зарастанием возможно лишь при рационально подобранных рабочих режимах и параметрах работы подобной системы.

Параметры вибрационного воздействия, достаточного для препятствования образованию устойчивых связей между элементами отложений и стенками сталевыпускного канала, можно назначить, опираясь на опыт применения вибрационных воздействий для управления формированием кристаллической структуры отливок из разных металлов и сплавов.

Руководствуясь данными [111–113], можно сделать вывод, что существенные изменения за счет разрушения фронта кристаллизации под действием приложенных вибрационных сил происходят при значениях, приведенных в таблице 3.5. При этом оптимальная скорость движения потока расплава относительно образующихся дендритов, приходится на диапазон 0,15–0,2 м/с.

Таблица 3.5 – Рекомендуемые значения параметров вибрационного воздействия на кристаллизующийся металл

Материал	Значение параметров	
	Частота, Гц	Амплитуда, мм
Медь	18 – 20	1,4 – 1,6
Бронза	24 – 26	0,3 – 0,5
Сталь	35 – 40	1 – 2,5

При вибрационном воздействии интенсивность распространяющейся волны численно равна энергии, переносимой ею за единицу времени сквозь единицу

площади поверхности, нормальной к направлению волнового движения. Эту зависимость выразим формулой:

$$I = \frac{1}{2} \rho V \omega^2 A^2 \quad (3.15)$$

где ρ – плотность материала детали огнеупорного комплекта, которая воспринимает вибрационную нагрузку;

V – фазовая скорость распространения продольной волны вдоль вертикальной оси разливочного стакана;

ω – циклическая частота вибрационных колебаний;

A – амплитуда вибрационных колебаний.

Фазовая скорость распространения продольной волны направленной вибрации при этом будет равна:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.16)$$

где E – модуль Юнга, характеризующий упругие свойства материала огнеупора.

Для магнезитового разливочного стакана, рассматриваемого в данном исследовании, модуль Юнга равен $4 \cdot 10^{10}$ Н/м², а плотность – 3000 кг/м³.

Ранее было установлено, что интенсивность вибрационного воздействия по мере удаления от точки приложения (места установки вибратора) ослабевает по экспоненциальному закону. Это происходит из-за энергопоглощения вибраций материалом огнеупорного комплекта. Для расчета линейного коэффициента поглощения упругой волны в отношении каждого отдельного изделия из огнеупорного комплекта при фиксированной частоте колебаний воспользуемся формулой:

$$\alpha = \frac{\ln K}{h} \quad (3.17)$$

где K – коэффициент отражения по амплитуде сигнала при прохождении волны сквозь слой материала (детали);

h – толщина слоя материала (детали).

Коэффициент отражения вибрационного сигнала можно определить как отношение значения виброускорения на заданной частоте вибрационных колебаний, возбуждаемых пневмовибратором, установленным на нижней поверхности огнеупорного элемента, и значения виброускорения в контрольной точке на верхней поверхности огнеупора.

$$K = \frac{a_{\text{Н}}}{a_{\text{В}}} \quad (3.18)$$

Чтобы получить достоверную информацию о значениях коэффициента K , нужно предварительно определить значение коэффициента затухания вибросигнала для каждого из элементов огнеупорного комплекта ковшевого шиберного затвора и образуемых ими стыков (поверхностей раздела), методика определения которого описана в разделе 4.2. Для снятия данных использовали анализатор вибрации модели 795M.

Интенсивность вибрационной волны $I_{\text{КС}}$, необходимую для эффективного воздействия на ковшевой стакан в процессе разлива, рассчитаем по формуле 3.15 с учетом рекомендуемых значений амплитуды и частоты колебаний из данных таблицы 3.5, а также фазовой скорости распространения продольной волны и известных плотности и модуле Юнга для материала огнеупоров.

В соответствии с общей конструктивной схемой шиберного затвора, оснащенного системой вибрационного воздействия из четыре пневматических вибраторов, эти устройства закреплены под его нижней огнеупорной плитой. В

этом случае интенсивность упругой волны, распространяющейся от стартовой точки вверх, параллельно оси сталеразливочного канала, будет равна:

$$I_0 = \frac{I_{\text{кс}}}{e^{-2\alpha_1 x_1} + 2e^{-2\alpha_2 x_2}} \quad (3.19)$$

где α_1 – линейный коэффициент поглощения упругой волны материалом ковшевого стакана;

x_1 – расстояние от средней части ковшевого стакана до его нижней торцевой поверхности;

α_2 – линейный коэффициент поглощения упругой волны материалом огнеупорной плиты, установленной следом за стаканом;

x_2 – толщина огнеупорной плиты.

Расчетное значение I_0 послужит основой для расчета конструктивных и энергосиловых параметров вибрационной системы для ковшевого шиберного затвора. Такая модернизация может включать от 2 до 4 пневматических вибраторов ударного действия поршневого типа. Их размещают вокруг сталеразливочного канала с одинаковым шагом, максимально равномерно, закрепляя на металлической обойме нижней плиты огнеупорного комплекта.

При этом основной задачей будет определение динамической осадки и статической нагрузки, эквивалентной ударному воздействию поршня вибратора на его пружины. Конструктивные параметры и упругие свойства последних деталей должны обеспечить возбуждение вертикально направленных колебаний, сообщаемых огнеупорному комплекту шиберного затвора.

Расчет на ударную нагрузку реальных технических систем, находящихся под воздействием направленной вибрации, сопряжен со значительными трудностями. Это связано с наличием множества контактных упругих и пластических деформаций. Необходимость учитывать их в инженерных расчетах существенно усложняет поставленную задачу. Одним из выходов в сложившейся ситуации будет вариант ограничиться лишь энергетическим методом расчета [114].

Рассчитаем мощность, необходимую для возбуждения вертикально направленных колебаний, достаточных, чтобы эффективно препятствовать закреплению частиц на стенках канала ковшового стакана:

$$N_k = I_0 S \quad (3.20)$$

где S – площадь поперечного сечения ковшового стакана.

Выполним расчет величины необходимой мощности вибратора применительно к шиберному затвору, установленному на сталеразливочном ковше определенной вместимости. Полученные данные сводим в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Данные для расчета необходимой мощности вибратора, действие которого препятствует закреплению частиц на стенках огнеупорного стакана

Вместимость ковша, т	Масса ковшевого затвора, кг	Требуемые значения вибрационного воздействия		Полученные значения используемых величин									
		Частота ω , Гц	Амплитуда A , мм	K_1	α_1 , м ⁻¹	x_1 , м	K_2	α_2 , м ⁻¹	x_2 , м	S , м ²	$\frac{I_{КС}, \text{Дж}}{\text{с м}^2}$	$\frac{I_0, \text{Дж}}{\text{с м}^2}$	N_k , Вт
100	180	40	2	2,3	10,4	0,08	2	23,1	0,03	0,025	34560	50121	1250
150	220			2,8	10,3	0,10	2	23,1	0,03	0,031		55067	1700
200	250			3,4	12,2	0,10	2,4	25	0,035	0,031		79502	2460
250	300			3,7	8,7	0,15	2,4	25	0,035	0,031		82074	2540
300	350			4,1	7,8	0,18	2,6	23,9	0,04	0,031		97107	3010

Следует отметить, что рекомендуемые значения вибраций соответственно таблице 3.5 для стали составляют 35–40 Гц для частоты и 1–2,5 мм для амплитуды. Выбор значений в 40 Гц и 2 мм неслучаен. Оба этих параметра оказывают определяющее влияние на интенсивность распространяющейся волны, однако

выбор повышенной частоты обеспечивает максимальное количество ударных циклов, реализуемых в единицу времени, что снижает вероятность ускоренного теплообмена между пограничным слоем потока жидкой стали и стенкой огнеупора, который приводит к дендритному образованию отложений. При частоте 40 Гц обеспечивается период цикла вибровоздействия 0,025 с против 0,028 с при частоте 35 Гц. Амплитуда же 2 мм обеспечивает существенное перемещение пограничного слоя жидкой стали под влиянием вибраций. При этом соразмерный выбор максимально рекомендуемой амплитуды 2,5 мм вместо 2 мм повлечет за собой увеличение на 56,25% мощности, необходимой для возбуждения вертикально направленных колебаний, эффективно препятствующих закреплению частиц на стенках канала, что весьма существенно. Соответственно, можно рассматривать сочетание параметров 40 Гц и 2 мм рекомендуемым при проектировании вибрационных систем для ковшовых шиберных затворов. Однако диапазон амплитуды от 2 до 2,5 мм следует считать рекомендуемым при отсутствии ограничений на мощность вибрационной системы.

При этом само сочетание частоты 40 Гц и амплитуды 2 мм, в соответствии с приведенными в разделе 3.1 зависимостями, обеспечивает виброускорение $126,2 \text{ м/с}^2$, при котором силы, способствующие отрыву кристаллизующихся частиц радиусом 0,5 мм от стенок сталевыпускного канала, увеличиваются в 1,8–2,1 раза. Повышение амплитуды до 2,5 мм обеспечит виброускорение $157,8 \text{ м/с}^2$ и увеличение сил в 2,1–2,4 раза при возрастании потребляемой мощности в 1,5 раза. Если же рассматривать нижние пределы рекомендуемых таблицей 3.5 значений, то при сочетании частоты 35 Гц и амплитуды 1 мм будет обеспечено виброускорение всего $48,3 \text{ м/с}^2$, при сочетании частоты 40 Гц и амплитуды 1 мм – $63,1 \text{ м/с}^2$, что в обоих случаях выходит за пределы упомянутого в разделе 3.1 рекомендуемого диапазона 100–160 м/с^2 .

Суммарную мощность, которую развивает вибрационная система, установленная на шиберном затворе, можно также выразить через параметры работы энергоносителей:

$$N_{\text{вс}} = PV_{\text{с}}n \quad (3.21)$$

где P – давление воздуха в пневматической сети, которую используют для эффективного охлаждения корпусной части шиберного затвора в целом и пружинных силовых элементов в частности в процессе разливки, Па;

$V_{\text{с}}$ – расход воздуха, затрачиваемый на работу одного вибратора в единицу времени, м³/с;

n – общее количество вибраторов в системе.

Давление сжатого воздуха в пневмосети

$$P = \frac{F_{\text{д}}}{S_{\text{п}}} \quad (3.22)$$

где $F_{\text{д}}$ – сила динамического воздействия поршня вибратора, Н;

$S_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения поршня, м².

Площадь поперечного сечения поршня

$$S_{\text{п}} = \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4} \quad (3.23)$$

где $d_{\text{п}}$ – диаметр поршня, мм.

Сила динамического воздействия вибратора

$$F_{\text{д}} = c\delta_{\text{дп}} \quad (3.24)$$

где c – коэффициент жесткости пружины, Н/мм;

$\delta_{\text{дп}}$ – динамическая осадка пружины, мм.

Суммарная вынуждающая сила, необходимая для сообщения ковшовому затвору вибрационных колебаний с заданной амплитудой и частотой

$$F_{\text{в}} = m_{\text{з}}A\omega^2 \quad (3.25)$$

где m_3 – масса ковшового затвора, кг.

Поскольку для возбуждения суммарной вынуждающей силы необходима работа пневматических вибраторов, получим зависимость

$$F_d = F_v$$

$$n \frac{\pi d_{\pi}^2}{4} P = m_3 A \omega^2$$

Отсюда рассчитаем диаметр поршня вибратора, работа которого будет достаточна для возбуждения необходимого вибрационного воздействия:

$$d_{\pi} = \sqrt{\frac{4m_3 A \omega^2}{n \pi P}} \quad (3.26)$$

Исходя из приведенных выше зависимостей рассчитаем расход воздуха, необходимый для эффективной работы вибратора:

$$V_c = 2\delta_{\text{дп}} \frac{\pi d_{\pi}^2}{4} \omega \quad (3.27)$$

Суммарный расход воздуха на работу всего комплекта вибраторов, установленных на ковшовом затворе, составит:

$$V_o = V_c n \quad (3.28)$$

Соответственно мощность, развиваемая комплектом вибраторов, составит:

$$N_{\text{вс}} = P V_c n = \frac{4c\delta_{\text{дп}}}{\pi d_{\pi}^2} \cdot \frac{2\delta_{\text{дп}} \pi d_{\pi}^2 \omega}{4} \cdot n$$

$$N_{\text{вс}} = 2\delta_{\text{дп}}^2 c \omega n \quad (3.29)$$

Приравняв мощность вибрационной системы к мощности, необходимой для возбуждения вертикально направленных колебаний, достаточных, чтобы эффективно препятствовать закреплению частиц на стенках канала ковшового стакана, получим:

$$N_{\text{вс}} = N_{\text{к}}$$

$$2\delta_{\text{дп}}^2 c \omega n = I_0 S$$

Исходя из этого необходимая жесткость пружин, установленных в полости вибратора с двух сторон от подвижного поршня

$$c = \frac{I_0 S}{2\delta_{\text{дп}}^2 \omega n} \quad (3.30)$$

Произведем расчеты для всех ранее принятых вариантов сталеразливочных ковшей и сведем полученные результаты в таблицу 3.7.

Исходя из данных таблицы 3.7, можно сделать вывод, что для покрытия потребностей модернизации шиберных затворов практически для всего спектра сталеразливочных ковшей (от 100 до 300 тонн вместимостью) будет достаточно вибратора одной конструкции, а требуемые энергосиловые параметры будут достижимы лишь сменой двух пружин, установленных в полости корпуса. Для полного охвата потребуется изготовить комплекты пружин с жесткостью 8, 9 и 10 Н/мм, для чего можно использовать как изменение геометрических характеристик этих элементов (шаг, число витков, диаметр сечения проволоки), так и отбор сталей с разными упругими характеристиками.

Таблица 3.7 – Расчетные значения параметров пневматических поршневых вибраторов для ковшовых затворов сталеразливочных ковшей различной вместимости

Вместимость ковша, т	Требуемое кол-во вибраторов п, шт.	Параметры подаваемого воздуха			Параметры пневматического вибратора			
		P , МПа	V_c , м ³ /с	V_0 , м ³ /с	F_v , Н	Диаметр поршня вибратора d_p , мм	Динамическая осадка пружины δ_{dp} , мм	Жесткость пружины c , Н/мм
100	2	0,4	0,0015	0,003	576	30	30	8
150	3	0,4	0,0013	0,004	704	30	30	8
200	3	0,4	0,002	0,006	800	30	30	9
250	4	0,4	0,0015	0,006	960	30	30	9
300	4	0,5	0,0015	0,006	1120	30	30	10

Следует отметить, что при сборке вибратора нет необходимости в использовании жаростойких или жаропрочных материалов, которым отдают предпочтение при проектировании пружинных узлов для поджима огнеупорных плит (витые, тарельчатые, газовые пружины). Пневматический вибратор постоянно охлаждается подачей сжатого воздуха или, в случае с вибраторами, установленными на манипуляторе для замены огнеупорной защитной трубы, подачей инертного газа (аргона).

Предложенная выше методика расчета энергосиловых параметров вибрационной системы позволяет в полной мере обосновать рабочие параметры как отдельно взятого вибратора, так и всего комплекта. Эта методика была впервые использована при проектном расчете и дальнейшем конструировании промышленных образцов модернизированного шибберного затвора для металлургических ковшей. Подробный пример расчета приведен в Приложении 8.

3.6 Выводы

1. При вибрационном воздействии на разливочный узел ковша с виброускорением $100\text{--}160\text{ м/с}^2$ значение сил, отрывающих частицы радиусом 0,5 мм от стенки выпускного канала, увеличивается в 1,6–2,5 раза. Таким образом создаются условия, способствующие снижению интенсивности процесса его затягивания, поскольку частицы не задерживаются на поверхности выпускного канала, а следовательно – не происходит их накопление с постепенным зарастанием полости.

2. Для возбуждения колебаний относительно огнеупорного комплекта шиберного затвора в наибольшей мере подходит вибратор, работающий от сжатого воздуха. Такое устройство в полной мере соответствует таким предъявляемым требованиям, как компактность, безопасность и удобство в эксплуатации, а также требует применения энергоносителя, уже используемого при эксплуатации шиберного затвора (для охлаждения пружинных элементов).

3. Предложенная конструкция шиберного затвора, снабженного пневматическими вибраторами направленного действия для возбуждения колебаний, способствующих механическому разрушению связей между частицами неметаллических включений и поверхностью стенок сталевыпускного канала, должна обеспечить снижение интенсивности его зарастания. При этом в качестве энергоносителя для пневматических вибраторов предполагается использовать часть сжатого воздуха, подводимого к ковшовому затвору с целью охлаждения пружин, прижимающих его огнеупорные плиты.

4. В соответствии с предложенной методикой расчета энергосиловых и конструктивных параметров вибрационной системы, при которых снижается интенсивность зарастания сталевыпускного канала, рекомендуемые значения частоты вибровоздействия 40 Гц и амплитуды от 2 до 2,5 мм назначаются с учетом конструктивных особенностей ковшового шиберного затвора и изделий его огнеупорного комплекта.

4 РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО КОВШОВОГО ЗАТВОРА, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЕГО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУТЕЙ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Ключевой инженерной задачей при выявлении очевидной эффективности применения вибрационного воздействия для уменьшения степени зарастания сталевыпускного канала огнеупорного комплекта шиберного затвора становится разработка конструктивного решения, призванного реализовать данное вибрационное воздействие реальных промышленных условиях, будь то металлургическое или литейное производство.

Для решения данной задачи следует получить максимум информации о характере распространения вибрационного сигнала в теле огнеупорного комплекта, в том числе – с учетом особенностей искажения сигнала при прохождении границы раздела на соприкосновении торцов двух разных деталей. Кроме того, следует рассмотреть не только вариант размещения пневматических вибраторов на корпусной части шиберного затвора, но и на элементах манипулятора, предназначенного для смены огнеупорной трубы, защищающей металл от вторичного окисления при разливке.

Отдельного внимания заслуживает поиск надежного метода аналитического обоснования энергосиловых параметров работы вибрационной системы, как фундаментальной основы под проектирование вибратора для комплектации конкретного шиберного затвора.

4.1 Экспериментальная проверка срабатывания катапульты на опытном образце ковшового затвора

Проверку корректности полученных данных выполняем посредством проведения лабораторного эксперимента. При этом задействуем опытный образец ковшевого шиберного затвора, который предназначен для проведения разливки из ковша вместимостью 100 тонн. Образец затвора, оснащенный катапультой, показан на рисунке 4.1.

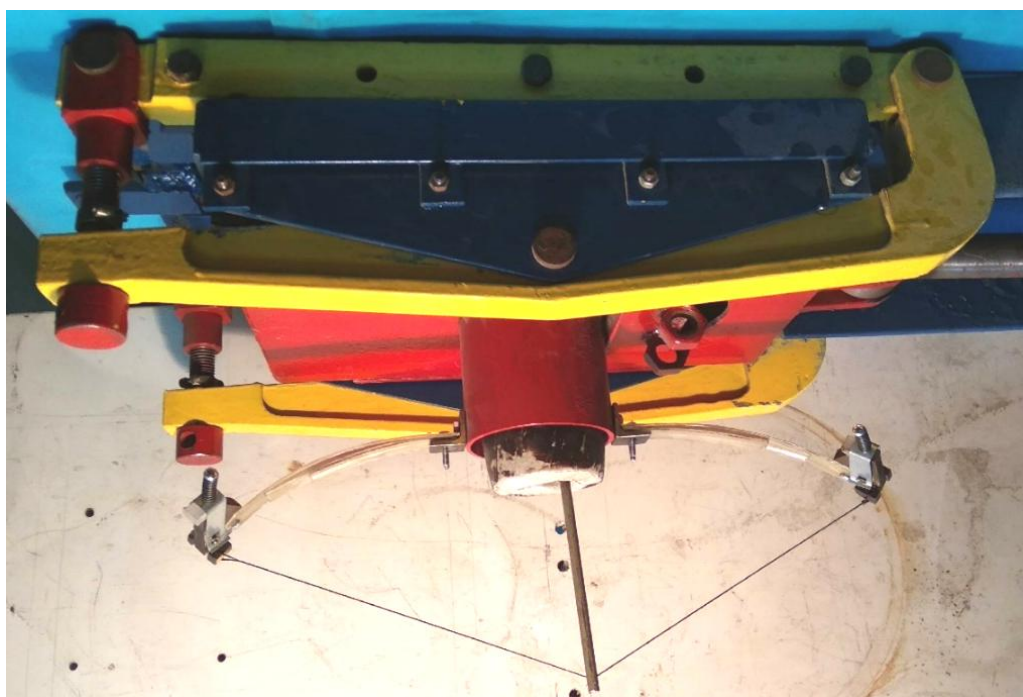


Рисунок 4.1 – Опытный образец ковшового затвора, снабженный катапультой для разрушения спекшейся корки

Задачей эксперимента была симуляция процесса разрушения корки на входе в канал ковшевого стакана при известных прочностных характеристиках образовавшейся перемычки. Вариационное разнообразие обеспечивает набор плоских перемычек толщиной 1, 2 и 3 мм из свинца и оргстекла. Подобный выбор материалов (металл и неметалл) позволил оценить характер разрушения спекшейся

корки, когда структура этого элемента признана пластичной или хрупкой. Такое разделение дает возможность оценить различия в работе катапульты в отношении вязкой и хрупкой спекшейся корки, поскольку исследовать точные характеристики корки в условиях реальной металлургической разливки не представляется возможным.

Свинец в твердом состоянии демонстрирует реологические свойства, подобные стали сразу же после образования ее кристаллической структуры (при температуре ниже равновесной) [100]. С учетом этого свинцовый имитатор перемычки будет соответствовать условиям возникновения спекшейся металлической корки на поверхности стартовой смеси во время заполнения ковша жидким металлом. Применение же для изготовления имитатора оргстекла позволяет воссоздать условия, когда корка имеет пористую мелкоячеистую структуру на основе непроницаемого слоя из спекшегося огнеупорного порошка с точечными связями между соседними песчинками. Применение оргстекла для моделирования такого барьера позволяет в полной мере воссоздать условия хрупкого мгновенного разрушения при ударном воздействии. Предел прочности на растяжение оргстекла составляет 50–120 МПа, для огнеупорного порошка, составляющего стартовую смесь, этот показатель приходится на диапазон 50–200 МПа. С учетом того, что в эксперименте рассматривается случай именно повышенной хрупкости корки, выбор модельного материала аргументирован.

Использованные в эксперименте плоские перемычки представлены на рисунке 4.2.

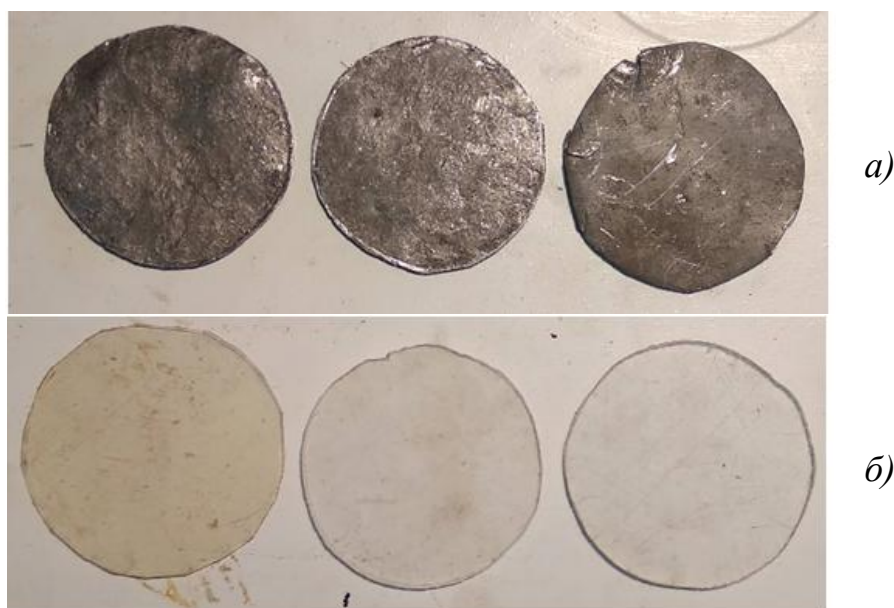


Рисунок 4.2 – Имитаторы перемычки, изготовленные из свинца (а)
и органического стекла (б)

Узел, позволяющий максимально точно воссоздать условия разливочного канала, заполненного сыпучей стартовой смесью и закрытого герметичной спекшейся коркой, представлен на рисунке 4.3.

В процессе эксперимента каждый образец перемычки 1 был установлен поверх тонкостенной металлической гильзы 3 с упором в верхний торец. Сверху перемычку фиксировали крышкой 2, затягиваемой по резьбе. Внутренняя полость гильзы была заполнена сухим сыпучим материалом 5, по своим характеристикам близким к стартовой смеси. Гильза была установлена внутри ковшового стакана 4 с опорой на торцовую поверхность верхней шиберной плиты огнеупорного комплекта 6. Нижняя шиберная плита 7 служит импровизированной границей для полости, заполненной сыпучим материалом.

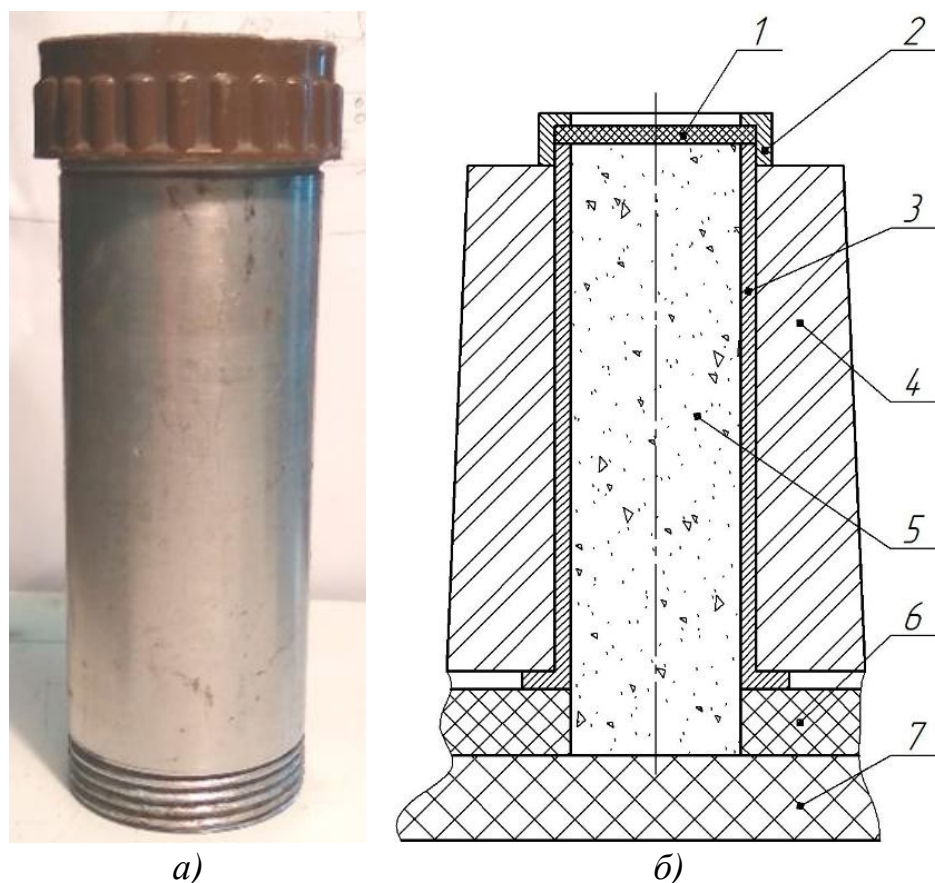


Рисунок 4.3 – Общий вид узла в сборе (а) и схема с указанием компонентов сборки (б)

После срабатывания катапульты перемычку извлекали для визуального анализа и фотосъемки. Результаты представлены на рисунке 4.4 для экспериментальных образцов из свинца и органического стекла соответственно.

Полученные результаты идентичны тем, которые были зафиксированы во время визуального контроля взаимодействия стержня катапульты с имитатором перемычки на входе в выпускной канал плоской и объемной моделей ковшового затвора при различных пластических свойствах материала имитатора и форме головной части ударявшего по нему стержня.

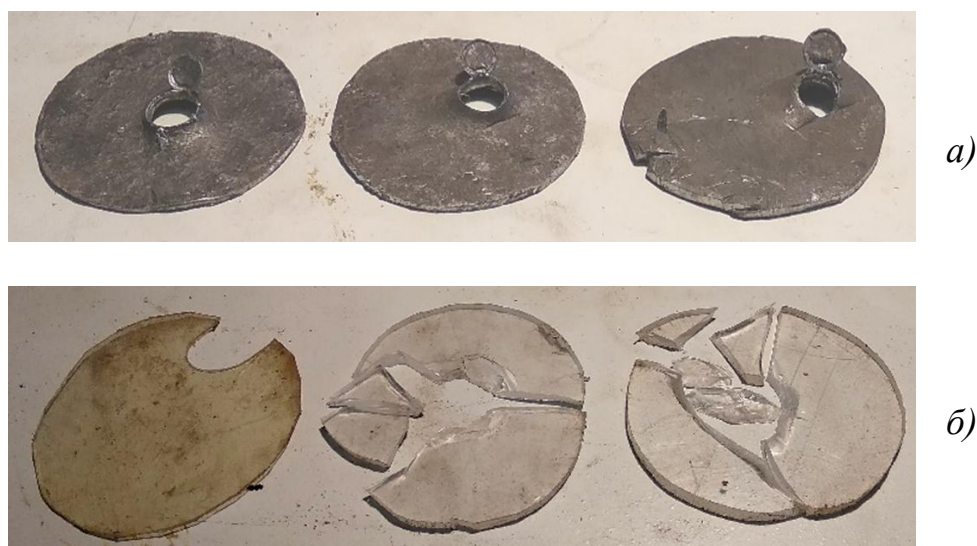


Рисунок 4.4 – Характер разрушения имитаторов перемычки из свинца (*а*) и органического стекла (*б*) после срабатывания катапульты

Если материал имитатора перемычки обладал пластичными свойствами, то в момент удара стержня катапульты, имевшего малое лобовое сопротивление, в перемычке образовывалось сквозное отверстие (фото на рисунок 4.4*а*). В случае, когда материал имитатора перемычки был хрупким, происходило его разрушение на отдельные куски (рисунок 4.4*б*).

Последовавшие сразу после теоретических изысканий лабораторные экспериментальные исследования подтвердили правильность технических решений, заложенных в конструкции катапульты для ковшевого шибера затвора.

Полученные ранее аналитические зависимости следует признать полностью корректными и в дальнейшем использовать для обоснования энергосиловых параметров устройства. Разработка ключевых узлов катапульты на основании расчетных данных позволит добиться оптимальных режимов работы механизма, при которых гарантируется полное разрушение спекшейся корки на входе в канал ковшевого стакана с учетом ее прочностных характеристик и возможной толщины, а также геометрических параметров самого канала.

4.2 Оценка интенсивности вибрационного воздействия пневматических вибраторов на базовый огнеупорный комплект ковшового затвора и рекомендуемые параметры их работы

Для эффективного вибрационного воздействия на процесс затягивания канала ковшового затвора, наряду с рациональными значениями параметров функционирования пневматического вибратора, необходимы также информация об изменении возбуждаемой им вынуждающей силы, действующей вдоль оси канала затвора.

Интенсивность снижения значений параметров возбуждаемых колебаний связана с поглощением упругих волн, проходящих как в однородной среде, так и на границе раздела разных сред.

В соответствие со сложившимися представлениями амплитуда A и интенсивность I волны, распространившейся в поглощающей среде вдоль оси, изменяются по экспоненциальному закону:

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \quad (4.1)$$

$$I(x) = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (4.2)$$

где A_0 и I_0 – амплитуда и интенсивность волны в точки $x = 0$;

α – линейный коэффициент поглощения упругих волн, зависящий от свойств среды и частоты волн.

Отсутствие в справочной литературе данных о значении коэффициента α для огнеупорных элементов, формирующих сталевыпускной канал разливочного ковша, а также сведений о том, в какой мере происходит угасание упругой волны при пересечении стыков контактирующих между собой керамических изделий ковшового затвора, является побудительным мотивом к проведению экспериментальных исследований с целью получения информации, необходимой

для обоснования конструктивных и энергосиловых параметров устройств, обеспечивающих снижение интенсивности процесса затягивания канала шиберной системы.

Поскольку теоретическим путем получить зависимость, описывающую закон, по которому происходит изменение упругой волны по мере ее распространения от источника возбуждения вдоль канала шиберного затвора, достаточно проблематично, поставленную задачу решали экспериментальным путем. Для этого спроектировали и изготовили пневматический вибратор направленного действия, схема и внешний вид которого показаны на рисунке 4.5.

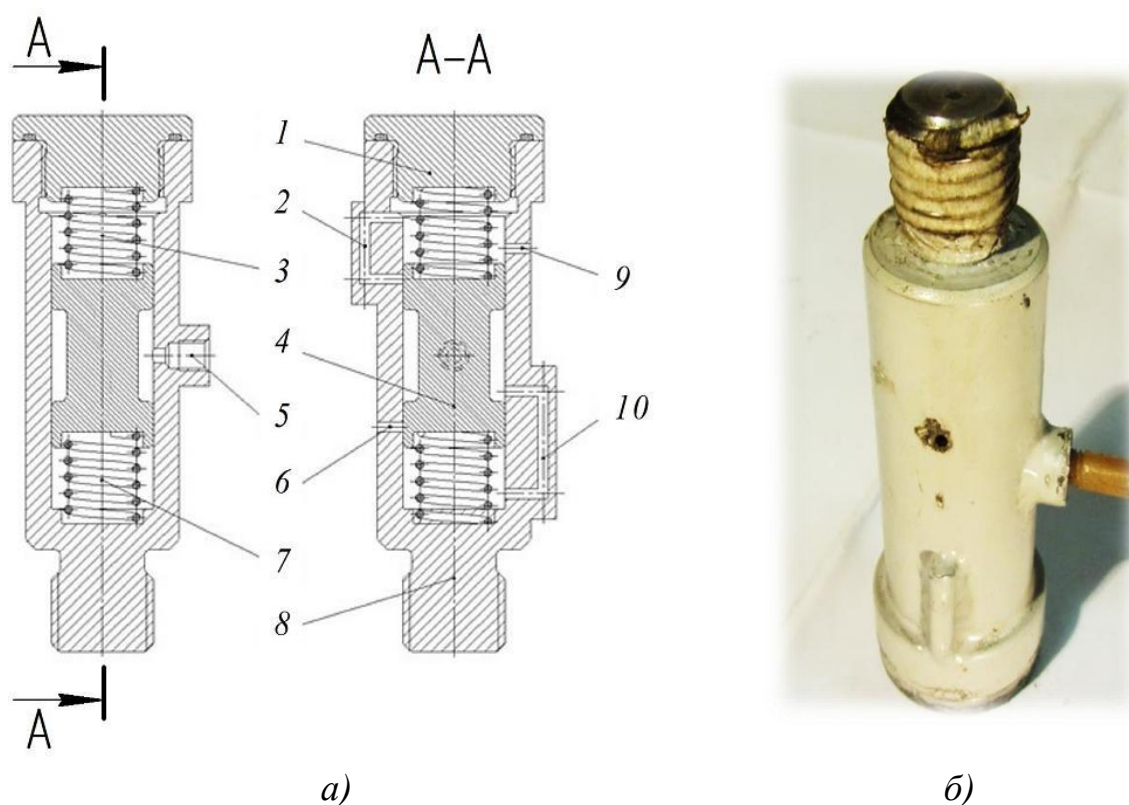


Рисунок 4.5 – Конструктивная схема (а) и изготовленный образец (б) пневматического вибратора

Вибратор включает пустотелый цилиндрический корпус 8 с ввинченной в него крышкой 1 и резьбовым хвостовиком. Внутри корпуса размещен с возможностью относительного продольного перемещения сдвоенный поршень 4,

удерживаемый в среднем положении частично сжатыми пружинами 7 и 3. В стенке пустотелого цилиндрического корпуса имеются два перепускных канала 10 и 2, а также два выпускных отверстия 9 и 6.

При подаче сжатого воздуха по трубопроводу 5 в среднюю часть рабочей полости он по каналу 10 поступает под сдвоенный поршень 4, который под воздействием давления перемещается вверх, сжимая пружину 3 и вытесняя находящийся под ним воздух через отверстие 9 в атмосферу.

Вблизи своего крайнего положения сдвоенный поршень 4 перекрывает выпускное отверстие 9 и перепускной канал 10 и одновременно открывает выпускное отверстие 6 и перепускной канал 2, в результате чего происходит реверсирование движения самого поршня.

Под действием давления воздуха теперь уже на верхнюю часть поршень перемещается вниз, сжимая пружину 7 и вытесняя воздух через отверстие 6 из полости. Достигнув своего нижнего положения, поршень открывает выпускное отверстие 9 и перепускной канал 10, т.е. начинает совершать колебания, частота и амплитуда которых зависят от давления воздуха и жесткости пружин 7 и 3.

Экспериментальные исследования проводили в два этапа [115]. Вначале с помощью анализатора вибрации 795 М оценили снижение интенсивности колебательного процесса на разных частотах, в зависимости от линейного размера огнеупорного элемента и упругих свойств его материала.

Степень поглощения упругой волны при ее прохождении через тело огнеупорного изделия, являющегося элементом керамической части шибберного затвора, определяли по значению коэффициента затухания вибрационного сигнала, вычисленного по формуле [116, 117]:

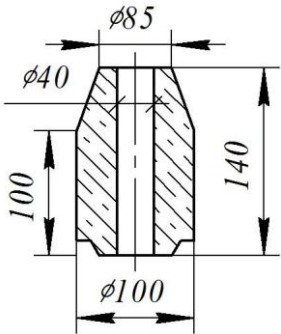
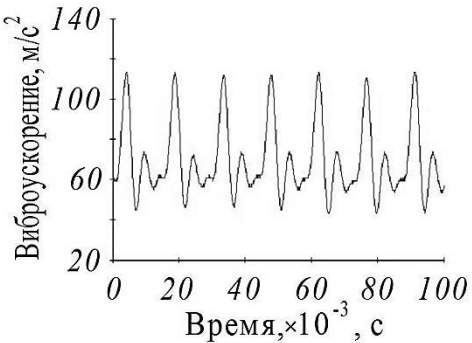
$$\alpha = \frac{a_{\text{н}}}{a_{\text{в}}} \quad (4.3)$$

где a_n – значение виброускорения на заданной частоте колебаний, возбуждаемых пневматическом вибратором при его контакте с нижней поверхностью огнеупора;

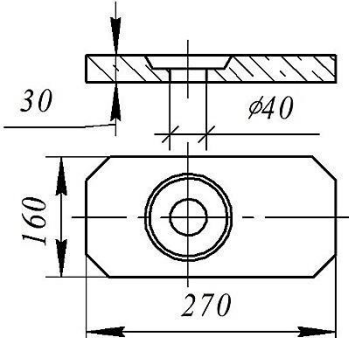
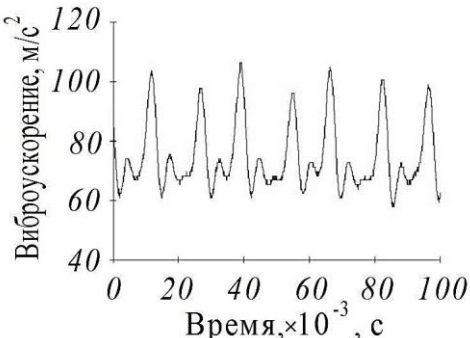
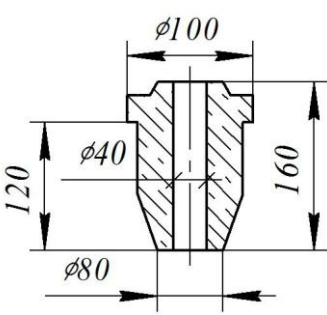
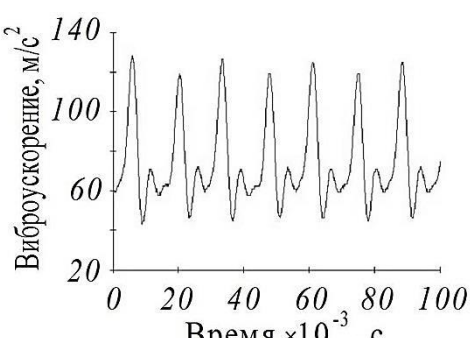
a_v – значение виброускорения в точке контроля на верхней поверхности огнеупора.

В таблице 4.1 приведены геометрические параметры огнеупорных изделий шибера затвора и формы регистрировавшихся сигналов при контроле коэффициента затухания виброускорения во время поглощения упругой волны, когда возбуждаемое вибратором виброускорение составляло $a_n = 160 \text{ м/с}^2$.

Таблица 4.1 – Геометрические параметры огнеупоров затвора и вид сигналов, зарегистрированных при контроле виброускорения на их верхних поверхностях.

Огнеупорное изделие	Форма и размеры огнеупорного изделия	Вид зарегистрированного сигнала	Коэффициент затухания вибрационного сигнала
Магнезитовый ковшовый стакан			2,3

Продолжение таблицы 4.1

Огнеупорное изделие	Форма и размеры огнеупорного изделия	Вид зарегистрированного сигнала	Коэффициент затухания вибрационного сигнала
Циркониевая плита			4
Магнетитовый стакан-коллектор			2

Полученная информация свидетельствует в пользу того, что коэффициент затухания вибрационного сигнала при прохождении через тело огнеупора в большей мере зависит от физических свойств его материала, чем от размера.

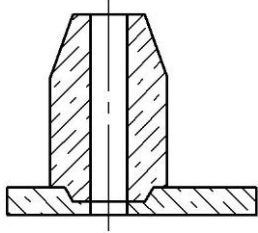
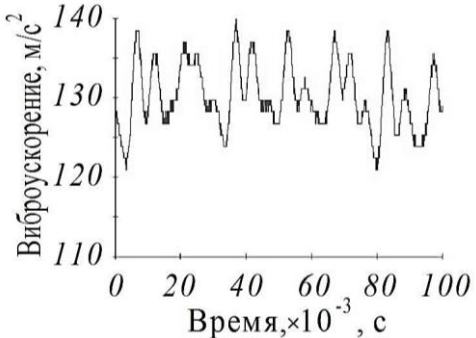
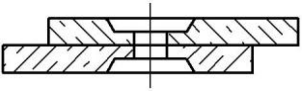
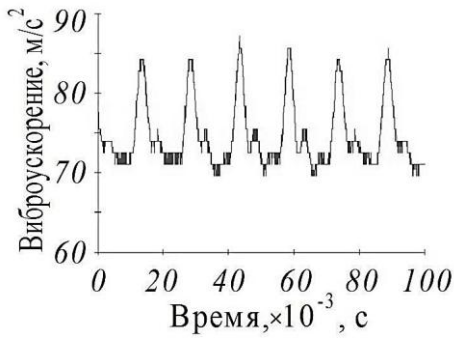
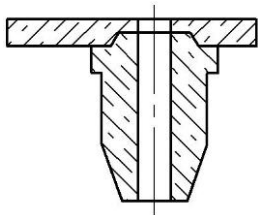
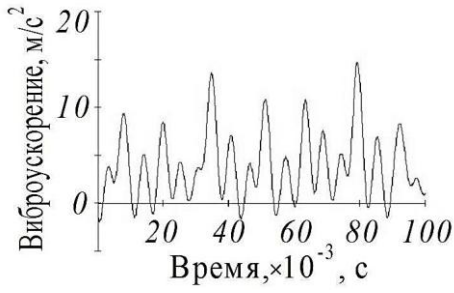
Второй этап проводившихся исследований был связан с получением данных о влиянии поверхностей раздела контактирующих между собой огнеупорных элементов затвора на степень ослабления виброускорения при прохождении упругой волны через зону их контакта.

Интересующую информацию получили следующим образом.

Соседствующие огнеупорные элементы попарно соединяли между собой, обеспечивая их сжатие с помощью двух винтов с гайками в соответствии со

схемами, приведенными в таблице 4.2. При этом на нижний элемент оказывали вибрационное воздействие параметрами, а на свободной поверхности верхнего элемента с помощью акселерометра фиксировали виброускорение и по его значению рассчитывали общий коэффициент затухания вибрационного сигнала a_0 .

Таблица 4.2 – Вид сигналов, зарегистрированных при контроле виброускорения на паре огнеупоров.

Комбинация огнеупоров	Схема контакта двух огнеупоров	Вид зарегистрированного сигнала	Коэффициент затухания на границе раздела
Ковшовый стакан – верхняя плита			1,03
Верхняя плита – нижняя плита			1,01
Верхняя плита – стакан-коллектор			1,54

Затем, по полученному значению находили коэффициенты затухания виброускорения на границе раздела двух огнеупорных изделий, используя выражение:

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{\alpha_0}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (4.4)$$

где α_1 и α_2 – значения коэффициентов затухания виброускорения для каждого из двух находящихся в контакте огнеупорных элементов.

Как известно, требованиями действующих технических инструкций по эксплуатации шиберных затворов предусмотрено использования специальных паст для уплотнения стыков между контактными поверхностями огнеупорных плит с ковшовым стаканом и стаканом-коллектором. Наличие таких двух прослоек также будет влиять в определенной мере на интенсивность затухания упругих волн. Поэтому часть опытов провели с целью установления значимости такого влияния, для чего осуществляли измерения виброускорения во время прохождения упругой волны через два огнеупорных элемента, находящихся между собой в сжатом состоянии, при отсутствии и наличии уплотнительной прослойки в их фланцевых соединениях.

Результаты таких измерений позволили установить увеличение в 1,5 раза значения коэффициента затухания упругих волн, вызванное слоем уплотнительной пасты в зоне контакта стаканов с плитами.

Наряду с этим выполнили также эксперимент для оценки значений коэффициента затухания вибросигнала при прохождении упругой волны через всю керамическую часть собранного опытного образца затвора, предназначенного для 100-тонного сталеразливочного ковша (фото на рисунке 4.6), который подвергали направленному вибровоздействию с различной интенсивностью с использованием двух пневматических поршневых вибраторов.

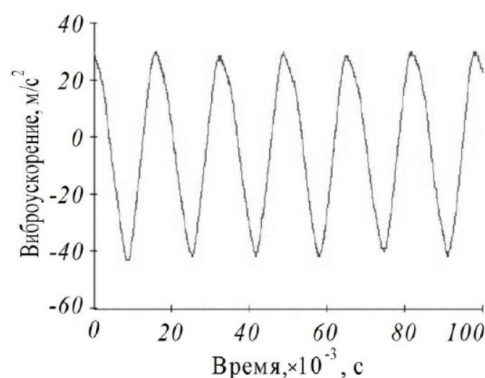
Сопоставление значений общих коэффициентов затухания вибрационного сигнала при прохождении упругой волны через полный комплект огнеупоров

ковшового затвора позволяет сделать заключение о том, что изменение интенсивности процесса колебаний, возбуждаемого вибратором в керамической части шиберной системы, не влияет на показатель ослабления энергии упругой волны.

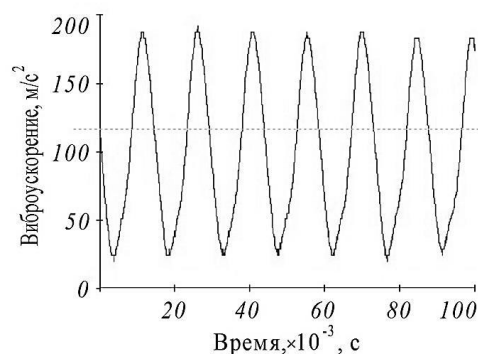


Рисунок 4.6 – Опытный образец затвора, снабженный системой вибрационного воздействия на детали его огнеупорного комплекта

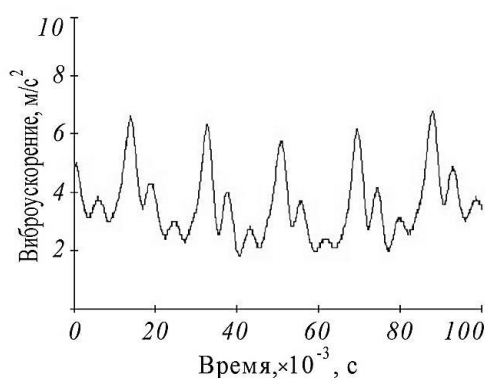
В качестве наглядного примера на рисунке 4.7 приведены распечатки сигналов, зафиксированных при двух режимах работы пневмовибратора (*а* и *б*) и отображающих значения виброускорения, измеренного на верхней торцевой поверхности ковшового стакана (*в* и *г*).



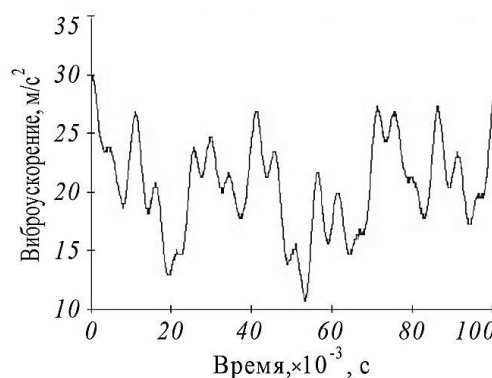
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.7 – Значения виброускорений, возбуждаемых пневмовибратором в месте контакта с нижней торцевой поверхностью стакана-коллектора (а и б) и измеренные на верхней торцевой поверхности ковшового стакана (в и г) при двух интенсивностях колебательного процесса

В первом случае значение коэффициента затухания виброускорения составило 11,86, а во втором случае 11,43, т.е. практически были одинаковыми, что свидетельствует о превалирующем влиянии геометрических и материальных характеристик огнеупорного комплекта на ослабление регистрируемого сигнала в сравнении с параметрами вибрационного воздействия.

Данные, полученные в ходе лабораторных экспериментов, учтены при разработке рекомендаций по промышленному использованию результатов выполненной разработки.

4.3 Усовершенствование конструкции катапульты для открытия канала ковшового затвора

Основным преимуществом технического решения, описанного патентом [102], стало существенное сокращение эксплуатационных затрат, связанных с использованием катапульты. Так расходная часть ограничена лишь ударным стержнем-стрелой, который после разрушения препятствия устремляется в полость промежуточного ковша, увлекаемый потоком металла. Все остальные элементы устройства могут быть использованы неоднократно, их период эксплуатации ограничен лишь показателем заложенного ресурса.

Однако упомянутое устройство также не лишено недостатков. Установка такой навесной катапульты предполагает отсутствие на ковшовом затворе специального теплового экрана, предназначенного для защиты разливочной системы от негативного воздействия теплового излучения со стороны зеркала жидкого металла и его брызг в процессе разлива. Указанные факторы в существенной мере сокращают ресурс отдельных элементов как самого шибера затвора, так и катапульты, за счет избыточного и достаточно продолжительного нагрева с многократными повторами. В частности, особенно уязвимыми будет пара плоских пружин, выполненных из рессорно-пружинной стали и подвергнутых закалке, тогда как под повторяющимся продолжительным нагревом можно ожидать повторный отпуск и, как следствие, потерю упругих характеристик. Попадание же капель металла на поверхность деталей может потребовать в дальнейшем дополнительной слесарной операции по их очистке.

Исходя из этого, закономерным развитием концепции применения пружинной ударной катапульты в составе ковшового затвора для обеспечения гарантированного начала разлива в штатном режиме должен стать поиск таких конструктивных схем, для которых не потребуется удаление из состава разливочного устройства защитного экрана [118, 119]. При проработке различных вариантов необходимо ориентироваться на ряд технологических требований:

- обеспечить возможность совместной установки на шиберный затвор как самого навесного устройства, так и теплового защитного экрана;
- сохранить ключевой принцип размещения в полости сталевыпускного отверстия только ударного стержня, с выводом всех остальных элементов за пределы огнеупорного комплекта;
- сохранить требуемые силовые характеристики навесного устройства, обеспечивающие поддержку и направление ударного стержня;
- предусмотреть минимальное конструктивное вмешательство в исходный формат корпусных частей ковшового затвора ради установки навесного устройства.

Первичный анализ конструкции катапульты, описанной патентом [102], показал, что главным фактором, ограничивающим совместное применение данного навесного устройства с защитным тепловым экраном, становится широкий разлет плоских пружин, соединенных с тетивой, поддерживающей ударный стержень. Замена плоских пружин на любые иные парные силовые компоненты, за счет собственной упругости способные обеспечить требуемое натяжение тетивы, также приводила к появлению указанного недостатка. В итоге было принято решение использовать схему с одинарным силовым компонентом, размещенным соосно стакану-коллектору, под выступ которого в защитном тепловом экране уже присутствует сквозное отверстие. Состав подобного устройства показан на рисунке 4.8.

При разработке конструкции усовершенствованной катапульты учитывали то, что у всех современных ковшовых затворов удержание огнеупорного стакана-коллектора в заданном положении осуществляется посредством использования байонетной гнездовой втулки. Такое исполнение втулки позволяет в существенной степени упростить процедуру замены стакана-коллектора при замене огнеупорных шиберных плит во время вывода сталеразливочного ковша с затвором для обслуживания на стенде. В затворах, лишенных байонетного соединения, гнездовая втулка закрепляется относительно иных корпусных частей жестко

(зачастую – с фиксацией накладными кольцами или аналогичными элементами на нескольких винтах), и ее сдем возможен только в процессе полной разборки шибера затвора.

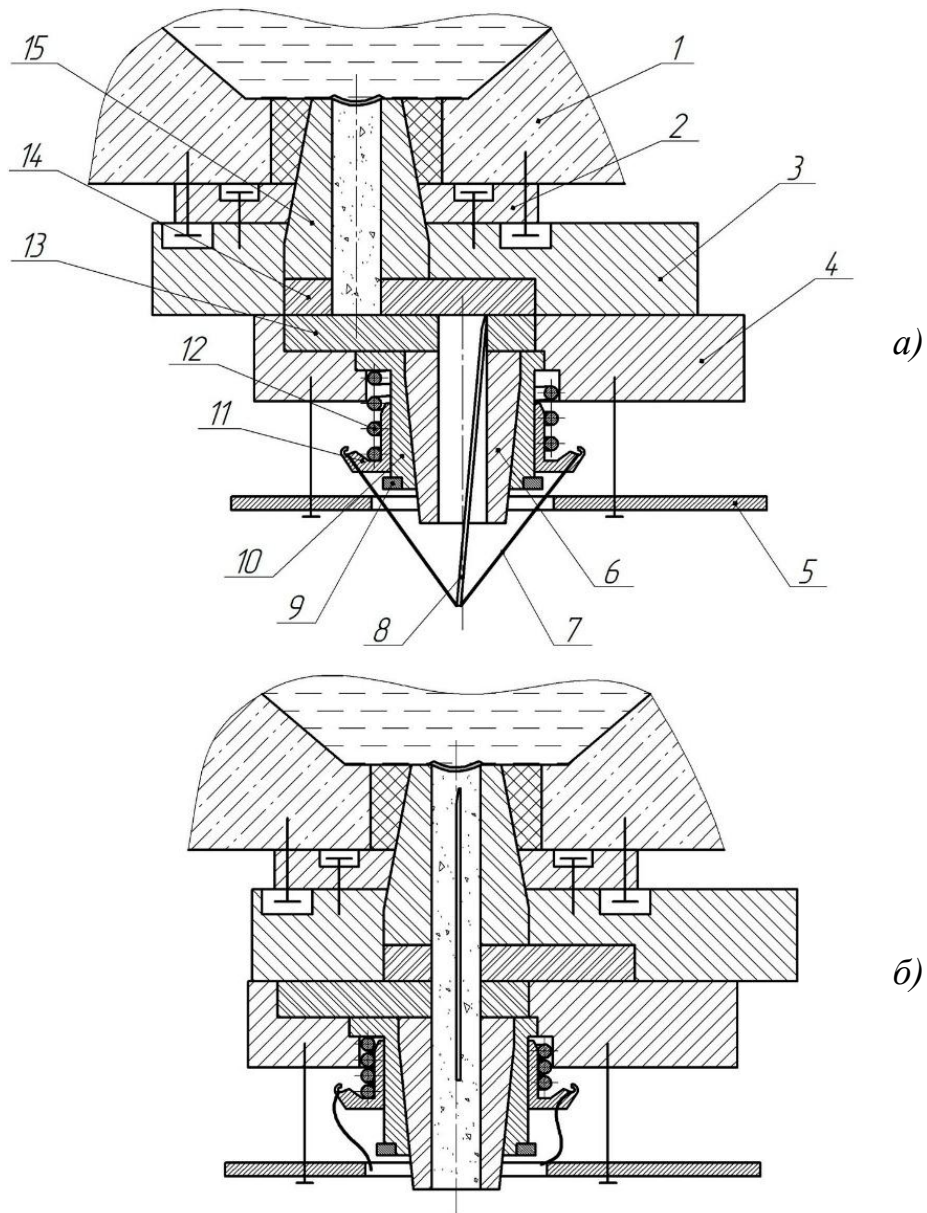


Рисунок 4.8 – Состав усовершенствованной катапульты:

- a)* катапульта во взведенном состоянии;
- б)* срабатывание катапульты после совмещения отверстий в огнеупорных плитах

Показанный на рисунке 4.8 ковшовый шиберный затвор состоит из базовой платформы 2, зафиксированной на днище сталеразливочного ковша 1, неподвижного корпуса 3 и подвижной тележки 4. Внутри неподвижного корпуса 3 установлены верхняя огнеупорная плита 14 и ковшовый огнеупорный стакан 15, полости которых заполнены стартовой смесью. В подвижной тележке 4 размещена нижняя огнеупорная плита 13 и закреплена байонетная гнездовая втулка 10, удерживающая огнеупорный стакан-коллектор 6. Весь затвор в сборе защищен от теплового излучения и брызг стали металлическим экраном 5.

На байонетной втулке 10 установлена гильза 11, свободный ход которой подразумевает скольжение по поверхности байонетной втулки. Зазор между ними заполнен высокотемпературной графитовой смазкой. Снизу перемещение гильзы 11 ограничено гайкой 9.

На гильзе 11 размещена пружина растяжения 12, верхний виток которой зафиксирован относительно тела байонетной втулки 10, а нижний – относительно тела гильзы 11 с тем расчетом, чтобы при упругой деформации пружины 12 гильза 11 скользила по цилиндрической поверхности.

Нижняя часть подвижной гильзы 11 оснащена двумя симметрично расположенными крюками. Они служат зацепами для удержания струны 7, которая, в свою очередь, реализует поддержку металлического ударного стержня 8, размещенного в сталевыпускном канале стакана-коллектора. Сборку всей системы осуществляют, когда шиберный затвор находится в перекрытом состоянии, и поверхность огнеупорной плиты верхней части комплекта закрывает отверстие сталевыпускного канала. Эта же поверхность служит упором для свободного конца стержня 8, тем самым фиксируя его положение перед открытием затвора. Когда же отверстия в шиберных плитах 13 и 14 совмещаются, стержень 8 теряет свой упор и устремляется вертикально вверх вдоль сталевыпускного канала. Если на поверхности стартовой смеси спеклась твердая корка – стержень 8 пробьет ее и тем самым обеспечит свободное истечение стали.

С целью проверки работоспособности предложенной катапульты был проведен лабораторный эксперимент. Для этого с учетом рекомендаций работы

[95] в масштабе 1:2,5 изготовили физическую модель ковшового затвора и снабдили ее новой катапультированной системой (фото на рисунке 4.9).



Рисунок 4.9 – Конструктивное исполнение силового узла катапульти (а) и относительное положение ее элементов во взведенном (б) состоянии после установки на модель

Витая пружина растяжения была изготовлена из кремнемарганцевистой бронзы. Для ее наливки использовали проволоку диаметром 5 мм. К телу байонетной втулки пружину притянули винтом, пропустив его сквозь крайний верхний виток, тем самым зафиксировав положение пружины относительно гнездовой втулки. Сквозь крайний нижний виток пружины пропустили еще два удлиненных винта, внедрив их по резьбе в тело укороченной подвижной гильзы, при этом сам крайний виток лег на юбку детали. Оба удлиненных винта в данной конструкции выступают крюками, необходимыми за надежного зацепления струны тетивы. При сборке убедились в свободном скольжении гильзы относительно наружной поверхности байонетной втулки при растяжении пружины.

Данный силовой узел был установлен на действующую модель ковшового затвора. В отношении данной физической модели было реализовано конструктивное и динамическое подобие натурному объекту: модель была упрощена до огнеупорного комплекта с двумя независимыми частями с сохранением возможности сдвигового перемещения нижней части (стакан-

коллектор и нижняя шиберная плита) относительно верхней (ковшовый стакан и верхняя шиберная плита). Дальнейшие экспериментальные исследования вели по методике, описанной в работе [101] и ранее опробованной при оценке эффективности срабатывания катапульты с двумя плоскими упругими элементами. Задачей эксперимента была симуляция процесса разрушения препятствия на входе в канал ковшового стакана при известных прочностных характеристиках образовавшейся перемычки.

В качестве имитатора твердой спекшейся корки использовали набор плоских перемычек. Их вариационное разнообразие обеспечили ступенчатым изменением толщины (0,5 мм, 1 мм и 1,5 мм), а также использованием двух материалов с разными физико-механическими свойствами. Чтобы придать имитатору корки выраженные хрупкие свойства, использовали перемычки из оргстекла. Исследование разрушения перемычки в пластичном состоянии происходило за счет применения образцов из свинца.

Экспериментальные образцы перемычек поочередно закладывали в конструкцию физической модели, после чего взводили катапульту в перекрытом состоянии затвора и переходили в режим наблюдения. При приложении сдвигового перемещения сквозные отверстия верхней и нижней частей огнеупорного комплекта совмещались, ударный стержень терял свой упор и устремлялся вертикально вверх, успешно пробивая препятствие. Разрушение было зафиксировано во всех шести опытах, для каждого образца перемычки. После срабатывания катапульты разрушенную перемычку извлекали для визуального анализа.

По итогам эксперимента было установлено, что в отношении имитаторов из свинца для перемычки, обладающей выраженными пластичными свойствами, было зафиксировано характерное пробитое отверстие с выгнутыми в направлении движения стержня кромками. Такой эффект был достигнут в том числе за счет малого лобового сопротивления стержня, чья ударная головка была спрофилирована определенным образом. В отношении имитаторов из оргстекла,

для перемычки, обладающей выраженными хрупкими свойствами, была зафиксирована полная потеря целостности путем распада на осколки.

По результатам эксперимента усовершенствованную конструкцию катапульты следует признать полностью работоспособной и эффективной для разрушения твердой спекшейся корки, препятствующей свободному истечению расплава при открытии шиберного затвора.

4.4 Расширение зоны применения вибрационного воздействия в отношении разливочных устройств металлургического производства

Защита стали от вторичного окисления на участке сталеразливочный ковш – промежуточный ковш МНЛЗ с использованием огнеупорной трубы, является обязательной технологической операцией, способствующей обеспечению требуемого качества отливаемой заготовки [120]. При этом для прижатия защитной трубы к нижней части стакана-коллектора шиберного затвора, надежного удержания в рабочей позиции и периодической ее замены в условиях серийной разливки применяют специальные манипуляторы различного конструктивного исполнения.

На эффективность такого способа экранирования истекающей струи металла от окружающей атмосферы в значительной степени влияет интенсивность подсоса воздуха в полость защитной трубы через ее стык со стаканом-коллектором ковшового затвора. Для предотвращения подсоса воздуха в зону стыка осуществляют подачу аргона, а сам стык уплотняют с помощью термопластичной вставки, изготовленной из специального материала, который под действием высоких температур вначале подплавляется, а затем спекается и обеспечивает герметичность соединения огнеупоров [121].

Немаловажным фактором, способствующим сокращению времени нормального функционирования защитной огнеупорной трубы, следует признать

необходимость ее периодического отсоединения от стакана-коллектора ковшового затвора и отведения в сторону для удаления с помощью кислорода отложений на стенках сталевыпускного канала.

Во время проведения такой операции происходит повреждение контактных поверхностей трубы и стакана-коллектора, а также и попадание на них брызг металла, что нарушает герметичность их стыка при последующем сочленении и способствует проникновению в полость трубы значительного количества воздуха, т.е. интенсификации процесса вторичного окисления разливаемой стали.

Решение отмеченных проблем требует комплексного подхода, предусматривающего проведение работ по конструктивному совершенствованию существующих манипуляционных систем с целью обеспечения возможности самоустановки защитной трубы относительно стакана-коллектора ковшового затвора при переводе ее в рабочую позицию, а также снижения интенсивности процесса налипания твердых частиц на стенках канала этого огнеупорного изделия.

С учетом результатов, полученных при исследовании предложенной системы вибрационного воздействия на огнеупорную часть шибера затвора сталеразливочного ковша, можно сделать предположение о возможности ее применения с этой же целью на защитной огнеупорной трубе.

Предварительная конструктивная проработка такого технического решения показала, что эффективность его промышленной реализации в значительной степени будет зависеть от того, насколько вибратор, используемый для возбуждения колебательного процесса, будет органически сочетаться с остальными структурными элементами сталеразливочного узла [122].

В связи с этим, на основании полученной информации, предложен модернизированный вариант конструктивного исполнения опорного узла манипулятора, схема которого показана на рисунке 4.10.

В соответствии с приведенной схемой, узел включает хвостовик, закрепленный на конце полой штанги и жестко связанный с вилкой 5, удерживающей на цапфах наружное несущее кольцо 1, имеющее возможность относительного поворота на заданный угол. Отличительным признаком опорного

узла является то, что он снабжен пневматическим вибратором 3 направленного действия, жестко закрепленным посредством резьбового соединения на вилке 5.

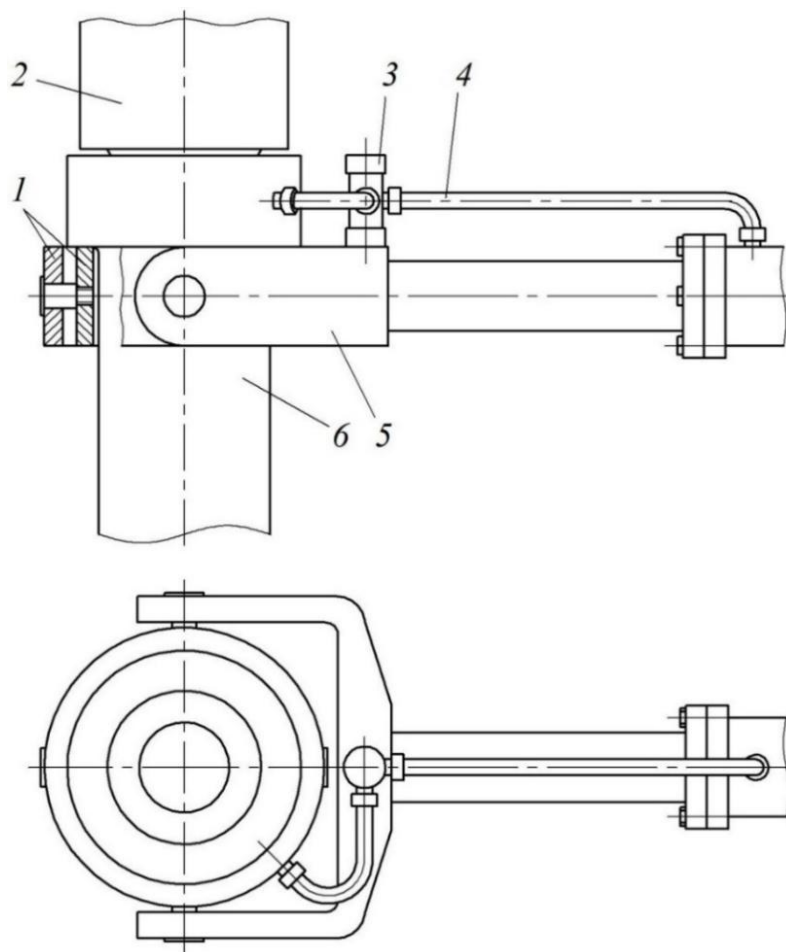


Рисунок 4.10 – Конструктивная схема усовершенствованного опорного узла манипулятора для замены защитных огнеупорных труб

С учетом того, что в настоящее время у современных шиберных затворов в обязательном порядке осуществляют воздушное охлаждение пружинных блоков, обеспечивающих прижатие огнеупорных плит, было решено одновременно использовать этот воздух в качестве энергоносителя для пневматического вибратора [123].

Подаваемый по гибкому трубопроводу 4 сжатый воздух под избыточным давлением, проходя через рабочую камеру пневмовибратора, возбуждает в ней

колебательный процесс и затем подается на наружную поверхность корпуса ковшового затвора для обдува и охлаждения его структурных элементов.

Экспериментальную проверку возможности практической реализации вибрационного воздействия на огнеупорную трубу с помощью пневматического вибратора, установленного на вилке манипулятора, провели с использованием специально изготовленного его опытного образца (фото на рисунке 4.11), по геометрическим параметрам предназначенного для применения на двухручьева сортовой МНЛЗ со 100-тонным сталеразливочным и 14-тонным промежуточным ковшами.



Рисунок 4.11 – Модернизированный опорный узел манипулятора с защитной трубой, состыкованной со стаканом-коллектором ковшового затвора

Во время тестирования функционирования опорного узла манипулятора на нижней части его вилки размещали серийно выпускающийся поршневой вибратор ударного действия.

Данный вибратор при давлении воздуха 0,2–0,6 МПа, подаваемого с расходом 250 л/мин, развивает силу вибрационного воздействия в пределах 3600–6200 Н, что позволяло компенсировать установленное ранее почти 12-кратное ее ослабление по мере распространения упругой волны в огнеупорной части разливочного узла снизу вверх вдоль его канала. Причем струю воздуха, истекающего из выхлопного патрубка пневматического вибратора, направляли на наружную поверхность шиберного затвора для его дополнительного охлаждения.

Результаты предварительной проверки функционирования данной системы вибрационного воздействия на разливочный узел ковша, включающий шиберный затвор и поджигаемую к его стакану-коллектору специальным манипулятором защитную огнеупорную трубу, свидетельствуют о ее перспективе промышленного применения после проведения необходимых для этого мероприятий, что станет предметом дальнейших исследований.

4.5 Выводы

1. Результаты лабораторных исследований, выполненных на опытном образце шиберного затвора, предназначенного для применения на 100-тонном сталеразливочном ковше, подтвердили правильность технических решений, заложенных в конструкцию катапульты, также корректность полученных расчетных зависимостей, позволивших обосновать значения ее энергосиловых параметров, при которых гарантируется разрушение твердой корки, образующейся в результате спекания стартовой смеси и блокирующей входное отверстие выпускного канала ковшового стакана.

2. Контрольные измерения, проведенные на опытном образце шибера затвора, оборудованного системой вибрационного воздействия на его огнеупорную часть, позволили установить значения общих коэффициентов затухания вибрационного сигнала при прохождении упругой волны через полный комплект огнеупоров и подтвердить результаты, которые были ранее получены теоретическим путем в ходе исследования процесса возбуждения вертикально направленных колебаний, позволяющих отрывать частицы от стенок канала ковшового стакана

3. Данные, полученные в ходе проводившихся лабораторных экспериментов, учтены при выдаче рекомендаций по промышленному использованию выполненной разработки.

4. Дальнейшие исследования, связанные с повышением эффективности работы разливочных систем, должны быть направлены на совершенствование их структурных элементов, функционально связанных с ковшовыми затворами, снабженными устройствами вибрационного воздействия на их огнеупорную часть, а также с конструктивным усовершенствованием навесных катапульти, обеспечивающих разрушение спекшейся твердой корки на поверхности стартовой смеси при первом открытии затвора.

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/с² 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 катапульти 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 катапульти и системы вибрационного воздействия на огнеупорные элементы шибера затвора, формирующие его сталевыпускной канал. Особенностью расчета параметров катапульти 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 катапульти и системой вибрационного воздействия из двух пневматических вибраторов. Определены результаты срабатывания катапульти 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 шибера 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» и ООО «Горловский энергомеханический завод» 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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The World Steel Association: official site. 2020 World Steel in Figures. Brussels, Belgium. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.worldsteel.org.
2. Bieda B. et al. Life cycle inventory processes of the integrated steel plant (ISP) in Krakow, Poland—coke production, a case study //The International Journal of Life Cycle Assessment. – 2015. – Т. 20. – №. 8. – С. 1089-1101.
3. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. №839 «Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/70695824/>.
4. Patent №311,902 USA (1885.02). Stopper for ladles : заявл. 24.11.1884 ; опубл. 10.02.1885 / David D. Lewis. – 2 с. ; ил.
5. Пилюшенко, В.Л. Бесстопорная разливка стали / В.Л. Пилюшенко, С.П. Еронько. В.Н. Шестопапов. – К.: Техніка, 1991. - 179 с. – ISBN 5-335-00497-5.
6. Адымов, А.А. Разливка стали из ковшей с шиберными затворами / А.А. Адымов [и др.] // Сталь, 1981. – № 1. – С. 38-39.
7. Семенов, В.И. Разливка стали с применением шиберных затворов на заводе «Запорожсталь» / В.И. Семенов [и др.] // Разливка стали в слитки и их качество, 1981. – № 9. – С. 59-62.
8. Антипин, В.Г. Разливка стали из ковшей с шиберными затворами / В.Г. Антипин [и др.] // Сталь, 1982. – № 1. – С. 28-29.
9. Шевченко, В.П. Технология разливки стали из ковшей, оборудованных шиберными затворами / В.П. Шевченко, В.С. Сергиенко, И.И. Борнацкий. // Донецк: ДПИ, 1982. – 108 с.
10. Воронов, Ю.Ф. Разливка стали из ковшей с шиберными затворами / Ю.Ф. Воронов [и др.]. // Сталь, 1981. – № 1. – С. 33-34.

11. Добромилов, А.А. Разливка стали из ковшей с шиберными затворами / А.А. Добромилов [и др.]. // Сталь, 1983. – № 7. – С. 20.
12. Кулик, А.Д. Разливка стали из ковшей с шиберными затворами рычажно-пружинного типа / А.Д. Кулик [и др.]. // Сталь, 1984. – № 6. – С. 27-28.
13. Мачикин, В.И. Разливка стали при помощи шиберных затворов / В.И. Мачикин [и др.]. // Metallurg, 1985. – № 5. – С. 39-40.
14. Агеенко, Н.С. Разливка стали из 210-т ковшей через шиберные затворы / Н.С. Агеенко, А.П. Мосалова, И.Я. Гуляев. // Metallurg, 1985. – С. 23-24.
15. Поляков, В.Ф. Совершенствование технологии разливки стали через шиберные затворы / В.Ф. Поляков [и др.]. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost', 1987. – № 4. – С. 16-17.
16. Patent №3,454,201 USA (1969.07). Discharge mechanism for bottom pouring steel ladle : заявл. 20.09.1965 : опубл. 08.07.1969 / E. Fichera. – 2 с.
17. Patent №3,511,261 USA (1970.05). Controllable teeming valve for steel-casting ladles : заявл. 24.11.1965 : опубл. 12.05.1970 / K. Bick Et Al. – 10 с.
18. Patent №4,063,668 USA (1977.12). Ladle gate valve : заявл. 02.09.1975 : опубл. 20.12.1977 / Earl P. Shapland, James T. Shapland ; заявитель United States Steel Corporation. – 20 с.
19. Патент № 657909 СССР, МПК В22Д 41/08 (1979.04). Ковшовый затвор : № 2469432/22-02 : заявл. 04.04.1977 : опубл. 25.04.1979 / Евтеев Д.П., Карпов Н.Д., Поживанов А.М., Правдин В.С., Ролдугин Г.Н, Савватеев Ю.Г. – 2 с.
20. Patent №4,253,647 USA (1981.03). Slide gate nozzle for ladles : заявл. 11.09.1979 : опубл. 03.03.1981 / Adolf Andres ; заявитель Stahlwerke Rochling-Burbach Gesellschaft mit beschränkter Haftung. – 9 с.
21. Patent №3,685,705 USA (1972.08). Sliding gate valve having spring biased slide : заявл. 24.03.1972 : опубл. 22.08.1972 / James W. Cessna. – 4 с.
22. Patent №3,760,993 USA (1973.09). Slide closure for receptacle for molten metals : заявл 20.05.1971 : опубл. 25.09.1973 / Ernst Meier ; заявитель Interstop A.G. – 8 с.

23. Патент № 1044428 А СССР, МПК В22D 41/08 (1983.09). Ковшовый затвор : № 3455241/22-02 : заявл. 21.06.1982 : опубл. 30.09.1983 / Мачикин В.И., Шестопапов В.Н., Еронько С.П.; заявитель Донецкий ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт. – 3 с.

24. Patent №4,042,207 USA (1977.08). Valve operating means for a molten metal container : заявл. 26.01.1976 : опубл. 16.08.1977 / Freidrich Nehrlich, Franz Ruckstuhl ; заявитель Metacon AG. – 6 с.

25. Patent №4,660,749 USA (1987.04). Sliding nozzle apparatus : заявл. 09.09.1985 : опубл. 28.04.1987 / Nobuyuki Yokoi, Toshimitsu Taira, Koji Tsuyuguchi ; заявитель Kurosaki Refractories Co., Ltd. – 7 с.

26. Еронько, С.П. Разливка стали: Технология. Оборудование / С.П. Еронько, С.В. Быковских. // К.: Техніка, 2003. – 216 с. – ISBN 966-575-180-8.

27. Смирнов, А.Н. Процессы непрерывной разливки стали. / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, Минаев А.А., Момот С.В., Белобров Ю.Н. // Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с. – ISBN 966-7917-06-1.

28. Patent WO 2004/105981 A2, МПК В22D 41/00 (2004.12). Casting ladle slide-gate : заявл. 02.06.2003 : опубл. 09.12.2004 / Schonbrenner Wolfgang, Stein Dirk; заявитель KNOLLINGER FLO-TEC GMBH. – 22 с.

29. KNOLLINGER FLO-TEC GMBH: official site. Hillscheid, Germany [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kft.knoellinger.de/>.

30. **Понамарёва, Е.А.** Повышение эффективности функционирования затворов сталелитейных ковшей. / **Е.А. Понамарева.** // Конструкторское бюро, издательский дом "Панорама", 2021. – № 1. – С. 46-53.

31. **Понамарёва, Е.А.** Проектирование пружинных узлов для условий экстремально высоких температур / **Е.А. Понамарева, А.В. Анастасьев.** // Конструкторское бюро, издательский дом «Панорама», 2021. – № 1. – С. 23-31.

32. **Понамарёва, Е.А.** Проектирование узлов скольжения в системах шиберных затворов для разливки стали / **Е.А. Понамарева, А.В. Анастасьев.** // Конструкторское бюро, издательский дом «Панорама», 2021. – № 5. – С. 36-45.

33. Еронько, С.П. Расчет и конструирование оборудования для внепечной обработки и разливки стали / С.П. Еронько, С.В. Быковских, Е.В. Ошовская. // К.: Техніка, 2007. – 344 с. – ISBN 966-575-187-5.
34. Еронько, С.П. Конструирование рациональных систем скользящих затворов / С.П. Еронько. // Metallurg, 2003. – № 4. – С. 45-47.
35. Кононов, В.А. Разработка шиберных систем для разливки мелких слитков и фасонного литья. / В.А. Кононов, В.П. Василенко, А.А. Алпатов. // Новые огнеупоры, 2013. – №11. – С. 18-24.
36. Золотухин, В.И. Отечественные системы разливки стали и огнеупорные комплектующие производства НПП «Вулкан-ТМ». / В.И. Золотухин, А.Г. Головкин, Е.И. Гордеев, Д.А. Провоторов, Н.А. Гордеева. // Новые огнеупоры, 2015. – №10. – С. 13-17.
37. Кононов, В. А. Эффективность внедрения шиберной разливки в литейном производстве / В.А. Кононов. // Литейщик России, 2010. – № 11. – С. 23-26.
38. Кононов, В.А. Шиберные затворы для литейных ковшей / В.А. Кононов, А.А. Алпатов, Н.В. Кононов. // Литейное производство, 2000. – № 2. – С. 27-29.
39. Кононов, В. А. Перспективы применения шиберных затворов при разливке металла / В.А. Кононов [и др.]. // Сталь, 2002. – №3. – С. 59-65.
40. Герцык, С.И. Особенности работы литейных ковшей с шиберным затвором / С.И. Герцык, М.В. Шишимиров, В.П. Василенко. // Metallurgiya mashinostroyeniya, 2009. – №6. – С. 2-5.
41. Головкин, А.Г. Сталеразливочные системы для металлургических и литейных производств / А.Г. Головкин, Е.И. Гордеев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов. // Новые огнеупоры, 2014. – №2. – С. 14-16.
42. Rief A. Ladle well filler sands for all needs. / Rief A., Figueiredo A.O., Fasching M., Gruber V. // Bulletin-The Journal of Refractory Innovations, 2022. – Pp. 34–40.

43. Matos L. Analysis of the technical and thermodynamic properties of steel ladle slide gate valve filler sands. / Matos L., Bielefeldt W. V., Braganca S. R. // Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, 2024. – Pp. 2024–2024.
44. Kuo C. Improvement in free opening performance of ladle filler sand. / Kuo C., Chen K.M., Chen L.H., Wu C., Hsiao C. // China Steel Tech Rep, 2020. – Vol. 33. – Pp. 36–42.
45. Li S.S. A Novel Nonmetallic Inclusion in High-Mn and High-Al Steel Caused by the Interfacial Reaction Between Steel and Ladle Filler Sand. / Li S.S., Zang X.M., Zhang J.K., Yang J., Kong L.Z., Wang G. // Steel research international, 2024. – Vol. 95. – No. 10. – Pp. 2400381.
46. Nayak P. Insights into Non-free Opening of Ladles: Filler Sand Chemistry Modifications for High Mn Steel Billet Casting. / Nayak P., Sarkar S., Sahoo P.P., Ranjan R. // Transactions of the Indian Institute of Metals, 2024. – Vol. 77. – No. 9. – Pp. 2423–2430.
47. Kong L. Reaction behavior of high manganese and high aluminum steel with chromium-containing ladle filler sand. / Kong L., Kang M., Zang X., Li S., Yang J. // Metallurgical Research & Technology, 2023. – Vol. 120. – No. 6. – Pp. 604.
48. Yuan K. Sintering behaviours of different ladle filler sands with high-chromium stainless steel. / Yuan K., Deng Z., Zhu M. // Ironmaking & Steelmaking, 2024. – Pp. 03019233241292910.
49. Deng Z. Laboratory study on the sintering behavior of Zircon-based ladle filler sands. / Deng Z., Yang B., Zhu M. // Steel research international, 2021. – Vol. 92. – No. 9. – Pp. 2100071.
50. Yang B. Sintering behavior of new chromite-alumina mixed ladle filler sands for high Mn-high Al steel grades. / Yang B., Deng Z., Zhu M. // Metallurgical and Materials Transactions B, 2022. – Vol. 53. – No. 6. – Pp. 3979–3991.
51. Li S. S. Effect of Cr₂O₃ Addition on Sintering Behavior of Novel Chromite-Based Ladle Filler Sand. / Li S. S., Kong L. Z., Zang X. M. // Steel research international, 2024. – Vol. 95. – No. 2. – Pp. 2300452.

52. Yuan K. Effect of Carbon on Sintering Behavior of Chromite-Based Ladle Filler Sands. / Yuan K., Deng Z., Zhu M. // Steel research international, 2024. – Vol. 95. – No. 5. – Pp. 2300670.

53. Патент №2 682 062 С1 РФ, МПК В22D 41/46 (2018.08). Способ подготовки шиберного затвора сталеразливочного ковша : №2018109108, заявл. 14.03.2018 : опубл. 14.03.2019 / Зажигаев П.А., Данилин Ю.А., Захаров И.М., Чиглинцев А.В., Егоров В.А., Федькин П.Н., Федюнин С.А., Чиглинцева А.С, заявитель Акционерное общество «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат». – 4 с.

54. Patent №5,167,902 USA, IPC B22D41/22 (1992.12). Device for piercing an obstruction in a well-block opening of a ladle for transporting molten steel : заявл. 19.07.1991 : опубл. 01.12.1992 / W.A. McCray, M.D. Cope, T.J. Connors, A. Csaszar; заявитель Tri-C Corporation. – 14 с.

55. Patent №DE 102005010842 A1, IPC B22D41/46, B22D41/44. Katapult zum Öffnen des Kanals einer Stahlgießpfanne : заявл. 28.02.2008 : опубл. 21.11.2007 / D. Jacob, заявитель Besitzgesellschaft Jacob GMBH. – 1 с.

56. Топычканов, В.И. Исследование причин затягивания выпускного канала сталеразливочного ковша при разливке рельсовой стали / В.И. Топычканов, А.В. Пан, В.В. Матвеев [и др.]. // Сталь, 1990. – № 5. – С. 29-31.

57. Боканова, Л.Н.. Повышение эффективности работы и надежности шиберных затворов при разливке стали / Л.Н. Боканова, В.Ф. Берзов, А.А. Зубакин [и др.]. // Сталь, 1992. – №5. – С. 37-39.

58. Андриющенко, В.П. Исследование температурного режима работы ковшового скользящего затвора шиберного типа / В.П. Андриющенко [и др.]. // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1976. – № 5. – С. 12-14.

59. Кортель, А.А. Численное моделирование процесса заматалливания сталеразливочного канала промежуточного ковша при закрытии шиберного затвора / А.А. Кортель, В.Б. Сибикин, Е.Я. Литовский, А.Л. Дурмашкин. // Огнеупоры, 1992. – №2. – С. 16-19.

60. Кулик, А.Д. Математическая модель температурного состояния шиберного затвора / А.Д. Кулик, А.П. Огурцов, О.А. Жульковский. // Известия вузов: Черная металлургия, 1999. – № 4. – С. 12-15.
61. Кулик, А.Д. Основные проблемы шиберной технологии разливки стали / А.Д. Кулик. // Сталь, 2001. – № 2. – С. 13-15.
62. Анищенко Н.Ф. Об оптимальных соотношениях параметров каналов сталеразливочных устройств при разливке сверху через затворы скользящего типа / Н.Ф. Анищенко [и др.]. // Повышение эффективности разливки стали в изложницы, 1987. – С. 40-43.
63. Еронько, С.П. Влияние гидродинамических условий разливки на процесс застывания канала затвора / С.П. Еронько, Е.С. Ярошевская, С.В. Быковских. // Известия вузов: Черная металлургия, 1995. – № 10. – С. 7-10.
64. Дурмашкин, А.Л. Разработка конструкций шиберных затворов и комплекса огнеупоров к ним для сталеразливочных и промежуточных ковшей / А.Л. Дурмашкин, В.А. Орлов, А.А. Кортель. // Огнеупоры, 1993. – № 5. – С. 32-37.
65. Аксельрод, Л.М. Предотвращение процесса затягивания канала сталеразливочного узла промежуточного ковша МНЛЗ / Л.М. Аксельрод, А.А. Вяткин, Н.А. Вяткина [и др.]. // Новые огнеупоры, 2007. – № 2. – С. 9-14.
66. Shusen, L. Inclusions and nozzle clogging during steel continuous casting process / L. Shusen, J. Wei, Z. Lifeng et al. // The Iron and Steel Technology Conference and Exposition (AISTech 2008) 5-8 May 2008. – Pittsburgh: Warrendale, 2008. – Pp. 1247-1261.
67. Horiuchi, T. «MOGUL» – lined submerged entry nozzle / T. Horiuchi, M. Kajimura. // UNITECR'05: Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories, 9th Biennial Worldwide Congress on Refractories 8-11 November 2005. – P. 2005.
68. Аксельрод, Л.М. Разработка технологии изготовления огнеупорного материала, замедляющего процесс затягивания / Л.М. Аксельрод, Г.Г. Мельникова, Г.О. Бодина. // Огнеупоры и техническая керамика, 2001. – № 2. – С. 22-25.

69. Song-Mook, C. Effect of nozzle clogging on surface flow and vortex formation / C. Song-Mook, B.G. Thomas, K. Sung-Kwang et al. // Iron and Steel Technology, 2012. – № 7. – Pp. 85-95.

70. Pawelek, A. Methods of eliminating the phenomenon of ladle nozzle clogging / A. Pawelek, J. Czechowski. // Archives of metallurgy and materials, 2012. – Vol. 57. – Pp. 311-317.

71. Патент № RU 134463 U1, МПК7 B22D 41/22 (2006.01). Шиберный затвор литейного ковша : № 2013118547/02, заявл. 25.06.2013 : опубл. 20.11.2013 / Золотухин В.И., Провоторов Д.А., Дуликов В.П., Жилин Д.И., заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тульский государственный университет" (ТулГУ), Общество с ограниченной ответственностью "Техномет" (ООО "Техномет"). – 8 с.

72. Жилин, Д.И. Моделирование функционирования компактных шиберных затворов с дополнительным подогревом разливочного канала / Д.И. Жилин, Д.А. Провоторов. // Молодежные инновации: Региональная конференция. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – С. 92-94.

73. Жилин, Д.И. Проектирование и изготовление оснастки и огнеупоров к опытным образцам незастывающих шиберных затворов / Д.И. Жилин, Д.А. Провоторов. // Молодежные инновации: Региональная конференция. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – С. 94-96.

74. Жилин, Д.И. Математическая модель и теоретическое исследование нестационарного теплообмена между расплавом металла и огнеупорным комплектом в шиберном затворе / Д.И. Жилин. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2016. – Вып 1. – С. 169-178.

75. Жилин, Д.И. Повышение эффективности шиберного затвора с дополнительным подогревом разливочного канала / Д.И. Жилин. // Заготовительные производства в машиностроении, 2015. – № 1. – С. 3-6.

76. Жилин, Д.И. Применение машинного эксперимента для получения математических моделей процессов нестационарного теплообмена в шиберном

затворе / Д.И. Жилин, Н.Е. Проскуряков, Д.А. Провоторов. // Сб. науч. трудов III Международной научно-практической конференция «Вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения». Екатеринбург, 2016. – С. 21-24.

77. Гершуни, Г.З. Об устойчивости конвективного течения в вибрационном поле относительно пространственных возмущений / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. // Механика жидкости и газа, 1988. – № 2. – С. 116-122.

78. Гершуни, Г.З. О конвективной неустойчивости жидкости в вибрационном поле невесомости / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. // Механика жидкости и газа, 1981. – № 4. – С. 14-19.

79. Заварыкин, М.П. Экспериментальное исследование вибрационной конвекции / М.П. Заварыкин, С.В. Зорин, Г.Ф. Путин. // Доклады Академии наук СССР, 1985. – т. 281. – № 4. – С. 815-816.

80. Маркман, Г.С. О влиянии высокочастотной вибрации на возникновение вторичных конвективных режимов / Г.С. Маркман, А.Л. Уринцев. // Механика жидкости и газа, 1976. – № 2. – С. 90-96.

81. Шарифулин, А.М. Устойчивость конвективного движения в вертикальном слое при наличии продольных вибраций / А.М. Шарифулин. // Механика жидкости и газа, 1983. – №2. – С. 186-188.

82. Зеньковская, С.М. О влиянии вибрации высокой частоты на возникновение конвекции / С.М. Зеньковская, И.Б. Симоненко. // Механика жидкости и газа, 1966. – № 5. – С. 51-55.

83. Зеньковская, С.М. Исследование конвекции в слое жидкости при наличии вибрационных сил / С.М. Зеньковская. // Механика жидкости и газа, 1966. – № 5. – С. 55-58.

84. Сапко, В.Н. Влияние упругих колебаний на кристаллизацию и качество слитка / В.Н. Сапко [и др.]. // Проблемы стального слитка: Сб. научн. трудов. – М.: Металлургия, 1978. – С. 180-181.

85. Вишкарёв, А.Ф. Низкочастотное вибровоздействие на кристаллизующийся расплав в модельном эксперименте / А.Ф. Вишкарёв [и др.]. // Известия вузов. Черная металлургия, 1986. – № 3. – С. 42-47.
86. Тазетдинов, В.И. О кристаллизации расплава при вибровоздействии / В.И. Тазетдинов, Ю.В. Кряковский, Г.М. Чурсин. // Известия вузов. Черная металлургия, 1988. – № 3. – С. 134.
87. Гончар, В.П. Расчет параметров виброобработки металла в изложницах / В.П. Гончар. // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация", 1975. – № 7. – С. 37-38.
88. Малиночка, Л.И. Улучшение качества слитка путем воздействия вибрации на его кристаллизацию / Малиночка Л.И. [и др.]. // Известия вузов. Черная металлургия, 1978. – № 9. – С. 45-48.
89. Серветник, В.М. Улучшение качества стали ШХ15 путем виброобработки стали / В.М. Серветник [и др.]. // Сталь, 1987. – № 4. – С. 48-49.
90. Пилюшенко, В.Л. Влияние условий вибромеханического воздействия при затверждении на усадку и свойства алюминиевого слитка // В.Л. Пилюшенко [и др.]. // Известия вузов. Черная металлургия, 1988. – №112. – С. 29-32.
91. Пилюшенко, В.Л. Особенности влияния виброимпульсного воздействия низкой частоты на подавление усадочных дефектов в слитке / В.Л. Пилюшенко [и др.]. // В кн.: Разливка стали в изложницы и качество слитка. – М.: Металлургия, 1989. – С. 14-18.
92. Шевченко, Ф.Л. Механика упругих деформируемых систем. Ч. 2. Сложное деформированное состояние: научное пособие. / Ф.Л. Шевченко. // Киев: ИСИ, 1993. – 240 с.
93. Еронько, С.П. Теоретические и модельные исследования прочностных параметров перемычки, образующейся на входе в канал ковшового затвора / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, **Е.А. Понамарева**, Е.С. Цыхмистро. // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТИ», 2020. – № 20 (63). – С. 86-92.
94. Еронько, С.П. Теоретические и модельные исследования прочностных параметров перемычки, образующейся на входе в канал ковшового затвора / С.П.

Еронько, М.Ю. Ткачев, **Е.А. Понамарева**, Е.С. Цыхмистро. // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: Сб. тезисов докл. V Междунар. науч.-тех. конф. Под общ. ред. В. А. Козачишена. – Алчевск: ГОУ ВО ЛНР ДонГТИ, 2020. – С. 12-16.

95. Еронько, С.П. Физическое моделирование технических систем: учебное пособие / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, М.Ю. Ткачев, С.А. Бедарев, Б.И. Стародубцев. – Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ», 2020. – 259 с.

96. Еронько, С.П. Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства: учебное пособие / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, М.Ю. Ткачев, С.А. Бедарев, Б.И. Стародубцев. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 324 с.

97. Еронько, С.П. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разливки стали / С.П. Еронько, С.В. Быковских. – К.: Техніка, 1998. – 136 с.

98. Еронько, С.П. Стенд для прочностных испытаний имитаторов перемычек, блокирующих выпускной канал ковша в начале разливки / С.П. Еронько. М.Ю. Ткачев, **Е.А. Понамарева**, Е.С. Цыхмистро. // Материалы 5-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса» 21-25 мая 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – С. 40-46.

99. Еронько, С.П. Методика модельных исследований прочностных параметров перемычки, образующейся на входе в канал ковшового затвора / С.П. Еронько, С.А. Бедарев, **Е.А. Понамарева**. // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. трудов XXXI Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополь 16–22 сент. 2024 г. – Донецк : ДонНТУ, 2024. – С. 79-85.

100. Выдрин, В.Н. О реологических свойствах стали и свинца / В.Н. Выдрин, Л.М. Агеев. // Известия Академии наук СССР. Metallургия. – 1967. – № 2. – С. 104-106.

101. 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. – № 5. – Т. 77. – С. 540-546.

102. Патент № RU 2751946 С2, МПК В22D 41/08, В22D 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.

103. **Понамарева, Е.А.** Моделирование срабатывания катапульты для разрушения корки на входе в канал шиберного ковшового затвора / **Е.А. Понамарева** // Научные технологии в машиностроении: сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне и 85-летию города трудовой доблести Ишимбая (г. Ишимбай, 16–18 апреля 2025 г.). – Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2025. – С. 7-13.

104. 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. – 2022. – №10. – Т.78. – С. 858-864.

105. Еронько, С.П. Обоснование энергосиловых параметров катапульты шиберного затвора сталеразливочного ковша. / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Е.А. Понамарева**, Е.С. Цыхмистро. // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы научно-технической конференции (13-14 октября 2022 г.). Часть 1. – Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. – С. 114-116.

106. Еронько, С.П. Разработка вибрационной системы снижения интенсивности процесса затягивания выпускного 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.

107. 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.

108. Еронько, С.П. Модельные исследования процесса зарастания канала ковшового затвора / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, **Е.А. Понамарева**. // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса» 22-25 мая 2018 г. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – С. 11-15.

109. 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.

110. Патент № RU 2751196 С2, МПК В22В 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.

111. Мысик, Р.К. Использование вибрационной обработки при производстве стальных отливок / Р. К. Мысик, С. В. Брусницын, И. А. Груздева, А. И. Голоднов // Научные труды XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ПВО УГТУ. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ. УПИ, 2008. – Ч.1 – С. 30-33.

112. Голоднов, А.И. Влияние вибрационной обработки на структуру и свойства меди / А.И. Голоднов, А.В. Сулицын, Г.Л. Хазан. // Расплавы, 2009. – №5. – С. 38-44.

113. Сулицын, А.В. Определение оптимальных параметров вибрационного воздействия на бронзу марки БрКд1 в процессе кристаллизации / А.В. Сулицын [и др.] // Литейщик России, 2009. – №10. – С. 43-47.

114. Ошовская, Е.В. Оценка коэффициента затухания параметров вибрационного сигнала / Е.В. Ошовская, В.А. Сидоров, Д.В. Щедринский. // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии: материалы III международной научной конференции. Череповец, 2017. – С. 190-196.

115. Еронько, С.П. Обоснование рабочих параметров вибрационной системы, обеспечивающей снижение интенсивности зарастания канала ковшового затвора / С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, **Е.А. Пономарева**. // Сб. науч. тр. Донбас. гос. техн. ин-та. Вып. 72. – Алчевск, 2022. – С. 99–106.

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

117. Еронько, С.П. Оценка интенсивности поглощения упругих волн огнеупорами ковшового затвора в процессе вибрационного воздействия / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, **Е.А. Пономарева**, В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская. // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: Сб. тезисов докл. IV Междунар. науч.-тех. конф. Под общ. ред. В. А. Козачишена. – Алчевск: ГОУ ВО ЛНР ДонГТУ, 2019. – С. 20-21.

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

119. **Пономарева, Е.А.** Повышение надежности катапультного устройства системы шибера затвора сталеразливочного ковша / **Е.А. Пономарева** // Молодежь и наука: материалы XXI международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов (23 мая 2025 г., г. Нижний Тагил): в 2 т. Т. 1; Мин-во науки и высш. образования РФ, ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2025. – С. 65-68.

120. Еронько, С.П. Исследование процесса подсоса воздуха в канал ковшового затвора при разливке стали / С.П. Еронько. // Наук. праці ДоНТУ. Сер. Металургія, 2002. – Вип. 40. – С. 54-57.

121. Суворов, С.А. Эластичные материалы / С.А. Суворов. // Новые огнеупоры, 2007. – № 7. – С. 40-46.

122. 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.

123. Еронько, С.П. Разработка системы вибрационного воздействия на выпускной узел разливочного ковша МНЛЗ / С.П Еронько, Е.С. Цыхмистро, **Е.А. Понамарева**, Д.В. Попов. // Материалы 7-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса» 24-26 мая 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – С. 42-47.

Приложение 1. Акт внедрения материалов диссертационной работы в производственную деятельность ООО «Волгодонский энергомеханический завод»



Общество с ограниченной ответственностью
Волгодонский энергомеханический завод

УТВЕРЖДАЮ:

директор ООО «Волгодонский
энергомеханический завод»

Байчоров
«17» июня 2025 года
«ВЭМЗ»
М.П. ООО «Волгодонский энергомеханический завод»
ИНН Ростовской области 64-07-00001

АКТ

17 июня 2025 года

Исх. № 92

**О внедрении результатов диссертационной работы
Понамаревой Елены Александровны в производственную деятельность
ООО «Волгодонский энергомеханический завод»**

Основание: рассмотрение материалов диссертационной работы Понамаревой Елены Александровны на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Комиссией в составе:

Председатель комиссии: заместитель директора по ТВ Федяев Д.О.

Члены комиссии: инженер-конструктор Романенко В.А.
инженер-технолог Файзуллаев Р.Г.
экономист Паршакова Л.А.

составлен настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Понамаревой Елены Александровны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены и используются в производственной деятельности ООО «Волгодонский энергомеханический завод», а именно: в работе конструкторского отдела при проектировании и конструировании навесного оборудования для ковшовых шибберных затворов (вибрационная система снижения затягивания сталевыпускного отверстия и катапульты для открытия сталевыпускного канала).

Ожидаемый экономический эффект от внедрения предложенной катапульты для открытия сталевыпускного канала донного шибберного затвора сталеразливочного ковша и вибрационной системы ковшового затвора в действующее сталеплавильное производство с годовым выпуском

1 000 000 т стали и 100-тонными ковшами в обороте составит 5 207 972 росс. руб. Ожидаемый срок окупаемости капитальных затрат на переоснащение всего шиберного парка сталеплавильного производства с годовым выпуском 1 000 000 т стали и 100-тонными ковшами в обороте составит 730 плавов из 10 000 запланированных.

Председатель комиссии:



Д.О. Федяев

Члены комиссии:



В.А. Романенко



Р.Г. Файзуллаев



Л.А. Паршакова

**Приложение 2. Акт внедрения материалов диссертационной работы
в производственную деятельность ООО «Горловский
энергомеханический завод»**



Общество с ограниченной ответственностью

**«ГОРЛОВСКИЙ
ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

ПАО «Банк ПСБ» г. Ярославль
к/с 30101810400000000555
р/с 40702810809300311907
БИК 044525555
ИНН 9312001334
КПП 931201001

PJSC Bank PSB, Yaroslavl
c/s 30101810400000000555
p/s 40702810809300311907
BIC 044525555
TIN 34516321,
KPP 931201001

Исх № 390
от 30.10.2025г.

«УТВЕРЖДАЮ:

И.о. директора

ООО «Горловский энергомеханический
завод»

С.И. Иваниенко

«30» октября 2025 года



АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Понамаревой Елены Александровны в производственную деятельность
ООО «Горловский энергомеханический завод»**

Основание: рассмотрение материалов диссертационной работы Понамаревой Елены Александровны на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Комиссией в составе:

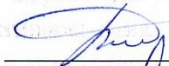
Председатель комиссии:	Бугаев Р.А., начальник цеха
Члены комиссии:	Васильянов И.Н., ведущий инженер-программист
	Афенчук В.В., заместитель начальника цеха
	Степанюк В.Н., старший инженер-конструктор

составлен настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Понамаревой Елены Александровны «Обоснование параметров и совершенствование систем ковшовых затворов с целью повышения эффективности их функционирования», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены и используются в производственной деятельности ООО «Горловский энергомеханический завод», а именно: в работе конструкторского отдела при проектировании и конструировании навесного оборудования для ковшовых шиберных затворов (вибрационная система снижения затягивания сталевыпускного отверстия и катапульта для открытия сталевыпускного канала).

Ожидаемый экономический эффект от внедрения предложенной катапульты для открытия сталевыпускного канала донного шиберного затвора сталеразливочного ковша и вибрационной системы ковшового затвора в действующее сталеплавильное производство с годовым выпуском 1 000 000 т стали и 100-тонными ковшами в обороте составит 5 372 150 *рос. руб.*

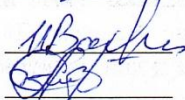
Ожидаемый срок окупаемости капитальных затрат на переоснащение всего шиберного парка сталеплавильного производства с годовым выпуском 1 000 000 *т* стали и 100-тонными ковшами в обороте составит 708 *плавов* из 10 000 запланированных.

Председатель комиссии:

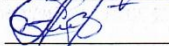


Бугаев Р.А.

Члены комиссии:



Васильянов И.Н.



Афенчук В.В.



Степанюк В.Н.

Донецкая Народная Республика,
Г. О. ГОРЛОВСКИЙ,
284626, Г. ГОРЛОВКА,
УЛ. НЕСТЕРОВА, Д. 127
тел : (0624) 52-22-68
моб.тел. + 7 949 321 04 36

Donetsk People's Republic,
GORLOVSKY,
284626, GORLOVKA,
NESTEROVA STR., 127
phone: (0624) 52-22-68
mobile phone: + 7 949 321 04 36

E-mail: gemz-zavod@mail.ru

**Приложение 3. Акт внедрения материалов диссертационной работы
в учебную деятельность ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»**



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артёма ул., 58, г. Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69
e-mail: donntu.info@mail.ru ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

30.10.2025 № 30-12/85

На № _____

АКТ

использования в учебном процессе
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
результатов диссертационной работы Понамаревой Елены Александровны
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Материалы диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс на кафедре «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша» и используются при обучении магистрантов по направлению подготовки 15.04.02 Технологические процессы и оборудование, направленности «Инжиниринг и технический менеджмент металлургического оборудования» при преподавании учебной дисциплины «Инновационное металлургическое оборудование».

Утверждаю:

Проректор ФГБОУ ВО «Донецкий
национальный технический университет»,
д.т.н., проф.

А.Б. Бирюков

Согласовано:
Начальник учебного отдела,
к.т.н., доц.

В.А. Попов

Заведующий кафедрой «Механическое
оборудование заводов черной
металлургии им. В.Я. Седуша»,
к.т.н., доц.

С.А. Бедарев



**Приложение 4. Патент на катапульту для открытия выпускного канала
металлургического ковша с донным шиберным затвором**



**Приложение 5. Извещение о внесении изменений в фамилию автора
патента на изобретение в связи с допущением ошибки при первой
публикации**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU⁽¹¹⁾**2 751 946**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ИЗВЕЩЕНИЯ К ПАТЕНТУ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ**

ТС4А Изменение сведений об авторе(ах)

(72) Автор(ы):

Еронько Сергей Петрович (UA),
Ткачев Михаил Юрьевич (UA),
Байчоров Анатолий Алексеевич (UA),
Понамарева Елена Александровна (UA),
Байчоров Александр Алексеевич (RU),
Федяев Даниил Олегович (RU)

Дата внесения записи в Государственный реестр: 27.05.2025

Дата публикации и номер бюллетеня: 27.05.2025 Бюл. №15

R U 2 7 5 1 9 4 6

R U 2 7 5 1 9 4 6

Приложение 6. Пример расчета геометрических и энергосиловых параметров катапульты для открытия выпускного канала металлургического ковша с донным шиберным затвором

Исходные данные для расчета:

- вместимость сталеразливочного ковша – 160 тонн;
- длина канала неподвижной части огнеупорного комплекта – 240 мм;
- диаметр сталевыпускного отверстия в огнеупорах – 45 мм.

1. Используем таблицу 2.2 для определения рекомендуемого радиуса поперечного сечения и длины ударного стержня катапульты, а также ключевых характеристик разрушаемой корки. При отсутствии совпадений по значению вместимости сталеразливочного ковша ориентируйтесь на ближайшее значение.

Выбрано:

- ближайшее значение вместимости ковша – 150 т;
- длина ударного стержня катапульты – 250 мм;
- радиус поперечного сечения ударного стержня – 4 мм;
- масса стержня – 0,1 кг;
- максимальная толщина разрушаемой корки – 3 мм;
- предел прочности материала корки – 30 МПа.

2. Рассчитаем требуемую скорость движения стержня:

$$v_{\text{ст}} = 2 \sqrt{\frac{\delta_k \sigma}{\rho_{\text{ст}} l_{\text{ст}} - \rho_{\text{ср}} S_{\text{ст}}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,3 \cdot 30000}{7,85 \cdot 25 - 0,6 \cdot 24}} = 14,07 \text{ (м/с)}$$

3. Рассчитаем кинетическую энергию ударного стержня:

$$W_{\text{к}} = \frac{m_{\text{ст}} v_{\text{ст}}^2}{2} = \frac{0,1 \cdot 14,07^2}{2} = 9,9 \text{ (Дж)}$$

4. Принимаем конструктивно:

– длина упругого элемента	$l_э$	200 мм
– максимальный прогиб упругого элемента	f	60 мм
– ширину поперечного сечения упругого элемента	b	25 мм

5. Назначаем изготовление упругого элемента из стали марки 50ХФА (рекомендуется для производства пружин, работающих при температурах до 300°C). Определяем нормальный модуль упругости для материала:

$$E = 2,18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

5. Рассчитаем параметры упругого элемента (плоской пружины):

– коэффициент упругости	K	$K = \frac{W_K}{f^2} = \frac{9,9 \cdot 1000}{50^2} = 2,76$
– развиваемая сила	$F_э$	$F_э = Kf = 2,76 \cdot 60 = 165,6 \text{ (Н)}$

6. Рассчитаем осевой момент инерции сечения:

$$I = \frac{F_э l_э^3}{3Ef} = \frac{165,6 \cdot 200^3}{3 \cdot 2,18 \cdot 10^5 \cdot 60} = 33,76 \text{ (мм}^4\text{)}$$

7. Рассчитаем высоту поперечного сечения упругого элемента:

$$h_э = \sqrt[3]{\frac{12I}{b_э}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 33,76}{25}} = 2,53 \text{ (мм)}$$

Приложение 7. Патент на ковшевой шиберный затвор с вибрационной системой



Приложение 8. Пример расчета энергосиловых параметров вибрационной системы ковшового затвора

Исходные данные для расчета:

- вместимость сталеразливочного ковша – 160 тонн;
- масса ковшового затвора (модель Knollinger FT-160) – 482 кг.

Требуемые значения вибрационного воздействия для предотвращения
затягивания сталевыпускного отверстия в огнеупорах:

– частота	ω	40 с ⁻¹
– амплитуда	A	2 мм

1. Определим параметры, необходимы для описания приложения вибрационного
сигнала по отношению к деталям огнеупорного комплекта:

– расстояние от средней части ковшового стакана до его нижней торцевой поверхности	x_1	0,130 м
– толщина огнеупорной плиты	x_2	0,037 м

2. Определим коэффициент отражения вибрационного сигнала на основании
соотношения значениями виброускорений на нижней и верхней поверхностях
огнеупора, полученных экспериментальным путем по методике, описанной в
разделе 3.

– коэффициент отражения вибрационного сигнала для участка ковшового стакана	K_1	4,2
– коэффициент отражения вибрационного сигнала для огнеупорной плиты	K_2	2,7

3. Рассчитаем линейный коэффициент поглощения упругой волны огнеупорными изделиями:

– линейный коэффициент	α_1	$\alpha_1 = \frac{\ln K_1}{h_1} = \frac{\ln 4,2}{0,240} = 5,98$
поглощения упругой волны		

материалом ковшевого стакана

– линейный коэффициент	α_2	$\alpha_1 = \frac{\ln K_1}{h_1} = \frac{\ln 2,7}{0,037} = 26,84$
поглощения упругой волны		

материалом огнеупорной плиты

4. По известным геометрическим данным ковшевого стакана рассчитаем площадь его поперечного сечения:

$$S = 20\,576,64 \text{ (мм}^2\text{)} = 0,021 \text{ (м}^2\text{)}$$

5. Определим параметры, необходимые нам для дальнейших расчетов:

– плотность материала ковшевого стакана	ρ	2920 кг/м ³
---	--------	------------------------

– модуль Юнга материала ковшевого стакана	E	$4 \cdot 10^{10}$ Н/мм ²
---	-----	-------------------------------------

6. Рассчитаем фазовую скорость распространения продольной волны вдоль вертикальной оси разливочного стакана:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{10}}{2920}} = 3\,700 \text{ (м/с)}$$

6. Рассчитаем интенсивность вибрационной волны, необходимую для эффективного воздействия на ковшевой стакан в процессе разливки:

$$I_{\text{КС}} = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \cdot 2920 \cdot 3700 \cdot 10^{-6} \cdot 40^2 \cdot 2^2 = 34560 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right)$$

7. Рассчитаем интенсивность упругой волны, распространяющейся от стартовой точки вверх, параллельно оси сталеразливочного канала:

$$I_0 = \frac{I_{\text{КС}}}{e^{-2\alpha_1 x_1} + 2e^{-2\alpha_2 x_2}} = \frac{34560}{e^{-2 \cdot 5,98 \cdot 0,13} + 2e^{-2 \cdot 26,84 \cdot 0,037}} = 71159 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right)$$

8. Рассчитаем мощность, необходимую для возбуждения вертикально направленных колебаний, достаточных, чтобы эффективно препятствовать закреплению частиц на стенках канала ковшового стакана:

$$N_K = I_0 S = 71159 \cdot 0,021 = 1494 \text{ (Вт)}$$

9. Выбираем количество вибраторов в системе:

$$n = 3 \text{ (шт.)}$$

10. Определяем известное давление в пневмосети охлаждения зажимных пружинных элементов ковшового затвора:

$$P = 0,5 \text{ (МПа)}$$

11. Рассчитаем суммарную вынуждающую силу, необходимую для сообщения ковшовому затвору вибрационных колебаний:

$$F_B = m_3 A \omega^2 = 482 \cdot 2 \cdot 40^2 \cdot 10^{-3} = 1542 \text{ (Н)}$$

12. Рассчитаем диаметр поршня для пневмовибратора:

$$d_{\text{п}} = \sqrt{\frac{4m_3 A \omega^2}{n\pi P}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 482 \cdot 2 \cdot 40^2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 3,14 \cdot 0,5}} = 36 \text{ (мм)}$$

13. Принимаем динамическую осадку пружины сжатия, установленной в пневмовибраторе:

$$\delta_{\text{дп}} = 30 \text{ (мм)}$$

14. Рассчитаем расход воздуха, необходимый для эффективной работы пневмовибратора:

$$V_c = 2\delta_{\text{дп}} \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4} \omega = 2 \cdot 0,03 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,036^2}{4} \cdot 40 = 0,0024 \text{ (м}^3\text{/с)}$$

15. Рассчитаем суммарный расход воздуха на питание вибрационной системы:

$$V_o = V_c n = 0,0024 \cdot 3 = 0,0072 \text{ (м}^3\text{/с)}$$

16. Рассчитаем необходимую жесткость пружин в пневмовибраторе:

$$c = \frac{I_0 S}{2\delta_{\text{дп}}^2 \omega n} = \frac{71159 \cdot 0,021 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,03^2 \cdot 40 \cdot 3} = 7 \text{ (Н/мм)}$$