

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ФАКУЛЬТЕТ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**КАФЕДРА «МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЗАВОДОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ»  
ИМ. ПРОФ. СЕДУША В.Я.**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к проведению лабораторных работ по дисциплине вариативной части**

**по выбору вуза профессионального цикла**

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**для студентов всех форм обучения**

**направления подготовки 15.04.02**

**«Технологические машины и оборудование»**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ФАКУЛЬТЕТ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**КАФЕДРА «МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЗАВОДОВ ЧЕРНОЙ  
МЕТАЛЛУРГИИ» ИМ. ПРОФ. СЕДУША В.Я.**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к проведению лабораторных работ по дисциплине вариативной части**

**по выбору вуза профессионального цикла**

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**для студентов всех форм обучения**

**направления подготовки 15.04.02**

**«Технологические машины и оборудование»**

Рассмотрены на заседании  
кафедры «Механическое оборудование  
заводов черной металлургии»  
им. проф. Седуша В.Я.  
Протокол № 11 от 03.04.2017 г.

Утверждены на заседании  
учебно-издательского совета ДОННТУ  
Протокол № \_\_ от \_\_.\_\_. 20\_\_ г.

Донецк  
ДОННТУ  
2017

УДК 53.083

Методические указания к проведению лабораторных работ по дисциплине вариативной части по выбору вуза профессионального цикла «Физическое моделирование технических систем» для студентов всех форм обучения направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» / сост. С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев. – Донецк: ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2017. – 131 с.

Отражены цели и задачи лабораторного практикума по курсу «Физическое моделирование технических систем». Описаны структура лабораторных работ, порядок подготовки к ним, последовательность операций и действий, направленных на выполнение поставленных задач, указаны форма представления результатов работы и порядок защиты отчетов по выполненным заданиям, даны рекомендации по использованию теоретического материала.

*Составители:* Еронько С.П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Механическое оборудование заводов черной металлургии» им. проф. Седуша В.Я.; Ткачев М.Ю., ассистент кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии» им. проф. Седуша В.Я.

*Рецензенты:* д.т.н., профессор А.П. Кононенко  
к.т.н., профессор А.Л. Сотников

Ответственный за выпуск:

к. т. н., профессор В. А. Сидоров

© С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев

## СОДЕРЖАНИЕ

1 ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	6
2 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА .....	7
3 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ .....	8
Лабораторная работа № 1 «Физическое моделирование работы одновалковой зубчатой дробилки для двухстадийного измельчения агломерата» .....	8
Лабораторная работа № 2 «Исследование на физической модели работы двухвалкового пресса для брикетирования угольной пыли» .....	16
Лабораторная работа № 3 «Основные способы удержания шлака в кислородном конвертере во время выпуска стали и оценка их эффективности с использованием физических моделей» .....	25
Лабораторная работа № 4 «Исследование работы на физической модели системы поворотного затвора для отсечки шлака при выпуске стали из конвертера» .....	35
Лабораторная работа № 5 «Моделирование процесса отсечки конвертерного шлака элементами поплавкового типа» .....	39
Лабораторная работа № 6 «Изучение на физической модели процесса силового взаимодействия отсечных элементов с жидкой ванной кислородного конвертера» .....	47
Лабораторная работа № 7 «Исследование на физической модели параметров системы газодинамической отсечки конечного шлака при выпуске стали из кислородного конвертера» .....	55
Лабораторная работа № 8 «Исследование на физической модели работы манипулятора для замены огнеупорных труб, экранирующих струю стали при ее переливе из разливочного ковша в промежуточный ковш» .....	64

Лабораторная работа № 9 «Исследование на физических моделях эффективности применения устройств, регулирующих направленность потоков расплава в промежуточном ковше МНЛЗ» . . . . .	72
Лабораторная работа № 10 «Изучение на физических моделях особенностей работы различных стопорных систем промежуточного ковша МНЛЗ» . . . . .	70
Лабораторная работа № 11 «Моделирование ударного взаимодействия элементов устройства быстрой замены стаканов-дозаторов промежуточных ковшей сортовых МНЛЗ» . . . . .	85
Лабораторная работа № 12 «Исследование на физическом аналоге энергосиловых параметров устройства быстрой смены стакана-дозатора промежуточного ковша сортовой МНЛЗ» . . . . .	93
Лабораторная работа № 13 «Модельные исследования работы устройства аварийного закрытия сталевыпускного канала промежуточного ковша» . . . . .	100
Лабораторная работа № 14 «Моделирование функционирования комплексной разливочной системы промежуточного ковша» . . . . .	106
Лабораторная работа № 15 «Модельные исследования системы дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор слябовой МНЛЗ» . . . . .	113
Лабораторная работа № 16 «Исследование на физической модели функционирования механизмов системы кислородного конвертера для переработки некачественной шихты» . . . . .	120
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА . . . . .	125

## 1 ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Каждую лабораторную работу выполняет группа студентов в количестве 6...8 человек. График проведения лабораторных работ студенты получают заранее на кафедре у преподавателя (руководителя работ).

Выполнение лабораторного практикума включает следующие этапы:

- внеаудиторная подготовка к лабораторной работе;
- контроль степени готовности студентов к выполнению задания;
- выдача индивидуального задания;
- подготовка материальной части;
- выполнение индивидуального задания;
- обработка полученных результатов;
- оформление отчета;
- защита отчета о выполненной лабораторной работе.

При внеаудиторной подготовке к лабораторным работам студенты изучают настоящие методические указания, а также теоретический материал, указанный в каждой работе. При этом помимо конспекта лекций надлежит использовать рекомендуемые учебники, учебные пособия, акцентируя внимание на выделенных в методических указаниях ключевых моментах.

Контроль степени готовности студентов к выполнению лабораторного задания проводится путем устного опроса по материалу, имеющему непосредственное отношение к предстоящей работе. При этом считаются подготовленными только те студенты, которые знают цель поставленного задания; задачи, стоящие перед исполнителями работы и методы их решения; физическую сущность изучаемого явления; содержание осваиваемой методики; назначение всех выполняемых элементарных операций; основные требования техники безопасности и санитарии при выполнении индивидуальных заданий; структуру и содержание отчета о выполненной работе.

При выдаче индивидуального задания из группы студентов, допущенных к выполнению лабораторной работы, формируют подгруппы по 3...4 человека. Задание каждой подгруппе определяют с учетом содержания работы и факторов, влияющих на ее результаты.

Подготовка материальной части к выполнению индивидуального задания состоит в подборе, проверке и приведении в рабочее состояние контрольных и измерительных приборов, приспособлений, а также материалов, перечисленных в настоящих методических указаниях.

Защищают отчет о лабораторной работе в течение семестра или при сдаче зачета. Преподаватель при этом оценивает содержание отчета и качество его оформления.

## **2 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА**

Причины травматизма студентов при выполнении лабораторного практикума могут быть самыми различными, но основными из них являются пренебрежение правилами внутреннего распорядка и поведения, игнорирование правил техники безопасности, умышленное нарушение трудовой или технологической дисциплины, использование неисправного оборудования, приборов, инструментов и приспособлений. Целям предупреждения травматизма служат вводный инструктаж для ознакомления студентов с внутренним распорядком в учебных помещениях университета, первичный инструктаж для разъяснения специфических особенностей поражающих факторов в предметных аудиториях и лабораториях кафедры, а также повторный инструктаж, направленный на предупреждение травматизма при выполнении конкретного задания.

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила:

- неукоснительно выполнять правила внутреннего распорядка в учебных помещениях университета и кафедры;
- детально ознакомиться с настоящим разделом методических указаний;
- знать самые распространенные виды поражений и поражающих факторов в лаборатории и уметь оказывать первую помощь пострадавшему;
- приступая к выполнению задания, принять меры по предупреждению наиболее вероятных поражений;
- пользоваться только исправными приспособлениями, оборудованием и приборами;
- запрещается включать лабораторные установки без разрешения руководителя занятия;
- запрещается находиться в рабочей зоне включенной установки;
- на рабочие установки нельзя опираться и без надобности трогать их руками;
- не загромождать рабочее место и подходы к нему;
- запрещается уходить со своего рабочего места и переходить на другое без разрешения преподавателя;
- категорически запрещается прикасаться к проводам, клеммам, открывать дверцы электрошкафов, находящихся под напряжением;
- при возникновении аварийной ситуации в лаборатории все студенты должны быть немедленно эвакуированы в безопасную зону;
- при получении травмы студентом преподаватель обязан оказать ему первую медицинскую помощь, а в случае необходимости направить в ближайшее медицинское учреждение;
- по окончании работы необходимо тщательно убрать рабочее место и аккуратно уложить инструмент и приспособления в отведенные для них места;
- после проведения работы необходимо отключить электрооборудование от источников питания.

### **3 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

#### **Лабораторная работа № 1**

#### **Физическое моделирование работы одновалковой зубчатой дробилки для двухстадийного измельчения агломерата**

##### **Постановка задачи**

Агломерация на сегодняшний день является основным способом подготовки железосодержащей шихты для процесса выплавки чугуна, а эффективность работы доменных печей в значительной мере зависит от качества агломерата, регламентируемого, прежде всего, содержанием железа и фракционным составом. Крупность агломерата влияет на его восстанавливаемость – способность с определенной скоростью отдавать связанный с железом кислород газу-восстановителю, которая в свою очередь определяет расход кокса при производстве чугуна. Считается, что оптимальная крупность агломерата находится в пределах 5 – 50 мм. Особенно нежелательной является фракция < 5 мм. Например, уменьшение в агломерате доли мелкой фракции (0 – 5 мм) с 15 до 10 % способствует повышению интенсивности доменной плавки на 1,7 - 2,3 %.

Наличие больших кусков и пылевидных включений в товарном агломерате, производимом в Украине, обусловлено несовершенством эксплуатируемого на фабриках дробильного оборудования (щековых, одно- и двухвалковых зубчатых дробилок), поэтому для стабилизации фракционного состава железосодержащей шихты необходимо проведение исследований, связанных с разработкой рациональных схем разрушения аглоспека и совершенствованием конструкций механических систем для их реализации.

Результаты выполненного сопоставительного анализа достоинств и недостатков известных конструктивных схем дробильных устройств свидетельствует о том, что наибольшую перспективу в дальнейшем развитии имеют одновалковые зубчатые дробилки, отличающиеся простотой и надежностью. Одним из путей их модернизации является поиск технических решений, направленных на осуществление так называемого двухстадийного процесса дробления, позволяющего существенно снизить количество железосодержащей шихты, выходящей по гранулометрическому составу за оптимальные пределы.

При разработке нового и совершенствовании существующего дорогостоящего оборудования, применяемого в горно-металлургической отрасли, целесообразно использовать метод физического моделирования, позволяющий выполнить экспериментальную проверку правильности принятых конструктивных решений еще в начальной стадии проектирования и тем самым сократить сроки создания перспективных образцов дробильных систем и уменьшить понесенные при этом материальные и временные затраты.

##### **Цель исследования**

Сотрудниками кафедры механического оборудования заводов черной металлургии Донецкого национального технического университета в результате ранее проведенных исследований была предложена конструкция одновалковой зубчатой дробилки, выгодно отличающейся от известных отечественных аналогов наличием двух решеток, расположенных последовательно и обеспечивающих соответственно осуществление предварительной и окончательной стадий процесса измельчения материала на куски заданного гранулометрического состава. Целью настоящей работы является получение информации, необходимой для обоснования конструктивных и энергосиловых параметров при расчете и проектировании промышленного образца усовершенствованной дробильной системы.

В соответствии с планом эксперимента в ходе лабораторных исследований решаются следующие задачи:

- выполняется проверка работоспособности предложенной дробильной системы;
- определяется характер изменения нагрузок, действующих на привод одновалковой зубчатой дробилки при измельчении материалов различной прочности;
- выдаются рекомендации по проектированию опытно-промышленного образца одновалковой зубчатой дробилки, позволяющей реализовать двухстадийный процесс разрушения агломерата.

### Материальное обеспечение

Для проведения лабораторных экспериментов спроектирован и изготовлен в масштабе 1:10 физический аналог одновалковой зубчатой дробилки, работающей по принципу раскалывания и раздавливания сравнительно мягкого материала. Схема модели дробилки и ее общий вид показаны на рис. 1 и 2.

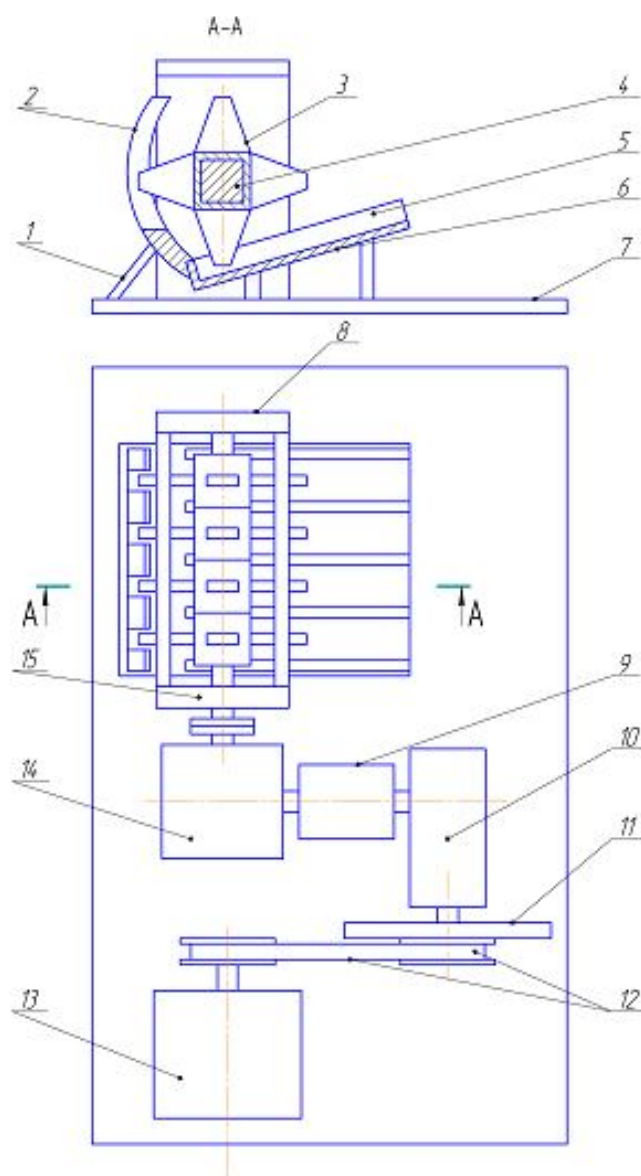


Рисунок 1 – Схема лабораторной одновалковой зубчатой дробилки

В состав модели входит рама 7, на которой размещен установленный в подшипниковых опорах 8, 15 ротор, представляющий собой четырехгранный брус 4 с набором звездочек 3, имеющих по четыре зуба в форме трапеции. Зубья звездочек расположены между колосниками плоской 5 и цилиндрической 2 решеток. Плоская решетка имеет поддон 6 и наклонена под углом  $\alpha$  градусов к горизонтальной плоскости, а расстояние между ее колосниками, выполненных в виде ребер, расположенных в вертикальной плоскости, превышает в 2,5 – 3 раза ширину поперечных прорезей на образующей поверхности цилиндрической решетки. Вращение ротора модели дробилки осуществляется электромеханическим приводом, включающим электродвигатель 13, клиноременную передачу 12, быстроходный двухступенчатый коническо-цилиндрический 10 и тихоходный червячный 14 редукторы. В конструкции привода предусмотрена возможность установки маховика 11, жестко связанного с ведомым шкивом клиноременной передачи, а также специальной муфты 9, соединяющей хвостовики соответствующих валов быстроходного и тихоходного редукторов и снабженной тензорезисторным преобразователем для контроля передаваемого крутящего момента.

Процесс измельчения материала на физической модели исследуемой дробилки протекает в две стадии. Вначале его массив зубья вращающихся звездочек 3 раскалывают на крупные фрагменты, попадающие на поддон 6 наклонной колосниковой решетки 5 и выталкиваемые из него в зону расположения цилиндрической решетки 2. Затем образовавшиеся фрагменты продавливаются через узкие прорези этой решетки, в результате чего образуются куски заданного размера, которые по наклонному склuzu 1 сыпаются в приемный короб.



Рисунок 2 – Физический аналог разработанной одновалковой зубчатой дробилки

Для регистрации в режиме реального времени энергосиловых параметров функционирования привода модели дробилки использовали измерительную систему, включающую специально изготовленный тензорезисторный преобразователь,

четырёхканальный усилитель переменного тока УТЧ – 1 и IBM-компьютер с установленной на его шине платой L-154 12-разрядного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD. Структурная схема контрольно-измерительного комплекса приведена на рис. 3.

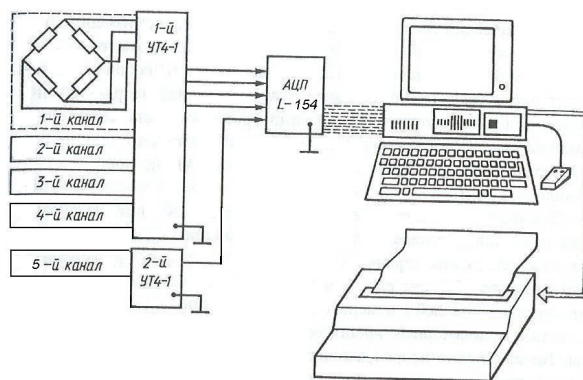
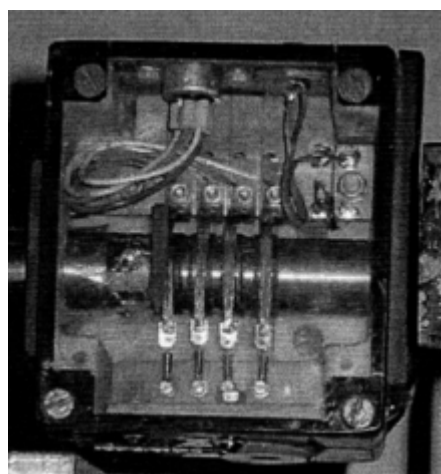
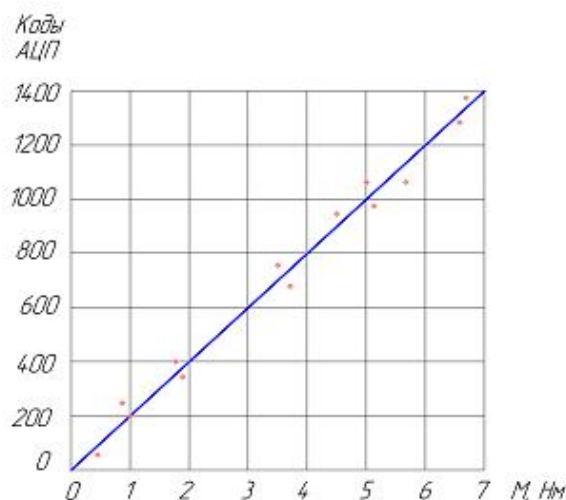


Рисунок 3 - Структурная схема контрольно-измерительного комплекса

Тензорезисторный преобразователь для контроля крутящего момента, преодолеваемого приводом, выполнен с использованием фольговых датчиков с сопротивлением 200 Ом, соединенных по мостовой схеме. Датчики с помощью специального клея закрепили под углом  $45^\circ$  к продольной оси на наружной цилиндрической поверхности металлической гильзы, выполнявшей функцию муфты, соединявшей хвостовики соответствующих валов быстроходного и тихоходного редукторов электромеханического привода. Сама гильза размещена в защитном корпусе с прозрачной крышкой и снабжена кольцами с подпружиненными шинами, обеспечивающими электрическую связь моста преобразователя с усилителем во время вращения гильзы и передачи ею крутящего момента. Конструктивное исполнение преобразователя и график его тарировочной зависимости показаны на рис. 4.



а



б

Рисунок 4 – Конструктивное исполнение (а) и график тарировочной зависимости тензорезисторного преобразователя для контроля крутящего момента (б)

Результаты предварительно выполненной статистической обработки данных тарировки преобразователя свидетельствуют о том, что погрешность измерений, проводимых с его использованием, не превышает 5 %.

### Ход выполнения задания и полученные результаты

При моделировании процесса измельчения материала на одновалковой зубчатой дробилке соблюдали геометрическое и динамическое подобие, что подтверждалось равенством критерия Ньютона для натурального образца и его модели.

$$Ne = P_n / (\rho_n v_n^2 L_n^2) = P_m / (\rho_m v_m^2 L_m^2).$$

В этих выражениях:  $P$  – сила воздействия зуба звездочки на дробимый материал;  $\rho$  – плотность измельчаемого материала;  $v$  – скорость движения головки зуба;  $L$  – расстояние от оси вращения звездочки до точки контакта головки ее зуба с куском материала.

В качестве материала, имитирующего агломерат при моделировании процесса его дробления, было решено использовать пенобетон и пенопласт, так как по комплексу свойств они в наибольшей мере соответствовали условиям эксперимента. Перед его проведением подготовили партию пластин, подлежащих разрушению. Сопоставляемые характеристики материалов, дробимых в промышленных и лабораторных условиях, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения параметров кусков материалов, разрушаемых в условиях производственного процесса и при его физическом моделировании

Параметр	Агломерат	Пенобетон	Пенопласт
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2000 – 2100	1200	30
Предел прочности на сжатие, МПа	0,07 – 0,25	2,4	0,6
Размеры дробимого куска материала, мм	2000 x 1000 x (100 -250)	200 x 100 x (10 – 25)	200 x 100 x (10 –25)

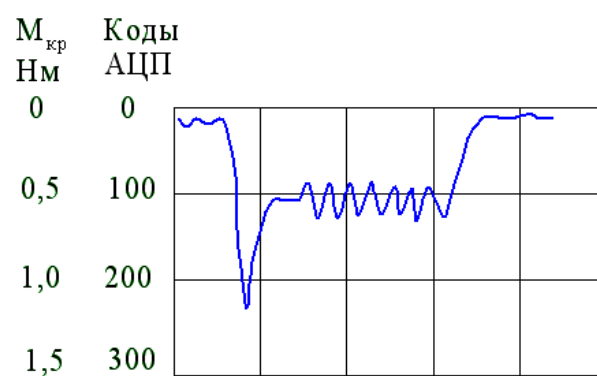
С учетом того, что масштабные множители плотности, линейных размеров и скорости при имитации агломерата пенобетоном и пенопластом соответственно равнялись  $a_\rho = 3,3$  и  $a_\rho = 3,3$ ;  $a_l = 10$ ;  $a_v = a_l^{0,5} = 3,16$ , значения масштабного множителя сил составляли:

$$a_F = a_\rho a_l^2 a_v^2 = 1,65 \cdot 10^2 \cdot 3,16^2 = 1650.$$

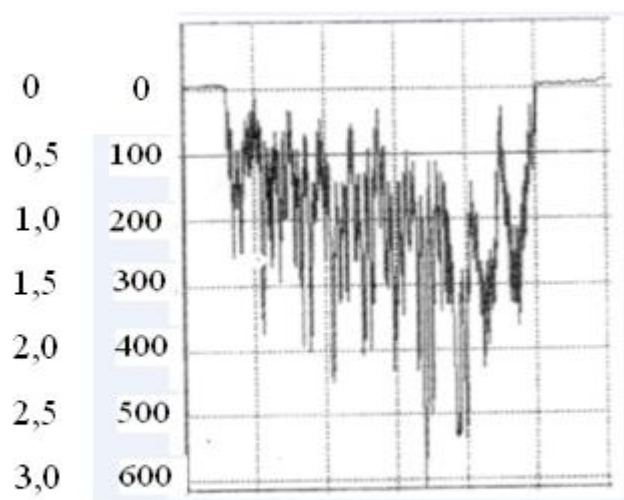
$$a_F = a_\rho a_l^2 a_v^2 = 65 \cdot 10^2 \cdot 3,16^2 = 65000.$$

При измельчении материала контролировали изменение суммарного момента сопротивления вращению ротора дробилки. В процессе функционирования модели дробилки электрический сигнал, поступавший с преобразователя, после усиления и преобразования в цифровой код обрабатывался ПВЭМ по специальной программе, позволяющей выводить на экран монитора его визуальное представление и последующую распечатку на принтере. На рис. 5 показаны характерные виды сигналов, регистрировавшихся при измельчении пенобетона во время контроля крутящего момента, передаваемого муфтой, которая связывала соответствующие валы быстроходного и тихоходного редукторов привода.

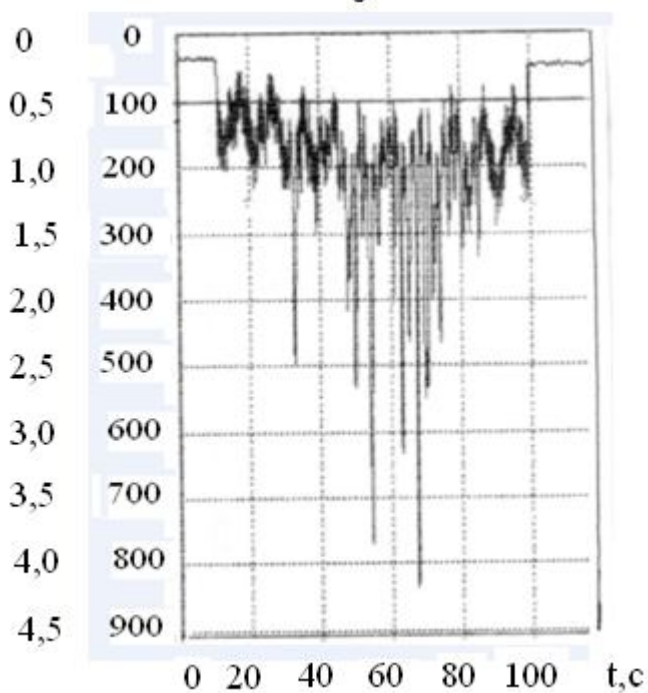
Как видно из визуального представления сигналов, зарегистрированных при моделировании процесса дробления, привод модели дробилки подвергается действию пиковых нагрузок, вызванных кратковременными, чередующимися во времени



а



б



в

Рисунок 5 – Характерный вид регистрировавшихся сигналов при контроле крутящего момента, развиваемого приводом модели дробилки во время холостого хода (а); при разрушении кусков на одной (б) и одновременно на двух (в) решетках

реактивными силами, возникающими в зоне контакта головок зубьев звездочек с пластиной материала в момент ее разрушения на крупные фрагменты и последующего их дробления на куски требуемого размера. Указанный характер изменения технологических нагрузок проявлялся для обоих видов материала, использовавшегося в качестве имитатора измельчаемого агломерата. При этом момент холостого хода и моменты сопротивления вращению ротора со звездочками, обусловленные дроблением материала на первой и второй колосниковой решетках, составляли соответственно 10 - 12, 60 – 65 и 23 – 30 % от суммарного значения крутящего момента, развиваемого приводом модели дробилки.

Для оценки возможности снижения кратковременно действующих на привод перегрузок провели серию измерений преодолеваемых им моментов сопротивления при наличии маховика, вращающегося с различной частотой (от 400 до 1500 об/мин). На рисунке 6 в качестве примера для сравнения показаны форма и характер изменения сигналов, отображающих изменение во времени момента сопротивления, преодолеваемого приводом модели одновалковой зубчатой дробилки при минимальной и максимальной угловых скоростях вращения маховика, установленного на одном валу с ведомым шкивом клиноременной передачи (см. рисунок 1).

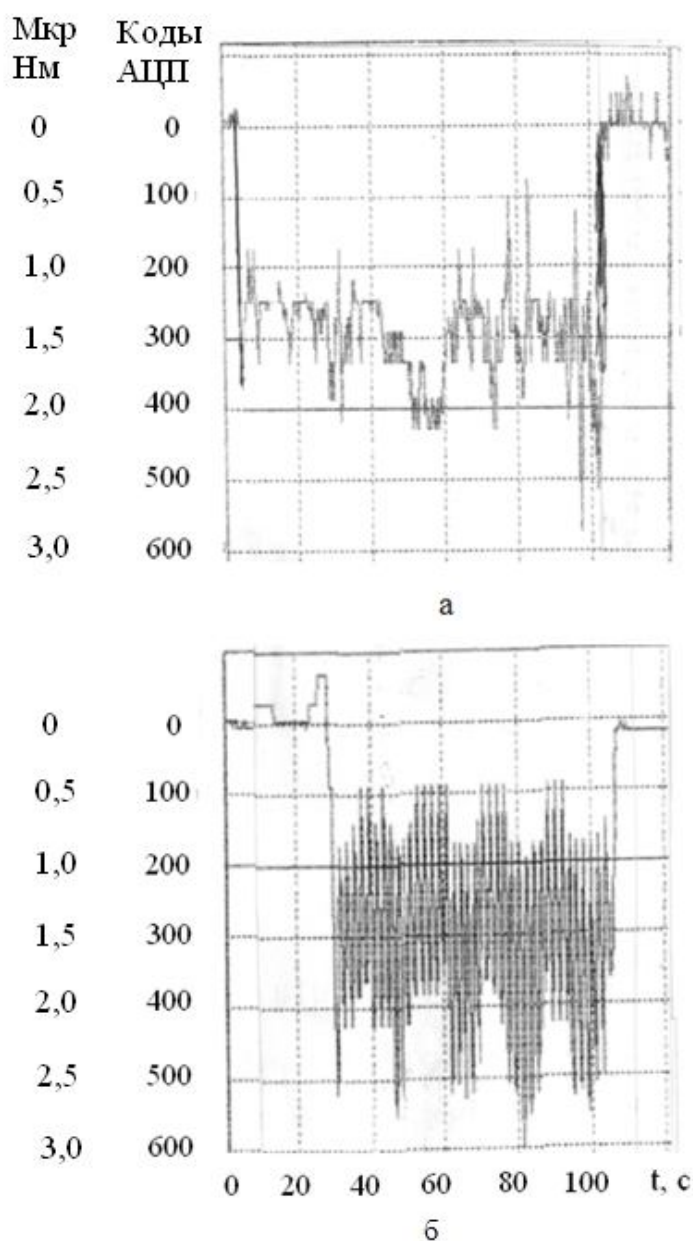


Рисунок 6 – Характер изменения крутящего момента, преодолеваемого приводом модели дробилки при частоте вращения маховика 400 об/мин (а) и 1500 об/мин (б)

Данные измерений свидетельствуют о том, что наличие в приводе маховика, вращающегося с относительно небольшой скоростью, способствует снижению в 2 - 3 раза колебаний нагрузки, действующей на приводной двигатель модели дробилки (рисунки 5 а, б и 6 а). В случае работы привода модели дробилки с быстро вращающимся маховиком наряду со снижением амплитуды колебаний технологической нагрузки возникала высокочастотная вибрация (рисунок 6 б). Поэтому применение маховика в приводе одновалковой зубчатой дробилки может усложнить ее эксплуатацию и обслуживание из-за необходимости строгого контроля и обеспечения динамической уравновешенности механической системы.

Качественную и количественную оценку эффективности двухстадийного процесса дробления материала, реализуемого с помощью исследуемой дробилки, выполнили путем сравнения формы и размеров кусков, образующихся при разрушении целостных пластин пенобетона и пенопласта (рисунок 7 а) после последовательного прохождения ими плоской и цилиндрической колосниковых решеток (рисунок 7 б), а также контролируя на выходе гранулометрический состав дробленой массы материала (данные таблицы 2).

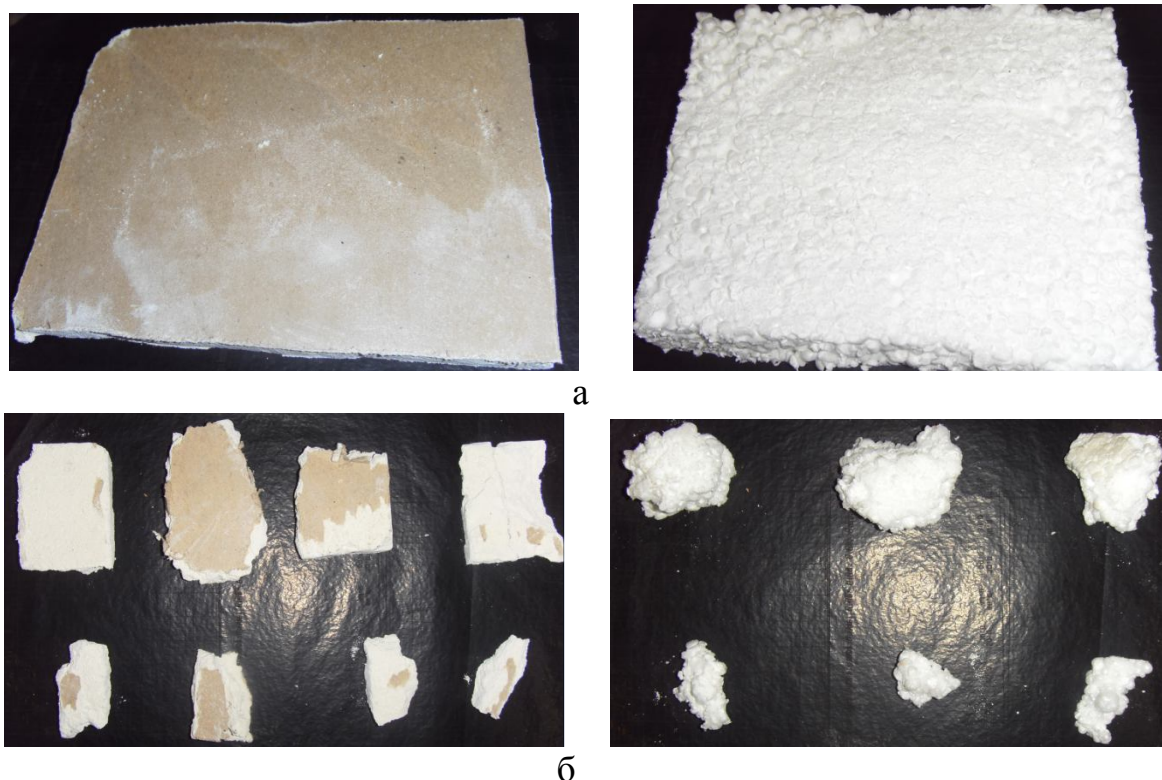


Рисунок 7 – Пластины материала (слева пенобетон, справа пенопласт), использовавшиеся при моделировании двухстадийного процесса дробления (а), и куски, образующиеся после прохождения первой и второй колосниковых решеток (б)

Таблица 2 – Процентное содержание по массе фракций дробленых материалов, полученное на модели дробилки при ширине щели ее цилиндрической колосниковой решетки 10 мм

Измельчаемый материал	Размеры кусочков материала в дробленой массе, мм						
	более 10	10 - 6	6 - 4	4 - 2	2 - 1	1 – 0,5	менее 0,5
Пенобетон	8	10	15	25	20	12	10
Пенопласт	10	15	20	20	17	10	8

В соответствии с информацией, приведенной в таблице 2, полученное на модели дробилки суммарное процентное содержание кусочков материала, размеры которых с учетом принятого линейного масштаба  $a_l = 10$  не выходят за оптимальные пределы, соответствующие условиям производства (5 – 50 мм), для пенобетона и пенопласта составляло соответственно 72 и 67%, а доля мелкой (нежелательной) фракции не превысила 10%. Указанные показатели распределения фракционного состава материала, подвергнутого измельчению на физическом аналоге одновалковой зубчатой дробилки, могут быть достигнуты и на ее реальном образце, поскольку модельные исследования подтвердили правильность принятых технических решений по конструктивному исполнению предлагаемой дробильной системы. Кроме того, используя измеренные значения моментов сопротивления вращению ротора модельной дробилки, определили силы, действующие на головки зубьев звездочек при разрушении ими целостности пластин материалов, имитировавших агломерат. Затем на основании рассчитанных масштабных множителей сил  $a_F = 1650$  и  $a_F = 65000$  соответственно для пенобетона и пенопласта оценили возможные нагрузки на рабочие органы опытного образца предложенной дробилки, имеющей две колосниковые решетки. По данным пересчета, значение силы, действующей на головку зуба звездочки с наружным диаметром 1300мм при толщине слоя агломерата 250 мм, будет находиться в пределах 23 – 30 кН. Для сравнения следует отметить, что указанная сила, измеренная в производственных условиях, составила 25, 46 кН.

## **Выводы**

1. Одним из путей дальнейшего совершенствования конструкций одновалковых зубчатых дробилок, направленного на повышение качества производимого агломерата, является разработка дробильных систем, позволяющих реализовать двухстадийный процесс дробления аглоспека.
2. Оборудование одновалковой зубчатой дробилки двумя, последовательно расположенными колосниковыми решетками, одна из которых выполнена плоской, а вторая цилиндрической, позволяет стабилизировать фракционный состав дробленого материала и довести до 67 – 72% долю его кусков, размеры которых находятся в оптимальных пределах, а количество нежелательной мелочи снизить до 10%
3. Во время работы усовершенствованного дробилки момент холостого хода и моменты сопротивления вращению ротора со звездочками, обусловленные дроблением материала на первой и второй колосниковой решетках, составляют соответственно 10 - 12, 60 – 65 и 23 – 30 % от суммарного значения крутящего момента, развиваемого приводом дробильной системы.
4. Результаты выполненных исследований процесса измельчения материалов на модели одновалковой зубчатой дробилке могут быть использованы при расчете и конструировании перспективных образцов оборудования данного класса.

**Рекомендуемая литература: [2, 41, 44, 50, 75, 83].**

## **Лабораторная работа № 2**

### **Исследование на физической модели работы двухвалкового пресса для брикетирования угольной пыли**

#### **Постановка задачи**

Процессу брикетирования в настоящее время проявляется повышенное внимание, что обусловлено возможностью переработки с малыми затратами отходов, образующихся в значительных количествах на ряде производств горно-металлургического комплекса

(угольная пыль, отсеvy кокса, извести и ферросплавов). При этом в качестве технологического агрегата, предназначенного для получения брикетов, наибольшее распространение получили двухвалковые прессы, превосходящие по таким критериям, как эксплуатационные расходы и габариты, штемпельные и кольцевые прессовые системы.

Накопленный отечественный и зарубежный опыт конструирования и изготовления двухвалковых прессов касается стационарных агрегатов, имеющих валки диаметром от 600 до 1400 мм, а также привод для их вращения мощностью 30 – 600 кВт. При этом масса прессов находится в пределах 6 – 80 т. Такое прессовое оборудование входит в состав технологических комплексов, сооружаемых вблизи или на территории крупных предприятий и обеспечивающих переработку отходов производства в количестве 40 – 600 тыс. т в год.

Вместе с тем в последние годы увеличивалось количество малых заводов и фабрик, на которых отходы производства из-за отсутствия мест хранения утилизируют путем сжигания, что приводит к выбросу в атмосферу вредных продуктов сгорания. Как показали расчеты, строительство участков для централизованной переработки горючих твердых отходов мини-производств, расположенных на значительном удалении, нельзя признать экономически целесообразным из-за высоких транспортных расходов. Альтернативным решением отмеченной проблемы может стать применение систем прессования небольшой производительности, которые позволяют сравнительно легко осуществить их транспортировку к месту переработки накопившихся материалов.

На кафедре механического оборудования заводов черной металлургии Донецкого национального технического университета была предложена идея разработки малогабаритного двухвалкового пресса мобильного базирования, предназначенного для получения топливных брикетов из различных отходов материалов по мере их накопления на участках различных производств. С использованием такого передвижного комплекса можно обеспечить поочередное обслуживание предприятий-заказчиков, расположенных на территории одной или нескольких соседних областей, и тем самым устранить транспортные расходы, связанные с доставкой сырья к месту реализации процесса их брикетирования.

Главными ограничениями, с которыми пришлось столкнуться в начале конструирования подобной прессовой системы, явились ее предельные масса и габариты. Из теории прессования известно, что основополагающим параметром пресса, от которого зависят его масса, размеры, мощность привода и производительность, является диаметр валков. В связи с этим путем масштабного пересчета установлено, что для размещения пресса в стандартном автоприцепе, предназначенном для транспортировки груза массой до 7 т, диаметр его валков не должен превышать 300 мм. Поэтому данное значение диаметра вала было принято в качестве исходного параметра при расчете и конструировании малогабаритной прессовой системы мобильного базирования.

Несмотря на то, что за прошедшие три десятилетия в отечественной и зарубежной технической литературе опубликовано немало работ, посвященных созданию высокоэффективных конструкций валковых прессов, до настоящего времени не разработана универсальная и достаточно точная методика расчета их основных энергосиловых параметров, а это вызывает необходимость проведения предварительных экспериментальных исследований при проектировании нового образца пресса, предназначенного для переработки конкретного материала.

## **Цель исследования**

Целью исследования является экспериментальная проверка правильности принятых технических решений еще в начальной стадии проектирования и количественная оценка энергосиловых параметров привода малогабаритного двухвалкового пресса, обеспечивающих получение качественных угольных брикетов.

## Материальное обеспечение

Физическое моделирование процесса брикетирования угольной пыли проводили с использованием лабораторного образца двухвалкового пресса, конструктивная схема и общий вид которого показаны на рисунке 1 и 2. Он включает рабочую клетку (рисунок 1), состоящую из двух станин 1 открытого типа, связанных между собой крышкой 5. Внутри клетки размещены два вала 3, установленные в подшипниковых опорах 4, корпуса которых имеют возможность относительного перемещения вдоль направляющих станин. На цилиндрической поверхности каждого из валков в средней её части выполнены ячейки 2, при смыкании которых во время синхронного вращения валков, кратковременно образуются полости для формирования брикетов. Синхронизация вращения валков обеспечена зубчатыми колёсами 6, установленными вблизи одной из подшипниковых опор и находящимися в зацеплении. Опора ведущего валка зафиксирована относительно станин и он снабжен цапфой для передачи крутящего момента. Его вращение осуществляет привод, состоящий из электродвигателя 9, быстроходного двухступенчатого конического – цилиндрического редуктора 8 и тихоходного червячного редуктора 7.

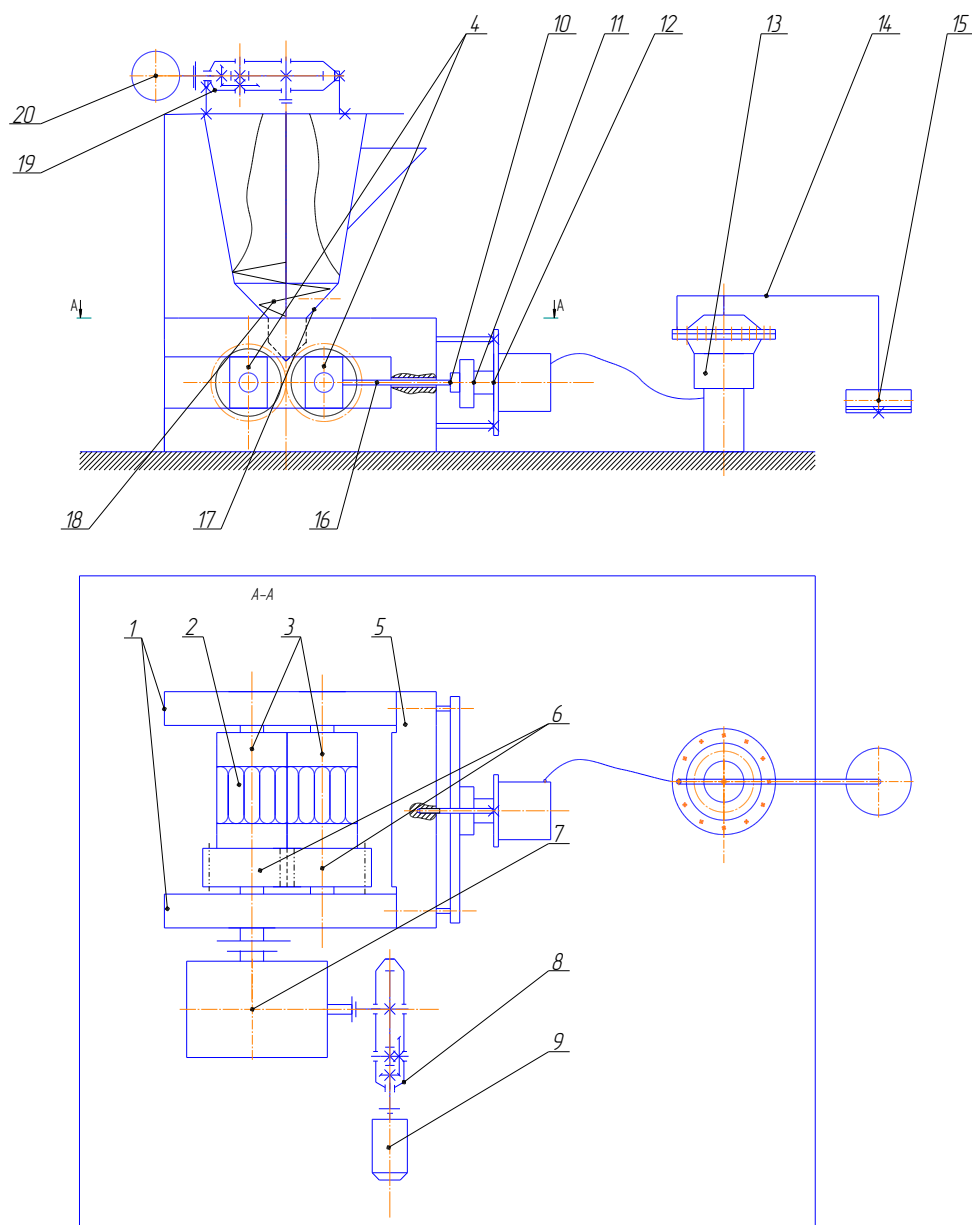


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки двухвалкового пресса для брикетирования вторичных материалов

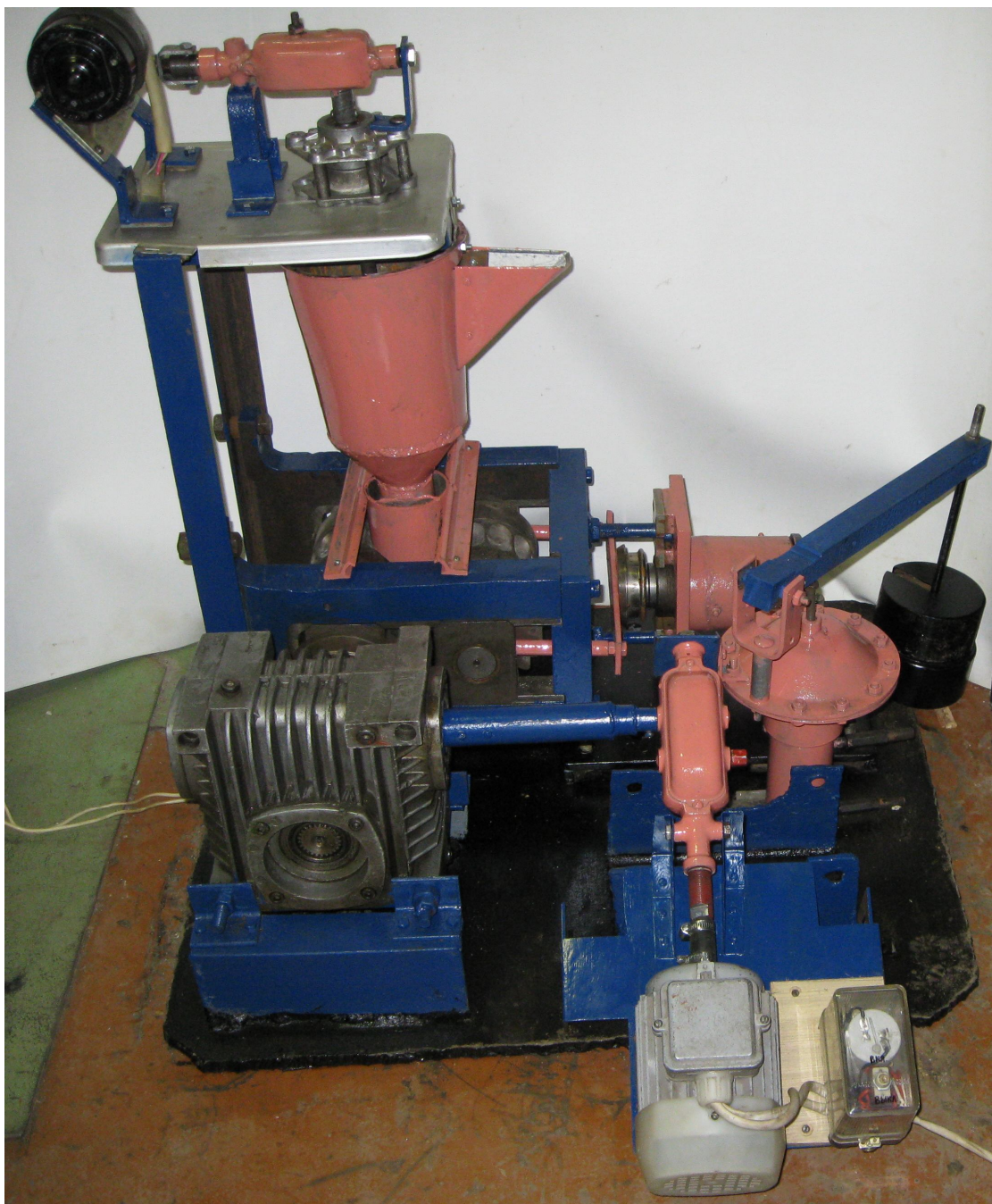


Рисунок 2 – Экспериментальный образец двухвалкового брикетного пресса

Для прижатия ведомого валка к ведущему пресс оборудован гидравлической системой, включающей напорный 13 и силовой 12 гидравлические цилиндры, рабочие полости которых связаны между собой трубкой. Избыточное давление жидкости в напорном цилиндре обеспечивается комплектом грузов 15, создающих нагрузку на его шток через рычаг 14. Шток силового цилиндра 12 через траверсу 11 воздействует на стержни 16, установленные в каналах крышки клетки и свободными концами упирающиеся в подушки подшипниковых опор ведомого валка. Гидравлическая система не только позволяет регулировать силу прижатия валков за счёт изменения количества (массы) навешиваемых на рычаг грузов, но и предотвращает выход из строя синхронизирующих зубчатых колёс в случае попадания между валками посторонних предметов, поскольку даёт возможность при возникновении опасных распорных усилий разомкнуть зубчатое зацепление.

Пресс снабжён также устройством предварительной подпрессовки исходного материала брикетов. Данное устройство размещено на клетке и состоит из приёмного бункера

17, имеющего форму усечённого конуса и соосно установленного над валками в зоне смыкания их ячеек. Внутри бункера в нижней его части на вертикальном валу закреплён шнек 18, имеющий коническую форму. Вращение вала со шнеком обеспечивает привод, который состоит из червячного мотор – редуктора 20 и тихоходного двухступенчатого коническо – цилиндрического редуктора 19.

Форму ячеек на валках (рисунок 3) выбрали из условия обеспечения гарантированного выхода брикета при их раскрытии, для чего в углублениях исключили элементы с вертикальной поверхностью.

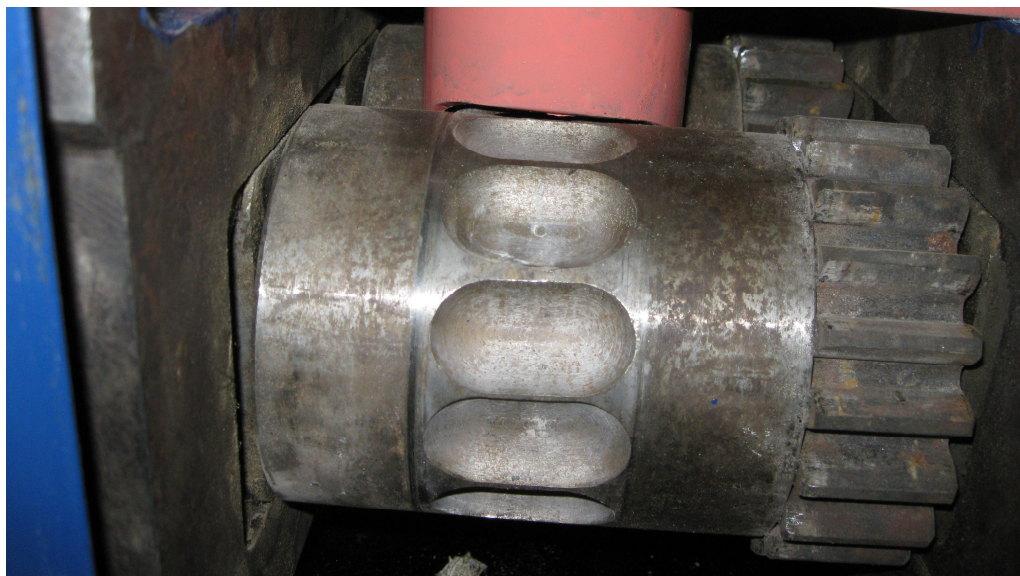


Рисунок 3 – Форма ячеек на поверхности вала пресса

Для контроля в режиме реального времени энергосиловых параметров функционирования пресса использовали измерительную систему, включающую два специально изготовленных тензорезисторных преобразователя, четырехканальный усилитель переменного тока УТЧ – 1 (ТУ 25.06.1377-82) и IBM-компьютер с установленной на его шине платой L-154 12-разрядного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD. Структурная схема контрольно-измерительного комплекса приведена на рисунке 4.

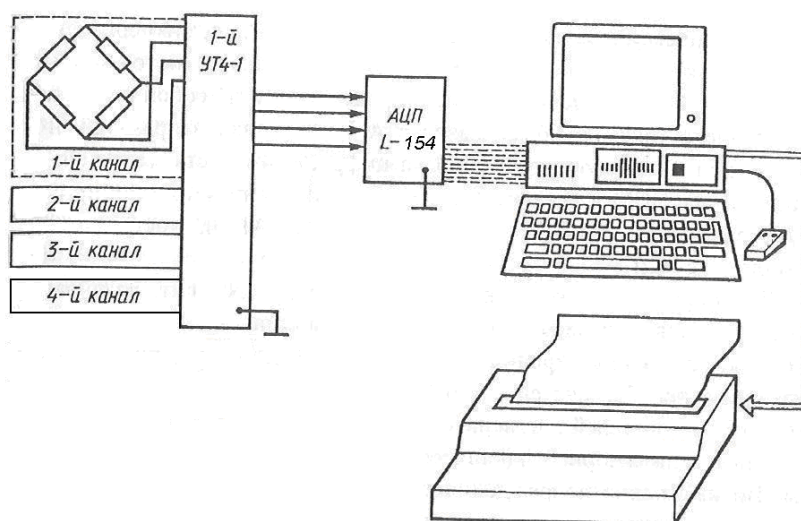
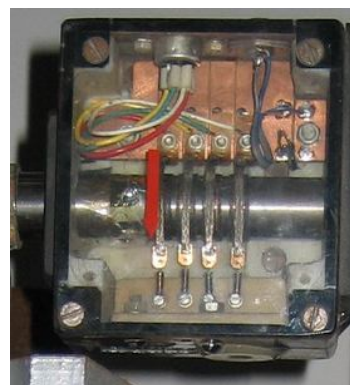
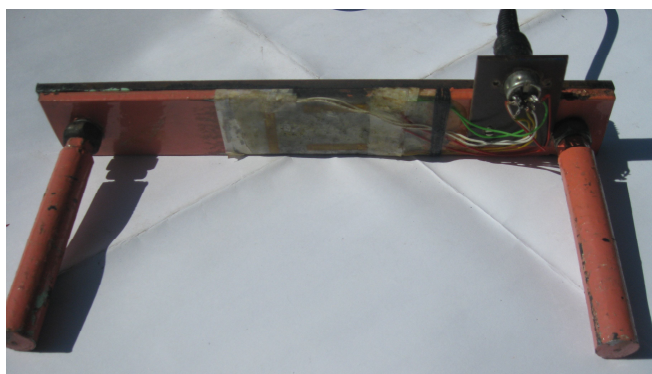
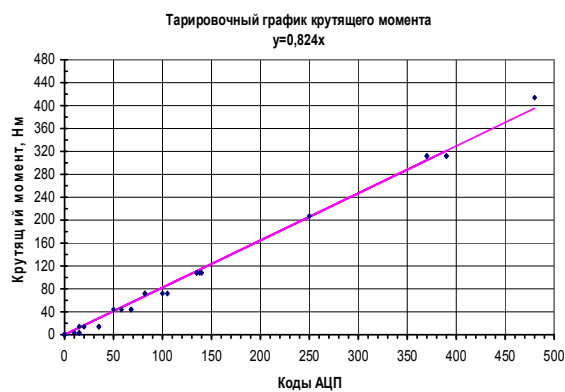


Рисунок 4 – Структурная схема контрольно-измерительного комплекса

Оба тензорезисторных преобразователя, один из которых предназначен для фиксирования силы прижатия валков пресса, а другой – для контроля соответствующего ей крутящего момента, преодолеваемого приводом, были выполнены с использованием фольговых датчиков с сопротивлением 200 Ом, соединенных по мостовой схеме. В первом случае 4 датчика (два рабочих и два компенсационных) с помощью специального клея закрепили на одной из плоскостей траверсы, передающей усилие подшипниковым подушкам ведомого валка пресса от штока силового гидроцилиндра, а во втором - под углом  $45^\circ$  к продольной оси на наружной цилиндрической поверхности металлической гильзы, выполнявшей функцию муфты, соединявшей хвостовики соответствующих валов быстроходного и тихоходного редукторов электромеханического привода. Сама гильза размещена в защитном корпусе с прозрачной крышкой и снабжена кольцами с подпружиненными шинами, обеспечивающими электрическую связь моста преобразователя с усилителем во время вращения гильзы и передачи ею крутящего момента. Конструктивное исполнение обоих преобразователей и графики их тарировочных зависимостей показаны на рисунке 5.



а



б

Рисунок 5 – Конструктивное исполнение и графики тарировочных зависимостей применяемых тензорезисторных преобразователей для контроля силы прижатия валков (а) и преодолеваемого приводом момента сопротивления (б)

Результаты предварительно выполненной статистической обработки данных тарировки преобразователей свидетельствуют о том, что погрешность измерений, проводимых с их использованием, не превышает 5 %.

## Ход выполнения задания и полученные результаты

В соответствии с планом эксперимента лабораторные исследования проводят в следующей последовательности:

- определяется влияние фракционного состава и насыпной плотности прессуемого материала на нагрузки, преодолеваемые приводом пресса;
- устанавливается соотношение параметров работы приводов вращения валков пресса и шнека подпрессовщика, обеспечивающее стабильность процесса брикетирования и качественное формообразование брикетов;
- выявляется минимально допустимую концентрацию связующего вещества, при которой достигается требуемая прочность брикетов.

Исходным материалом для получения топливных брикетов служил отсеянный каменный уголь, а в качестве связующего по рекомендациям работы использовали битум, концентрацию которого варьировали в пределах 5 – 15%.

Перед проведением экспериментов с использованием сит с различным размером ячеек подготовили три партии отсева угля следующего фракционного состава: 0,1- 0,5 мм; 0,6 – 1,5 мм; 1,6 - 3 мм. Из каждой партии отсева поочередно отбирали по три порции материала, в каждую из которых добавляли расчетное количество связующего и образовавшуюся смесь подвергали тепловому воздействию с одновременным тщательным перемешиванием. Основные характеристики смесей приведены в таблице 1.

Таблица 1- Характеристика брикетируемых смесей

№ порции материала	Фракционный состав материала, мм	Масса порции материала, кг	Масса связующего, кг	Концентрация связующего в получаемом брикете, %
1	0,1 - 0,5	1,425	0,075	5
2		1,350	0,150	10
3		1,275	0,225	15
4	0,6 – 1,5	1,425	0,075	5
5		1,350	0,150	10
6		1,275	0,225	15
7	1,6 - 3	1,425	0,075	5
8		1,350	0,150	10
9		1,275	0,225	15

Используя смеси различного состава, на лабораторном прессе получали брикеты и одновременно контролировали изменение силы валков и суммарного момента сопротивления их вращению. В процессе функционирования пресса электрические сигналы, поступавшие с обоих преобразователей по экранированным кабелям, после усиления и преобразования в цифровой код обрабатывались в ПК по специальной программе, позволяющей выводить на экран монитора их визуальное представление и последующую его распечатку на принтере. На рисунке 6 показан характерный вид регистрировавшихся сигналов.

Результаты анализа зафиксированных сигналов, характеризующих суммарное распорное усилие, действующего на валки, и соответствующий ему момент сопротивления, преодолеваемый приводом при их вращении, показали, что значения обоих контролируемых параметров после захвата ячейками валков материала по мере его уплотнения синхронно увеличиваются и достигают своего максимума при смыкании ячеек на линии центров. Зарегистрированные максимальные значения распорных усилий и крутящих моментов зависят от фракционного состава материала брикетов (данные таблицы 2).

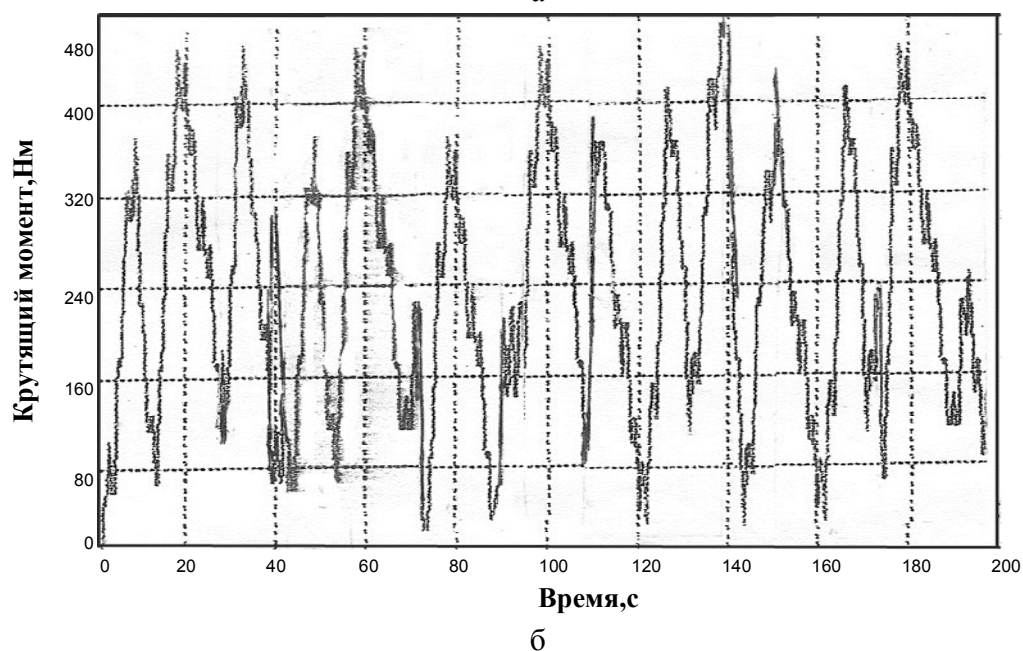
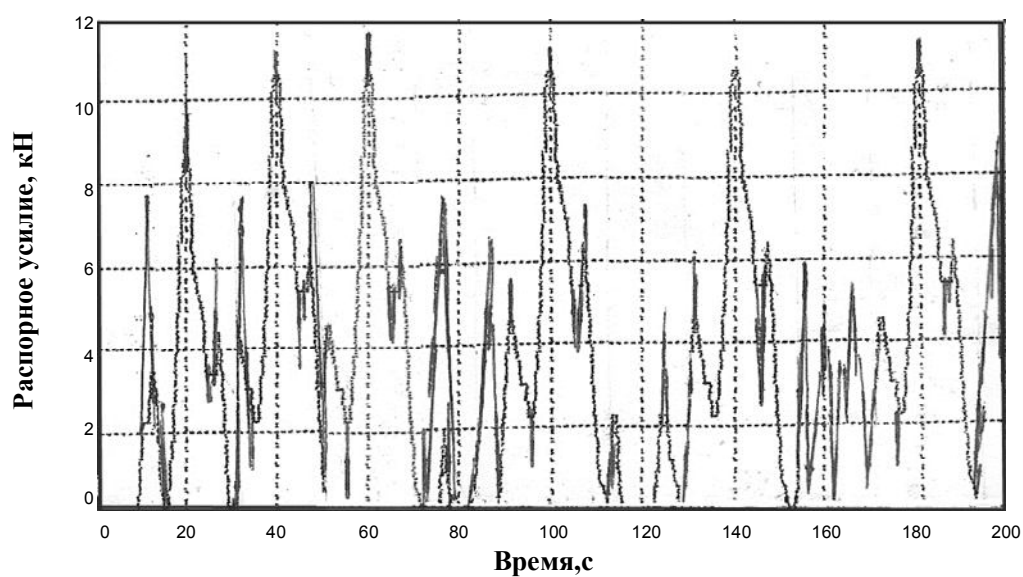


Рисунок 6 - Характерный вид регистрировавшихся сигналов при контроле распорного усилия на валки (а) и соответствующего ему крутящего момента, преодолеваемого приводом прессы (б)

Таблица 2 – Значения распорного усилия  $F_p$ , действующего на валки прессы, и крутящего момента  $M_{кр}$ , преодолеваемого его приводом в процессе брикетирования

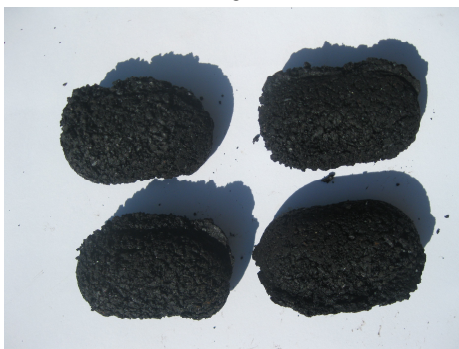
Фракционный состав прессуемого материала, мм	$F_p$ , Н		$M_{кр}$ , Н·м	
	Пределы изменения	Усредненное значение	Пределы изменения	Усредненное значение
0,1 – 0,5	6,5 - 10	8,25	220 – 280	250
0,6 – 1,5	7 – 10,5	8,75	250 - 300	275
1,6 – 3,0	8 -12	10	360 - 480	440



а



б



в

Рисунок 7 – Внешний вид брикетов, полученных при различных условиях прессования  
а) при недостаточной производительности подпрессовщика;  
б, в) при согласованной работе приводов валков и подающего шнека;

## Выводы

При увеличении размеров частиц прессуемого материала для получения кондиционных брикетов требуется преодоление приводом прессовой системы больших распорных усилий и крутящих моментов сопротивлений, действующих на ее валки.

Качество формообразования получаемых брикетов в значительной мере зависит от согласованности режимов функционирования механизмов вращения валков пресса и шнекового подпрессовщика. Как показали наблюдения, брикеты строго заданной формы (рисунок 7 б, в) можно получить только при соответствии производительности обоих механизмов прессовой системы. Если производительность, обеспечиваемая вращающимися валками превышает производительность шнекового подпрессовщика, резко увеличивается количество некондиционных брикетов (рисунок 7 а). С другой стороны, превышение количества смеси, подаваемой в единицу времени шнеком в зону прессования, более, чем в 1, 2 раза по отношению к производительности пресса, приводит в конечном счете к образованию «пробки» в нижней части конического бункера и заклиниванию шнека. Наряду с этим также установили, что максимальную производительность пресса следует назначать из условия достижения значения времени обжата (прессования)  $t_{пр} > 0,5$  с.

**Рекомендуемая литература [4, 13, 46, 53, 56, 57, 64, 90].**

### Лабораторная работа № 3

#### Основные способы удержания шлака в кислородном конвертере во время выпуска стали и оценка их эффективности с использованием физических моделей

##### Постановка задачи

Технико-экономические показатели производства конвертерной стали по современной технологии, предполагающей получение качественного металла за счет комплексной обработки расплава на установках "ковш-печь", в немалой степени зависят от того, насколько успешно в цехе решена задача снижения количества высокоокисленного шлака, попадающего в разливочный ковш во время выпуска плавки.

Положительный опыт зарубежных компаний, использовавших на протяжении последних десяти лет технические разработки, обеспечивающие бесшлаковый выпуск стали из кислородного конвертера, свидетельствует о том, что отсечка конечного шлака способствует снижению степени рефосфорации, уменьшению угара ферросплавов и раскислителей, а также повышению срока службы футеровки разливочных ковшей. Устраняемые при этом потери, по оценкам специалистов, составляют 1,5 доллара США на тонну выплавляемой стали.

На металлургических предприятиях Украины к технологии отсечки конвертерного шлака проявили интерес лишь в настоящее время, что связано с ужесточением конкуренции на рынке качественного металла. Вниманию представителей отечественных заводов, изучающих технико-коммерческие предложения на поставку оборудования, позволяющего активно влиять на объем шлакового расплава, вытекающего в разливочный ковш в заключительной стадии процесса выпуска стали из кислородного конвертера, фирмами-производителями предоставляется достаточно широкий выбор образцов устройств подобного типа.

Так, Швейцарская фирма Stopinc AG совместно с германской фирмой RHI Refractories GmbH разработала и успешно внедрила на металлургическом предприятии фирмы Salzgitter AG скользящий затвор, устанавливаемый на корпус конвертера и перекрывающий его выпускной канал по команде, поступающей от системы раннего обнаружения шлака в потоке стали, истекающей в ковш.

Стопорная система австрийской фирмы Voest-Alpine Industrieanlagenbau также позволяет в нужный момент осуществить запираание летки конвертера, однако путем динамического воздействия на струю стали потоком инертного газа, поступающего из сопла, установленного в пробке, которая размещена на поворотном рычаге.

Английская фирма Monosop разработала несколько вариантов манипуляторов, предназначенных для ввода в сталевыпускной канал конвертера специальных отсечных элементов поплавкового типа, блокирующих его в заключительной стадии схода жидкого металла в разливочный ковш.

Эффективность применяемых указанных способов активного влияния на процесс перетекания шлакового расплава в ковш в заключительной стадии выпуска плавки во многом определяется техническими возможностями механических систем, предназначенных для реализации технологических приемов по отсечке высокоокисленного шлака. За последнее десятилетие в отечественной и зарубежной технической литературе опубликовано немало работ, авторы которых оценивали достоинства и недостатки существующих схем регулирования движения шлаковых и металлических потоков в выпускном канале кислородного конвертера. Высказанные при этом мнения нельзя в полной мере считать достаточно объективными, поскольку оценка достигаемых технико-экономических показателей выполнялась без учета различий и особенностей условий применения предлагаемых систем, обеспечивающих бесшлаковый выпуск стали (производительность кислородного конвертера, необходимость использования дополнительного оборудования и

контрольно-измерительных средств, трудоемкость обслуживания и эксплуатации). Кроме того, в приведенных публикациях, посвященных изучаемой проблеме, практически отсутствует информация о характере процессов, протекающих в жидкой ванне плавильного агрегата и оказывающих существенное влияние на полноту задержки в нем конечного шлака, срок службы рабочих элементов и применяемых при этом отсечных систем, а это в конечном счете и определяет получаемый положительный результат проводимых мероприятий по повышению эффективности производства качественной стали.

## **Цель исследования**

Целью исследования является выполнение сопоставительного анализа особенностей применения известных систем отсечки конвертерного шлака по результатам, полученным в одних и тех же условиях реализации технологии бесшлакового выпуска стали.

## **Материальное обеспечение**

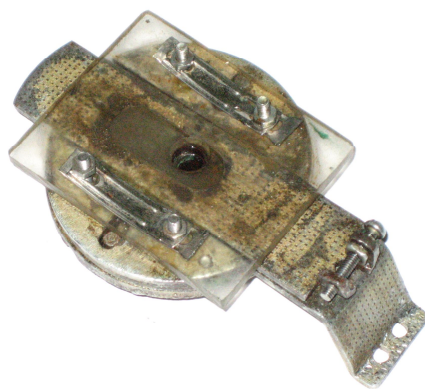
Для изучения особенностей гидродинамики потоков расплава и их взаимодействия в характерных зонах ванны конвертера при различных углах его поворота во время слива металла, а также поведения слоя шлака на границе раздела с жидкой сталью и в выпускном канале агрегата в момент его запираания по каждому из известных способов необходимо иметь соответствующий лабораторный комплекс, включающий набор моделей, контрольно-измерительную аппаратуру и средства видеозаписи.

При исследованиях использованы изготовленные в масштабе 1:10 действующие модели 160-тонного кислородного конвертера и механических систем (фото на рис.1), позволяющих имитировать различные варианты оставления конечного шлака в ванне плавильного агрегата во время выпуска из него жидкой стали в разливочный ковш: с применением шиберного затвора, устройства газодинамической отсечки, а также, элементов, блокирующих выпускной В качестве жидкостей, моделирующих металлический и шлаковый расплавы, использовали насыщенный водный раствор соли и очищенный керосин с плотностью  $1,2 \text{ кг/м}^3$  и  $0,8 \text{ кг/м}^3$  соответственно.

В состав модели шиберного затвора (рис.1 а), устанавливаемого соосно с выпускным каналом модели кислородного конвертера на ее корпусе, входила неподвижная и подвижная металлические обоймы с размещенными в них плитами, отверстия в которых при совмещении не препятствовали истечению жидкостей, имитирующих сталь и шлак в процессе выпуска плавки. В зависимости от смещения подвижной плиты относительно неподвижной обеспечивалось частичное или полное перекрытие выпускного канала модели плавильного агрегата.

Модель устройства газодинамической отсечки конвертерного шлака (рис.1 б) включала базовую плиту с размещенным на ней силовым пневмоцилиндром, приводящим в действие через ускоряющую зубчатую передачу поворотный рычаг, несущий на конце пробку с центральным соплом для вдувания сжатого газа, подводимого по гибкому шлангу в металлической оплетке. Устройство монтировали на корпусе модели кислородного конвертера с таким расчетом, чтобы пробка при повороте несущего рычага из исходного положения в рабочее центрировалась относительно выпускного канала модели агрегата.

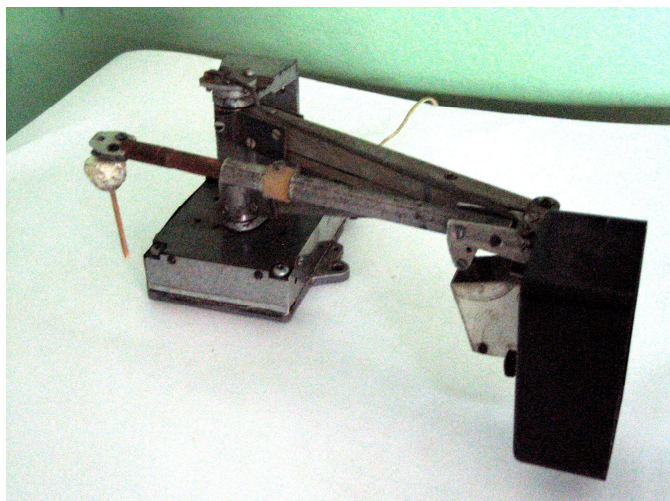
Подачу в полость модели кислородного конвертера и сброс в зону его выпускного канала имитатора отсечного элемента, выполненного в виде головки с центрирующим стержнем, осуществляли с помощью манипулятора (рис. в), который включал вертикальную колонну, установленную в неподвижных подшипниковых опорах, снабженную механизмом поворота и консолью для удержания в вертикальном положении отсекающего поплавкового типа.



а



б



в

Рисунок 1 - Действующие физические модели устройств для исследования процесса отсечки конвертерного шлака:  
а – скользящего затвора; б – стопорной системы газодинамического воздействия; в – манипулятора для ввода отсечных элементов поплавкового типа

## Ход выполнения задания и полученные результаты

В ходе лабораторных экспериментов с использованием перечисленных модельных систем выполнили качественную оценку эффективности различных способов отсечки шлака по следующим критериям:

- возможности предотвращения попадания шлакового расплава в канал кислородного конвертера в различных стадиях процесса выпуска стали;
- степени влияния системы отсечки на характер поведения потоков металла и шлака в области жидкой ванны конвертера, прилегающей к входному отверстию его выпускного канала;
- необходимости применения дополнительных технических средств, обеспечивающих повышение эффективности работы всей отсечной системы;
- потребности в расходуемых материалах и организации специализированных участков или мастерских по ремонту и обслуживанию.

Для получения информации, позволяющей выполнить сопоставительный анализ по указанным критериям, во время моделирования исследуемых способов отсечки конвертерного шлака использовали видеосъемку с помощью камеры, позволяющей осуществлять просмотр отснятого материала в режиме «стоп-кадр» и получать изображение ванны модели конвертера в строго фиксированные моменты времени.

На фотоснимках, приведенных на рис.2, зафиксированы характерные картины расположения слоев жидкостей, имитирующих сталь и шлак, в различных стадиях процесса моделирования выпуска металла из кислородного конвертера, оборудованного скользящим затвором.

В соответствии с принятой на практике последовательностью выполнения технологических приемов по отсечке шлака с использованием шиберного затвора, его канал перед началом слива металла должен быть закрытым, что позволяет избежать попадания в разливочный ковш порции шлакового расплава в момент прохождения его слоя через зону, в которой расположено входное отверстие выпускного канала конвертера (рис. 2 а).

Как показал визуальный контроль, после поворота корпуса конвертера на угол, соответствующий началу выпуска металла, перед открытием затвора необходимо выдержать паузу длительностью 5 секунд, в течение которой моделирующая шлак жидкость, попавшая в верхнюю часть выпускного канала, отделенную подвижной шиберной плитой, всплывает на поверхность раздела со слоем воды (рис. 2 б) и не перетекает в разливочный ковш. Такой прием рекомендуется выполнять и в производственных условиях.

При реализации данного варианта бесшлакового выпуска стали из кислородного конвертера очень важно также зафиксировать момент начала образования в жидкой ванне воронки, затягивающей частицы шлака в выпускной канал (рис. 2 в), и осуществить как можно быстрее его перекрытие в заключительной стадии процесса выпуска плавки (рис. 2 г). Поэтому использование скользящего затвора в качестве системы отсечки конечного технологического шлака предполагает не только наличие высокочувствительной контрольно-измерительной аппаратуры раннего обнаружения шлаковых включений в струе истекающего в ковш металла, от которой должна своевременно поступать команда на закрытие затвора, а и достаточно мощного привода, способного незамедлительно ее отработать. При этом сам привод следует размещать ниже опорного кольца корпуса кислородного конвертера. В противном случае силовой агрегат привода будет подвержен интенсивным тепловым нагрузкам, отрицательно влияющим на его работоспособность.

Эксплуатация такой системы, естественно, требует выполнения соответствующего объема работ, связанных с заменой изношенных огнеупорных изделий и ремонтом ее



а



б



в



г

Рисунок 2 - Положение слоя имитатора шлака в различных стадиях процесса его отсечки с помощью скользящего затвора

механической, гидравлической или пневматической части в зависимости от типа применяемого привода. Для обслуживания затвора, имеющего значительную массу, в распоряжении персонала должна быть самодвижущаяся транспортная система, снабженная манипулятором, а также оборудованная мастерская.

Работа устройства, обеспечивающего торможение потока расплава в выпускном канале кислородного конвертера путем создания встречного скоростного напора газовой струи, истекающей из сопла пробки, практически мгновенно запирающей снаружи канал, сопровождается газо-гидродинамическими явлениями, которые негативно влияют на техническое состояние задействованного при этом оборудования. В начальный момент динамического газового воздействия на истекающую из выпускного канала струю расплава происходит внезапное ее разрушение, сопровождающееся образованием большого количества капель, имеющих различное направление и траекторию полета. Поэтому все элементы системы газодинамической отсечки шлака (рычаги, трубопроводы, силовой пневмоцилиндр) должны иметь надежную защиту в виде металлических экранов от теплового излучения и брызг жидкой стали.

Во время поворота конвертера необходимо до момента подхода слоя шлакового расплава к выпускному каналу, который наступает при угле наклона 45-50 (рис. 3 а), ввести в действие стопорную систему (включить подачу газа и перекрыть пробкой выходное отверстие). Это позволяет полностью исключить вытекание шлака, благодаря его оттеснению газовой струей, пронизывающей жидкую ванну в зоне расположения выпускной летки агрегата (рис. 3 б). Выпускной канал можно открывать сразу же после того, как слой шлака окажется выше уровня его входного отверстия.

Из-за того, что глубина жидкой ванны конвертера, находящегося в горизонтальном положении, составляет 1-1,5 м, вероятность образования вихревых зон и воронки, способствующих вовлечению плавающего шлака в выпускной канал, достаточно велика. При этом в ванне еще может находиться значительное количество жидкого металла (рис. 3 в), что не позволяет прекратить его выпуск. Закрытие канала после требуемой задержки осуществляют переводом системы газодинамической отсечки в течение 1 секунды из исходного положения в рабочее (рис. 3 г).

Таким образом, система газодинамической отсечки конвертерного шлака также требует применения дополнительных средств автоматического контроля и запуска (термокамер или магниточувствительных сенсоров), однако даже при их наличии проблема затягивания шлака образующейся вихревой воронкой остается нерешенной, что следует отнести к недостаткам такого способа реализации активного влияния на количество попадающего в разливочный ковш шлака.

Выполненные в ходе физического моделирования измерения свидетельствуют о том, что на эффективность применения газодинамического способа отсечки конечного конвертерного шлака существенное влияние оказывает характер взаимодействия газовой струи и жидкостного потока в выпускном канале, поэтому важное значение в данном случае имеет оптимизация таких технических параметров, как расход, давление и режим истечения газа, используемого для вытеснения шлакового расплава в полость кислородного конвертера.

Блокирование в нужный момент выпускного канала конвертера с помощью элементов, плавающих в расплаве на границе раздела металлической и шлаковой фаз благодаря правильно подобранной плотности материала для их изготовления, может быть действенным в том случае, когда учтено влияние на изучаемый процесс ряда факторов. Результаты модельных исследований свидетельствуют о том, что главными факторами, влияющими на эффективность процесса отсечки шлака элементами поплавкового типа, являются:

- точность позиционирования, обеспечиваемая манипулятором;
- правильность выбора момента сброса отсечного элемента;
- вязкость шлака;
- плавучесть элемента;

- соотношение диаметров входного отверстия выпускного канала и головной части отсечного элемента.



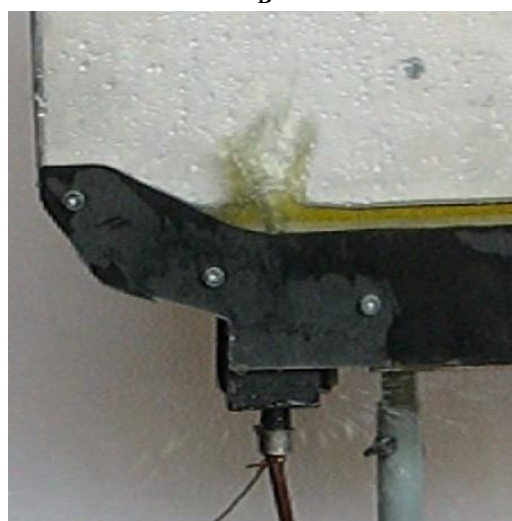
а



б



в



г

Рисунок 3 - Порядок включения в работу устройства при моделировании газодинамической отсечки конвертерного шлака

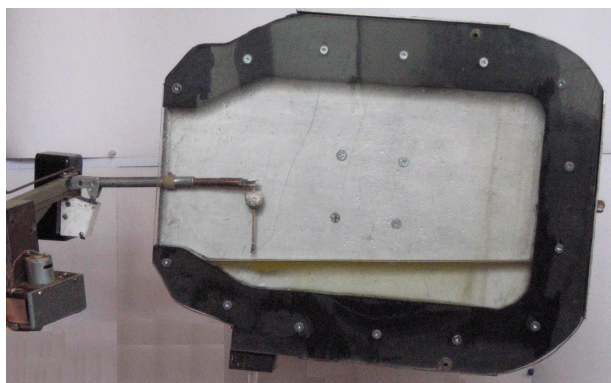
Первые два фактора являются превалирующими, так как от них в первую очередь зависит успех применения данного способа отсечки конвертерного шлака. Поэтому при сбросе отсечного элемента максимальное отклонение точки внедрения его направляющего стержня от центра входного отверстия выпускного канала конвертера, обеспечиваемое кинематической системой манипулятора, не должно превышать разности радиусов канала и стержня, что в численном выражении на практике составляет от 25 до 75 мм.

Момент сброса отсечного элемента определяется главным образом положением корпуса кислородного конвертера, а точнее продольной оси его выпускного канала, которая должна быть как можно ближе к вертикали, поскольку в этом случае обеспечивается наибольшая вероятность попадания направляющего стержня элемента во входное отверстие канала (рис. 4 а). Отсюда следует, что длину стержня элемента следует назначать с учетом глубины ванны расплава в повернутом конвертере, а его ввод необходимо осуществлять за минимально возможное время, чтобы предупредить образование воронки (рис.4 б), в которую с поверхности металла в значительном количестве затягивается шлак. Своевременное введение отсечного элемента поплавкового типа исключает образование воронки, а при ее наличии позволяет практически мгновенно разрушить образовавшийся вихревой поток расплава (рис.4 в).

Результаты визуального контроля характера взаимодействия потоков жидкостей, имитировавших металлический и шлаковый расплавы, с составными частями отсечных элементов при различных вариациях их форм, размеров и плотности материала, свидетельствуют о том, что при расчете геометрических параметров элемента должен учитываться баланс действующих на него сил Архимеда, тяжести и вязкостного трения. При отсутствии такого баланса наблюдались случаи преждевременного блокирования элементом выпускного канала модели конвертера, в результате чего в ней наряду с имитатором шлака оставалась значительная часть жидкости, моделирующей сталь. Только правильно подобранные материал, форма и размеры отсечного элемента обеспечивают его центрирование относительно выпускного канала кислородного конвертера и нахождение в плавучем состоянии на границе раздела жидкой стали и слоя шлака, гарантируют достижение высокой степени отсечки последнего за счет запирания входного отверстия канала (рис. 4 г).

Таким образом, данная система в отличие от двух предыдущих не требует применения специальных аппаратных средств раннего обнаружения шлаковых частиц в потоке стали, истекающей из выпускного канала плавильного агрегата, что, несомненно, является ее главным преимуществом. Однако она не позволяет исключить попадание в ковш шлакового расплава в момент прохождения его слоя через зону расположения входного отверстия выпускного канала во время наклона конвертера. Поэтому такую систему отсечки шлака рекомендуется применять в комплексе со специальными разовыми заглушками, изготовленными из пластического материала и устанавливаемыми в выпускной канал конвертера перед завалкой металлического лома. Благодаря тому, что находящаяся в канале заглушка способна до своего разрушения в течение 20 – 25 с выдержать давление расплава, попадание шлака в разливочный ковш в начальной стадии процесса выпуска металла практически полностью исключается.

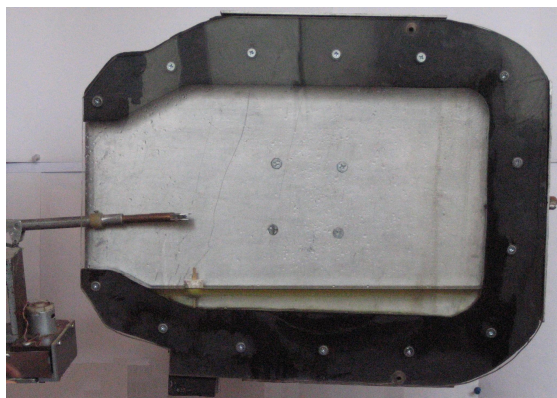
Данные, полученные в ходе физического моделирования трех известных способов отсечки конвертерного шлака приведены табл. 1.



а



б



в



г

Рисунок 4 - Характерные картины жидкой ванны модели конвертера при моделировании отсечки шлака с помощью элементов поплавкового типа

**Таблица 1** Полнота удержания в модели конвертера имитатора шлака при использовании различных систем его отсечки

Моделируемый способ выпуска стали из конвертера	Доля конечного шлака, попадающего в модель ковша по ходу выпуска плавки при различных углах наклона модели конвертера, %			Степень отсечки конечного шлака, %
	Начальная стадия (угол наклона 40-50°)	Установившийся процесс истечения металла (угол наклона 50-90°)	Конечная стадия (угол наклона 90-50°)	
Без отсечки шлака	25	45	30	0
Выпуск с отсечкой при помощи шиберного затвора	-	28 - 30	0 - 2	62 - 70
Выпуск с газодинамической отсечкой	-	30 - 35	5 - 7	58 - 65
Выпуск с отсечкой элементами поплавкового типа	30	-	0 - 2	68 - 70

## Выводы

1. В идентичных условиях реализации известных способов отсечки шлака при четком выполнении требований эксплуатации, предписанных технологическими инструкциями, достигаемая полнота удержания шлакового расплава в плавильном агрегате примерно одинакова.
2. Основное расхождение в достигаемых показателях технико-экономической эффективности проанализированных способов отсечки конвертерного шлака, обусловлено, главным образом, различной степенью сложности настройки и поддержания в рабочем состоянии оборудования для их реализации, необходимостью организации специализированных ремонтных участков с соответствующей численностью персонала, а также ценой и удельным расходом огнеупорных изделий, материалов и энергоносителей, требуемых для функционирования каждой из отсечных систем.

**Рекомендуемая литература:** [5, 11, 21, 37, 51, 54, 91, 92].

## **Лабораторная работа № 4**

### **Исследование работы на физической модели системы поворотного затвора для отсечки шлака при выпуске стали из конвертера**

#### **Постановка задачи**

Создание оборудования, позволяющего предотвратить попадание большого количества агрессивного конвертерного шлака в разливочный ковш во время выпуска металла, как уже отмечалось, является одним из приоритетных направлений развития сталеплавильного производства.

Целесообразность использования скользящих затворов для отсечки конвертерного шлака подтверждена зарубежными компаниями Salzgitter AG, Stopinc AG и RHI Refractories, совместно разработавшими систему шиберного затвора, который в течение длительного периода успешно эксплуатируют на 210-тонном кислородном конвертере.

При реализации такого способа удержания шлака в кислородном конвертере очень важно не только своевременно зафиксировать момент начала образования в жидкой ванне воронки, затягивающей частицы шлака в выпускной канал, но и осуществить как можно быстрее его перекрытие в заключительной стадии процесса выпуска плавки. Поэтому использование скользящего затвора в качестве системы отсечки конечного технологического шлака предполагает наличие высокочувствительной контрольно-измерительной аппаратуры раннего обнаружения шлаковых включений в струе истекающего в ковш металла, от которой поступает команда на закрытие затвора, и достаточно мощного привода, способного незамедлительно ее обработать. При этом сам привод следует размещать ниже опорного кольца корпуса кислородного конвертера. В противном случае силовой агрегат привода будет подвержен интенсивным тепловым нагрузкам, отрицательно влияющим на его работоспособность.

Эксплуатация такой системы, естественно, требует выполнения соответствующего объема работ, связанных с заменой изношенных огнеупорных изделий и ремонтом ее механической, гидравлической или пневматической части в зависимости от типа применяемого привода. Для обслуживания затвора, имеющего значительную массу, в распоряжении персонала должно быть самоходное транспортное средство, снабженное манипулятором, а также оборудованная шиберная мастерская. По свидетельству разработчиков, одной из существенных проблем, с которыми столкнулись в процессе внедрения новой шиберной системы, явился дефицит времени при выполнении в межплавочный период операций по замене затвора с отработанными огнеупорными плитами.

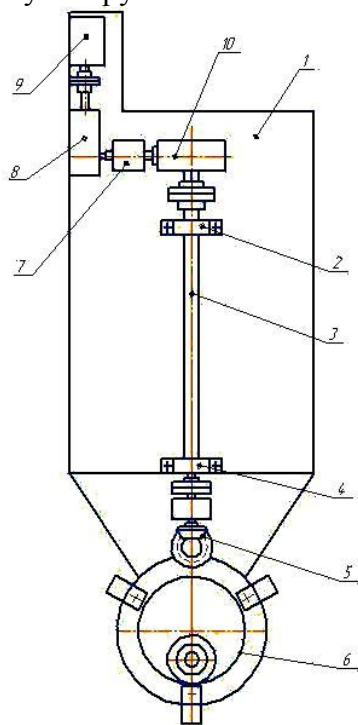
Для сокращения продолжительности подготовки к работе и установки устройства для отсечки шлака на кислородный конвертер, предлагается его оборудовать поворотным затвором, у которого, благодаря вращательному движению нижней огнеупорной плиты, площадь ее рабочей поверхности, обеспечивающей запираение сталевыпускного канала плавильного агрегата, увеличивается минимум в 3 раза. Это позволит во столько же раз повысить кратность применения керамических элементов затвора и реже осуществлять его замену.

#### **Цель исследования**

Получение экспериментальных данных, необходимых для создания надежного в работе шиберного устройства с вращательным движением огнеупорного элемента, обеспечивающего эффективное удержание технологического шлака в сталеплавильном агрегате.

## Материальное обеспечение

Для проведения исследований работы системы поворотного затвора использован его физический аналог, схема и общий вид которого показаны на рис. 1. Он включал сварную раму 1, на которой был закреплен физический аналог поворотного затвора 6, приводимый в действие электродвигателем 9. Крутящий момент от вала двигателя к поворотной обойме затвора передавался через быстроходный коническо-цилиндрический 8 и тихоходный червячный 10 редукторы, связанные между собой тензорезисторным преобразователем 7; трансмиссионный вал 3, установленный в подшипниковых опорах 2 и 4; и коническую зубчатую пару 5.



а



б

Рисунок 1 - Схема (а) и общий вид (б) физического аналога системы поворотного затвора

Контроль момента сопротивления, препятствующего повороту обоймы аналога затвора и преодолеваемого его приводом при различных режимах работы, осуществляли с использованием измерительного комплекса, в состав которого входили: тензорезисторный преобразователь, усилитель переменного тока УТ4-1 ТУ 25.06.1377-82, компьютер, снабженный платой L-1250 12-тиразрядного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD.

Тензорезисторный преобразователь, соединявший соответствующие валы быстроходного и тихоходного редукторов привода, выполнял роль муфты и представлял собой заключенный в защитный корпус пустотелый цилиндрический элемент, на наружную поверхность которого наклеены фольговые тензодатчики, соединенные по мостовой схеме (фото на рис. 2). Питание моста сопротивлений и передачу с него электрического сигнала осуществляли с помощью токосъемного устройства, посредством разъемов и экранированного кабеля подключенного к входу усилителя. Обработку цифрового представления сигналов, поступающих от тензорезисторного преобразователя, выполняли на ЭВМ в реальном масштабе времени при помощи прикладной программы Power Graph 2.0.

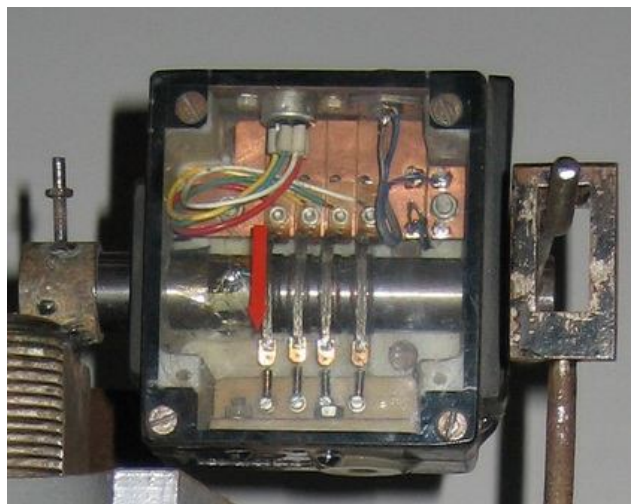


Рисунок 2 - Конструктивное исполнение тензорезисторного преобразователя для контроля крутящего момента, развиваемого приводом физического аналога поворотного затвора

### Ход выполнения задания и полученные результаты

В ходе проводившихся лабораторных экспериментов изучали характер изменения крутящего момента, требуемого для поворота подвижной обоймы с нижней огнеупорной плитой, а также оценивали соотношение статических и динамических нагрузок, действующих на привод в периоды его пуска и установившегося движения при различных условиях контакта элементов шиберной системы. Статическое сопротивление, действующее на элементы аналога затвора и обусловленное силами трения, возникающими при относительном перемещении двух пар контактирующих поверхностей, прижатых одна к другой для предотвращения появления зазора между огнеупорными плитами, обеспечивали за счет создания сжимающей нагрузки, развиваемой тремя цилиндрическими пружинами опорного узла. Конструктивное исполнение пружинного узла, представленное на рис. 3, позволяло регулировать силу прижатия подвижной части аналога затвора, значение которой задавали путем изменения с помощью нажимного болта деформации пружины  $\Delta h$ .

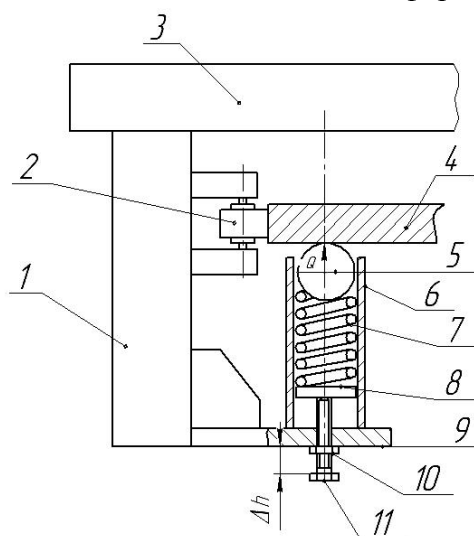


Рисунок 3 - Схема пружинного узла, обеспечивающего контролируемую силу прижатия огнеупорных плит физического аналога поворотного затвора:

- 1 – кронштейн; 2 – центрирующий ролик; 3 – корпус; 4 – подвижная обойма; 5 – шарик;  
6 – направляющая гильза; 7 – нажимная пружина; 8 – опорная шайба; 9 – несущая  
пластина; 10 – контргайка; 11 – нажимной болт

Для моделирования нагрузки, связанной с разрушением металлической корки, образующейся в производственных условиях на стенках выпускного канала, в нем во время лабораторного эксперимента размещали втулку, предварительно отлитую из свинца, реологические свойства которого в твердом состоянии позволяют имитировать им сталь при температуре начала ее кристаллизации. Толщина стенки втулки составляла 4 мм. В качестве примера на рис. 4 приведен характерный вид сигнала, зарегистрированного при контроле момента сопротивления повороту подвижной обоймы аналога затвора в случае прижатия огнеупорных плит с силой  $Q = 10$  кН.

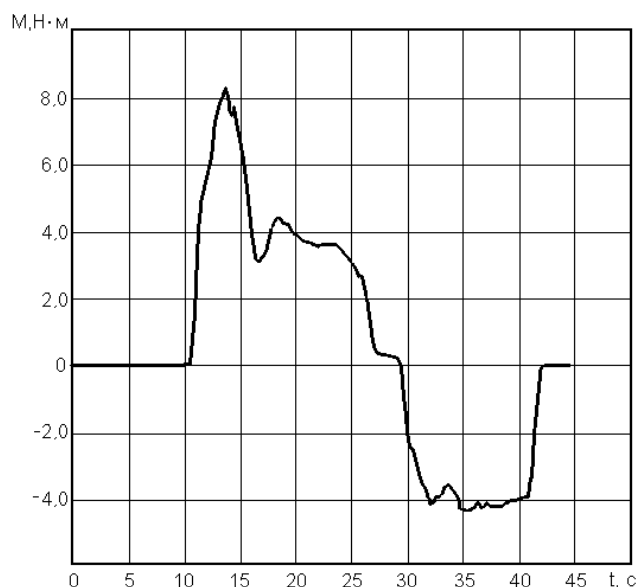


Рисунок 4 - Характерный вид сигнала, регистрируемого при контроле крутящего момента, развиваемого приводом физического аналога поворотного затвора

Результаты, полученные после обработки данных измерений крутящего момента, преодолеваемого приводом физического аналога системы поворотного затвора, приведены в табл. 1.

**Таблица 1** Экспериментальные значения моментов сопротивления, преодолеваемых приводом аналога поворотного затвора при различной силе прижатия его огнеупорных плит

№ опыта	$Q$ , кН	Измеренные значения моментов, приведенные к валу двигателя *, Н·м		
		$M'_{дв.п}$	$M'_p$	$M'_{тр1} + M'_{тр2}$
1	2	0,82	0,76	0,06
2	4	1,02	0,87	0,15
3	6	1,11	0,83	0,28
4	8	1,24	0,87	0,37
5	10	1,54	0,87	0,67

- Данные получены как результат деления значений крутящих моментов, зафиксированных с помощью тензорезисторного преобразователя, на передаточное число  $u = 6$  и к.п.д.  $\eta = 0,9$  быстроходного редуктора привода физического аналога затвора.

## **Выводы**

Полученная информация позволяет сделать качественную и количественную оценку соотношения различных составляющих технологической нагрузки, действующей на привод поворотного затвора, значения которой необходимы для расчета и проектирования его промышленного образца

**Рекомендуемая литература:** [5, 8, 22, 24, 49, 55, 76, 92].

## **Лабораторная работа № 5**

### **Моделирование процесса отсечки конвертерного шлака элементами поплавкового типа**

#### **Постановка задачи**

Наиболее динамично развивающимся из всех известных способов отсечки шлакового расплава при эксплуатации кислородных конвертеров следует признать тот, который предполагает использование для блокирования выпускного канала специальных элементов поплавкового типа, вводимых с помощью манипулятора в ванну агрегата после перевода его в горизонтальное положение и плавающих на поверхности раздела шлак-металл.

Исследования последних лет, направленные на совершенствование данного способа реализации бесшлакового выпуска конвертерной стали, были связаны с поиском оптимальной формы и требуемой плотности материала отсечных элементов, поскольку от указанных параметров, по мнению специалистов, в значительной мере зависит эффективность проводимых мероприятий по уменьшению до минимума утечек агрессивного шлака в сталеразливочный ковш.

Вместе с этим практика использования таких отсечных систем подтвердила необходимость экспериментальных и теоретических исследований процесса взаимодействия поплавков-отсекателей с потоками расплава в ванне кислородного конвертера в заключительной стадии операции выпуска стали. С этой целью на металлургических предприятиях некоторых фирм начато применение видеокамер, позволяющих через горловину повернутого конвертера осуществлять наблюдение за поверхностью шлака и положением головной части плавающего в нем отсечного элемента. Однако даже такие совершенные и достаточно дорогостоящие средства оперативного контроля не позволяют в полной мере изучить особенности поведения отсекающего элемента шлака в непрозрачной толще расплава в различных гидродинамических условиях протекания его выпуска из кислородного конвертера (наличие или отсутствие воронкообразных завихрений на входе выпускного канала; образование вокруг него на футеровке настыли, повышающей местные гидравлические сопротивления).

#### **Цель исследования**

Целью модельных исследований было установление возможных причин сбоев нормального функционирования отсечных систем и поиск путей снижения вероятности возникновения нештатных ситуаций во время бесшлакового выпуска стали из кислородного конвертера.

#### **Материальное обеспечение**

Для проведения исследований изготовили комплект моделей отсечных элементов поплавкового типа, основные характеристики которых приведены в таблице 1, а также

выполненную в масштабе 1: 5 из органического стекла емкость, имитирующую часть ванны 160-тонного кислородного конвертера и его выпускной канал.

### Ход выполнения задания и полученные результаты

В ходе эксперимента жидкую сталь моделировали чистой водой, так как их кинематические вязкости одинаковы и равны  $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  соответственно при  $1550^\circ$  и  $20^\circ\text{C}$ . Для имитации шлака с вязкостью  $(10-33) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при  $1595^\circ\text{C}$  использовали минеральное масло с вязкостью  $35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и плотностью  $870 \text{ кг/м}^3$  при  $20^\circ\text{C}$ .

При моделировании соблюдали геометрическое и гидродинамическое подобие, что подтверждалось равенством критериев Ньютона, Фруда и Струхала для натурного образца его модели. Значения указанных критериев, рассчитанные по известным зависимостям, составили:

$$Ne = \frac{P_H}{(\rho_H \cdot v_H^2 \cdot L_H^2)} = \frac{P_M}{(\rho_M \cdot v_M^2 \cdot L_M^2)} = 0,009 ;$$

$$Fr = \frac{v_H^2}{(g \cdot L_H)} = \frac{v_M^2}{(g \cdot L_M)} = 1,98 ;$$

$$St = \frac{(v_H \cdot t_H)}{L_H} = \frac{(v_M \cdot t_M)}{L_M} = 0,98 .$$

В этих выражениях:  $P$  – характерная действующая сила;  $\rho$  – плотность жидкой среды;  $v$  – скорость жидкостных потоков;  $L$  – характерный линейный размер;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $t$  – время; индекс « $H$ » – натурный образец, « $M$ » – модель.

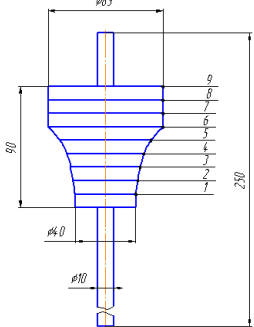
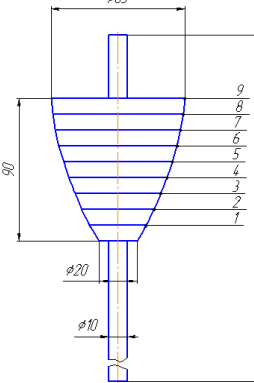
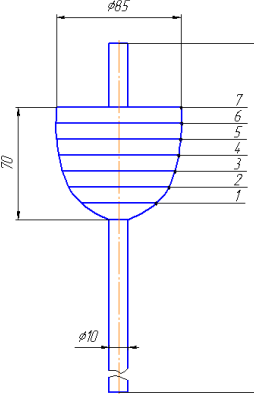
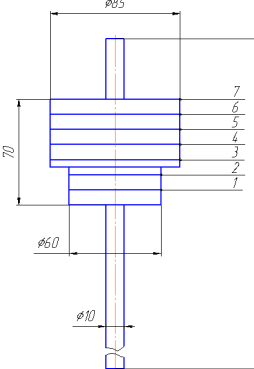
Во время модельных исследований в емкость с прозрачными стенками, внутренний объем которой был геометрически подобен части ванны кислородного конвертера, прилегающей к его горловине в зоне размещения выпускного канала, поочередно заливали воду и минеральное масло в количестве, обеспечивающем требуемый уровень заполнения модели плавильного агрегата и соответствующее отношение толщин слоев жидкостей, имитирующих сталь и шлак.

После поворота емкости в горизонтальное положение и начала истечения из нее имитатора стали в жидкую ванну вводили модель отсечного элемента, обеспечивая попадание нижнего конца его направляющего стержня во входное отверстие выпускного канала, благодаря чему достигалась их соосность при опускании уровня модельной жидкости во время ее слива. Для удобства наблюдений и облегчения контроля поведения плавающих элементов на их головную часть предварительно нанесли через одинаковые промежутки контрастные кольцевые линии в соответствии со схемами, приведенными в таблице.

За процессами, протекающими в модели кислородного конвертера при имитации бесшлакового выпуска стали, осуществляли визуальный контроль промежутки контрастные кольцевые линии в соответствии со схемами, приведенными в таблице.

За процессами, протекающими в модели кислородного конвертера при имитации бесшлакового выпуска стали, осуществляли визуальный контроль с одновременной видеосъемкой наблюдавшихся картин с помощью цифровой камеры с графическим разрешением  $640 \times 480$  пикселей и скоростью фиксации изображения 30 кадров в секунду. Обработку полученной информации осуществляли с использованием специализированных программных средств, позволивших получить для последующего анализа характерные кадры, отображающие суть быстротекущих гидродинамических процессов, которые нельзя зафиксировать при простом визуальном наблюдении.

Таблица 1 Основные характеристики моделей отсечных элементов

Вариант исполнения	Форма и размеры, мм	Геометрические параметры составных частей элементов		Масса, кг	Плотность материала, кг/м <sup>3</sup>
		Объем, м <sup>3</sup>	Площадь поверхности, м <sup>2</sup>		
I		$V_1=0.000041$ $V_2=0.000058$ $V_3=0.000078$ $V_4=0.000101$ $V_5=0.000130$ $V_6=0.000175$ $V_7=0.000232$ $V_8=0.000289$ $V_9=0.000345$	$S_1=0.011473$ $S_2=0.012946$ $S_3=0.014534$ $S_4=0.016284$ $S_5=0.018471$ $S_6=0.021663$ $S_7=0.024334$ $S_8=0.027004$ $S_9=0.029675$	0.036 - 0.1	104 - 290
II		$V_1=0.000033$ $V_2=0.000047$ $V_3=0.000066$ $V_4=0.000093$ $V_5=0.000127$ $V_6=0.000168$ $V_7=0.000216$ $V_8=0.000267$ $V_9=0.000323$	$S_1=0.010117$ $S_2=0.011555$ $S_3=0.013267$ $S_4=0.015238$ $S_5=0.017431$ $S_6=0.019798$ $S_7=0.022291$ $S_8=0.024879$ $S_9=0.027534$	0.036 - 0.1	110 - 309
III		$V_1=0.000039$ $V_2=0.000068$ $V_3=0.000109$ $V_4=0.000161$ $V_5=0.000221$ $V_6=0.000284$ $V_7=0.000348$	$S_1=0.011684$ $S_2=0.014125$ $S_3=0.016674$ $S_4=0.019387$ $S_5=0.022183$ $S_6=0.025020$ $S_7=0.027865$	0.036 - 0.1	103 - 287
IV		$V_1=0.000057$ $V_2=0.000085$ $V_3=0.000127$ $V_4=0.000184$ $V_5=0.000241$ $V_6=0.000298$ $V_7=0.000354$	$S_1=0.014024$ $S_2=0.015909$ $S_3=0.021034$ $S_4=0.023704$ $S_5=0.026374$ $S_6=0.029045$ $S_7=0.031715$	0.036 - 0.1	101 - 282

Анализ отснятых картин процесса взаимодействия каждой из моделей отсечного элемента с жидкой ванной емкости, имитирующей кислородный конвертер, позволил установить особенности поведения поплавка-отсекателя на протяжении всего

моделируемого процесса бесшлакового выпуска стали.

Начиная с момента сброса в жидкую ванну, головная часть каждого из наблюдавшихся модельных отсекателей плавала на границе раздела слоев жидкостей, имитирующих металлическую и шлаковую фазы. При этом объем погруженной части отсечного элемента (рис.1 а – 4 а) превышал объем жидкости, который должен быть вытеснен под действием его силы тяжести в спокойной среде согласно закону Архимеда. Указанное увеличение заглубления элемента в жидкость обусловлено действием на него силы вязкостного трения, вызываемой жидкостным потоком и совпадающей по направлению с силой тяжести отсекателя.

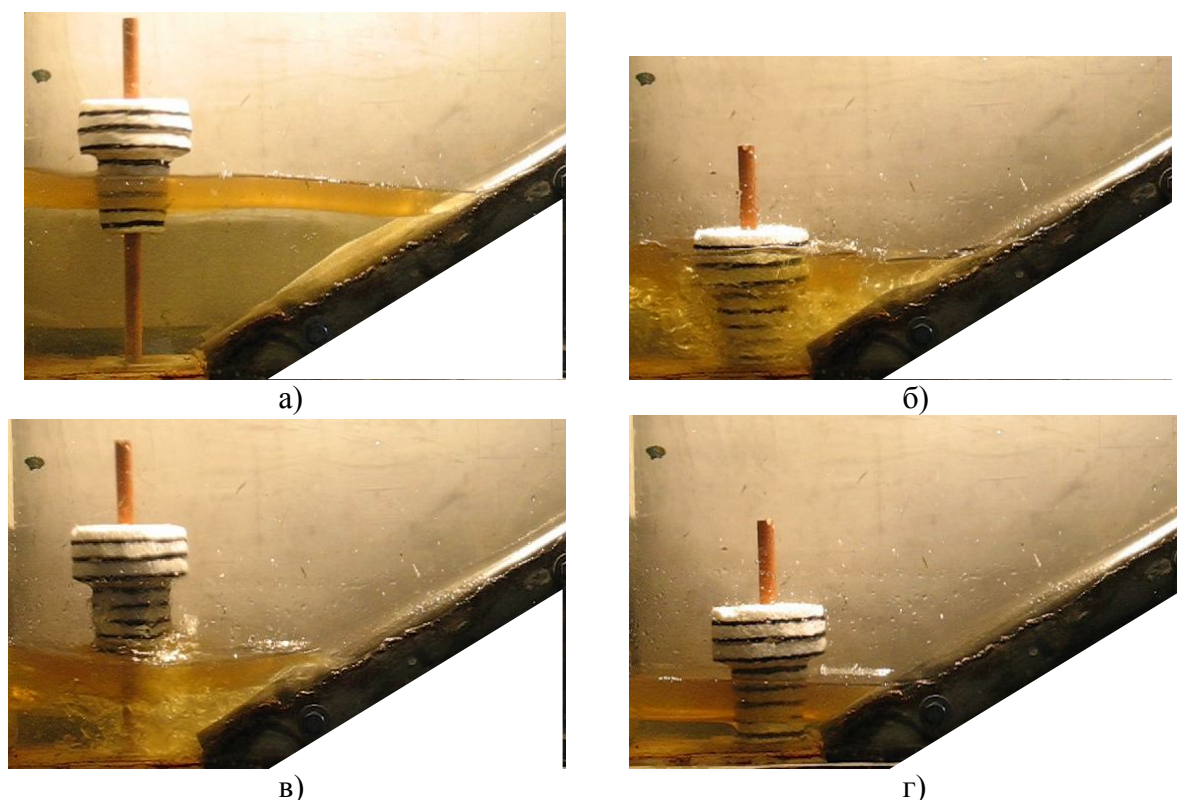


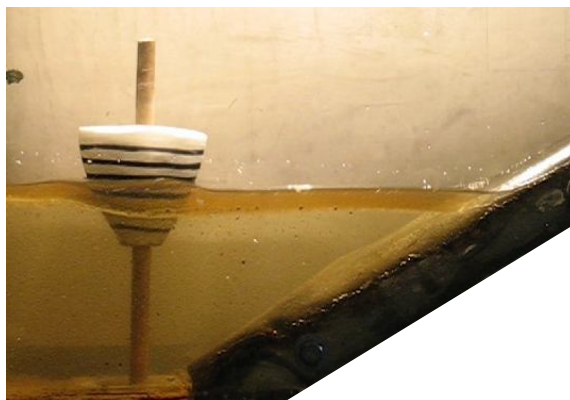
Рисунок 1 - Характерные картины жидкой ванны модели конвертера при использовании отсечного элемента в форме гиперболического составного коноида: а – после его сброса; б и в – при возбуждении колебательного процесса отсечного элемента; г – после блокирования выпускного канала

Когда уровень модельной жидкости снижался до так называемой «критической отметки», при которой наблюдали внезапное образование вихревых потоков на входе в выпускной канал, происходило резкое увеличение силы, затягивающей в него направляющий стержень отсечного элемента. Под действием этой силы поплавко-отсекатель с большой скоростью погружался в жидкость и разрушал вихревую структуру жидкостного потока, после чего всплывал на поверхность. Отмеченные движения поплавка повторялись несколько раз, что вызывало явление осцилляции. Зафиксированная на модели глубина ванны, соответствовавшая началу колебательных процессов, для всех моделей отсечных элементов была примерно одинаковой ( $\approx 42$  мм) и практически совпадала с расчетным значением (39 мм), полученным по формуле Перельмана, при котором над выпускным каналом должно происходить самопроизвольное воронкообразование в слое жидкости:

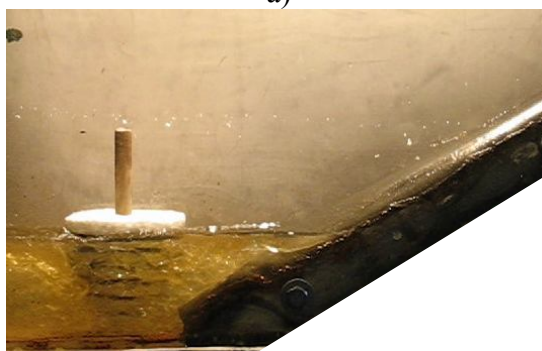
$$H_{кр} = 0,5 \cdot d \cdot (v_{о.ж} / \sqrt{g \cdot d})^{0,55},$$

где  $d$  – диаметр выпускного канала модели конвертера;

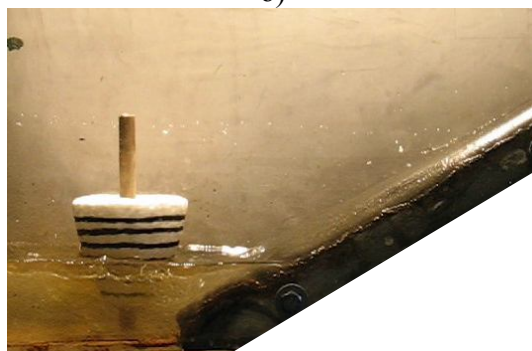
$v_{ож}$  — средняя скорость модельной жидкости в сжатом сечении струи, находящемся на  $0,5d$  ниже плоскости входного отверстия выпускного канала модели конвертера.



а)



б)

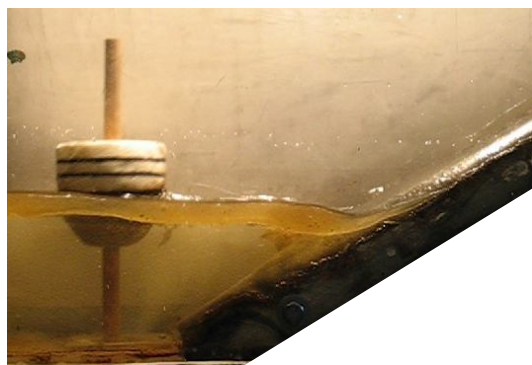


в)



г)

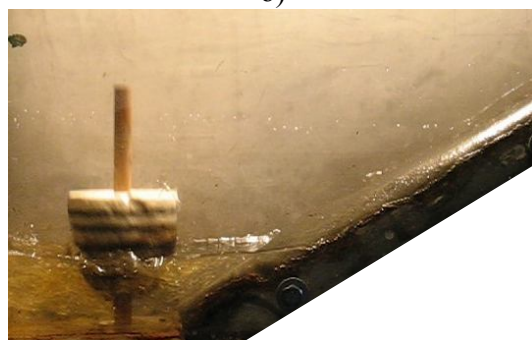
Рисунок 2 - Характерные картины жидкой ванны модели конвертера при использовании отсечного элемента в форме параболического коноида:  
 а — после его сброса; б и в — при возбуждении колебательного процесса отсечного элемента;  
 г — после блокирования выпускного канала



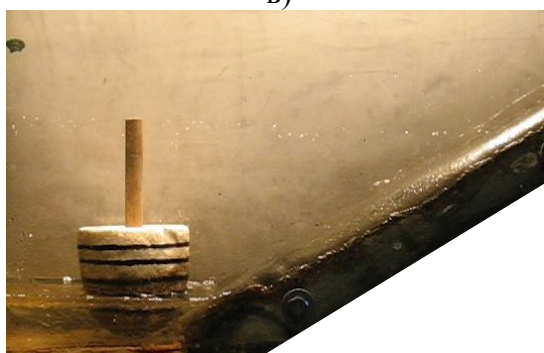
а)



б)

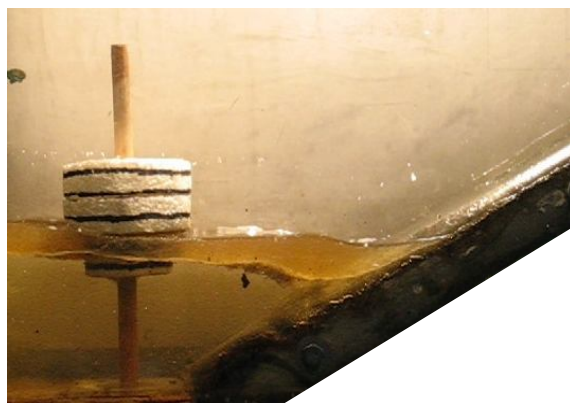


в)



г)

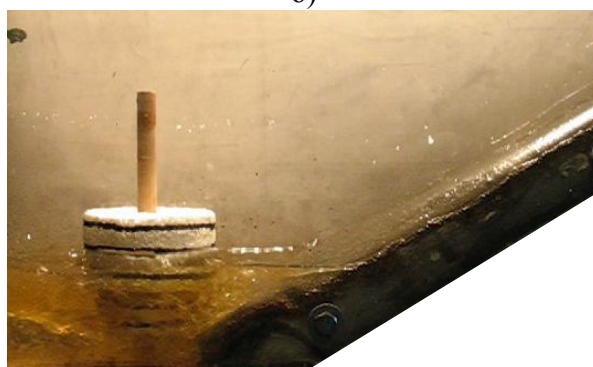
Рисунок 3 - Характерные картины жидкой ванны модели конвертера при использовании отсечного элемента форме усеченного эллипсоида:  
а – после его сброса; б и в – при возбуждении колебательного процесса отсечного элемента; г – после блокирования выпускного канала



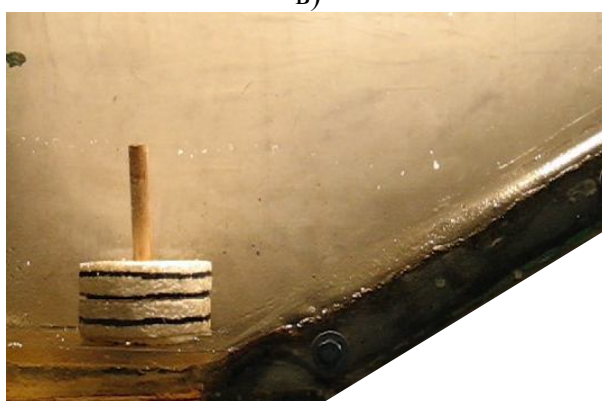
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 - Характерные картины жидкой ванны модели конвертера при использовании отсечного элемента форме ступенчатого цилиндра: а – после его сброса; б и в – при возбуждении колебательного процесса отсечного элемента; г – после блокирования выпускного канала

## Выводы

1. При одинаковой плотности материала частота колебаний по мере снижения уровня жидкости постепенно сокращалась с 5-7 Гц до 1 Гц, а амплитуда повышалась в несколько раз, начиная с 5 мм. Увеличение плотности материала модели отсечного элемента практически не влияло на амплитуду колебаний, а их частота в этом случае находилась в пределах 1-3 Гц. В соответствии с кадрами, приведенными на рис. 1б-4б и 1в-4в, максимальная амплитуда вертикальных колебаний элементов, зафиксированная с помощью кольцевых линий на их головных частях, для каждого из четырех вариантов конструктивного исполнения составила: (I) – 40 мм, (II) – 30 мм, (III) – 25 мм, (IV) – 20 мм.

2. При этом количество воды, моделирующей жидкую сталь, остававшейся вместе с имитатором шлака в модели конвертера после перекрытия выпускного канала отсечным элементом (кадры на рис. 1 г - 4 г) находилось в прямой зависимости от амплитуды его колебаний относительно плоскости плавания, под которой понимают плоскость сечения головной части поплавка-отсекателя, совпадающую с границей раздела металлической и шлаковой фаз. Данный факт объясняется тем, что при последнем погружении отсечного элемента в момент блокирования им входного отверстия выпускного канала модели толщина слоя воды соответствовала амплитуде колебаний поплавка-отсекателя.

3. Наблюдавшиеся колебания моделей поплавков-отсекателей являются вынужденными, поскольку возникают под действием внешней возбуждающей силы со стороны потоков жидкости. Начало развития колебательного процесса связано с нарушением баланса сил в системе поплавок-жидкость, находящейся в равновесии в начальный момент после сброса отсечного элемента в жидкую ванну. Пока его головная часть удалена от входного отверстия выпускного канала, направленные вниз силы тяжести плавающего тела и вязкостного трения жидкости уравновешены противодействующей им подъемной (архимедовой) силой. Это равновесие обеспечивается запасом плавучести элемента, который должен быть достаточным для преодоления добавочной нагрузки, нарастающей по мере опускания уровня жидкой ванны.

4. Попадание головной части поплавка-отсекателя в зону потоков жидкости, имеющих значительно большую скорость, а также возникновение гидродинамических условий, способствующих образованию завихрений на входе в выпускной канал и кратковременному существованию воронки, вызывают резкое погружение отсечного элемента. Это погружение будет продолжаться до тех пор, пока задействованный запас плавучести и сила лобового сопротивления элемента в совокупности не уравновесят силу, увлекающую его вглубь жидкой ванны. Из этого следует, что глубина погружения и, следовательно, амплитуда колебаний элемента зависят не только от соотношения указанных сил, а и от динамики их нарастания по мере заглубления поплавка-отсекателя в жидкую ванну. Поэтому среди отсечных элементов различного конструктивного исполнения минимальную амплитуду колебаний будет иметь тот, у которого равновесие сил, действующих на него вдоль вертикальной оси в противоположных направлениях, обеспечивается при меньшем погружении его головной части в жидкость.

**Рекомендуемая литература:** [5, 11, 21, 24, 25, 54, 58, 79, 89, 91, 92].

## **Лабораторная работа № 6**

### **Изучение на физической модели процесса силового взаимодействия отсечных элементов с жидкой ванной кислородного конвертера**

#### **Постановка задачи**

Условия силового контакта элементов поплавкового типа с жидкой ванной конвертера при реализации отсечки конечного шлака недостаточно изучены, что предопределило необходимость продолжения их исследований. В частности, следовало выяснить природу наблюдавшегося явления осцилляции поплавков-отсекателей.

По предварительным результатам выполненных исследований было сделано предположение о том, что возникновение колебаний отсечных элементов в жидкой ванне связано с резким изменением баланса сил, действующих на поплавки со стороны подвижного расплава.

Выполнение количественной оценки сил вязкостного трения и динамического давления, действующих на отсечные элементы при их обтекании потоками металла, затруднено из-за отсутствия необходимых данных о коэффициентах гидравлического сопротивления верхних частей отсекателей, имеющих различную форму. Экспериментальное определение значений указанных коэффициентов в промышленных условиях практически невозможно, поэтому для решения данной проблемы использован метод физического моделирования.

#### **Цель исследования**

Целью проводимых исследований является получение данных о характере взаимодействия отсечных элементов поплавкового типа различного конструктивного исполнения с жидкой ванной кислородного конвертера и влиянии различных факторов на эффективность удержания конечного шлака в сталеплавильном агрегате.

#### **Материальное обеспечение**

Для проведения исследований использованы изготовленные в масштабе 1: 5 модели отсечных элементов, имеющих различную форму головной части (рис.1), а также контрольно-измерительный комплекс, схематично представленный на рис.2. В его состав входила выполненная из органического стекла емкость, имитирующая в масштабе 1:5 часть ванны 160-тонного кислородного конвертера, примыкающей к его выпускному каналу. Соосно с этим каналом внутри емкости размещали модель отсечного элемента, которую с помощью шарнирной подвески крепили к тензорезисторному преобразователю, жестко связанному с вертикальным стержнем. На верхнюю резьбовую часть стержня навинчивали гайку, опирающуюся своей торцевой частью на кронштейн, закрепленный на корпусе емкости. Соединение винт-гайка позволяло плавно регулировать положение модели отсечного элемента относительно выпускного канала во время имитации процесса отсечки конвертерного шлака.

С целью обеспечения обратного цикла воды, моделирующей расплав, под емкостью устанавливали приемный сосуд, посредством трубопровода связанный с подпитывающим баком, полость которого сообщалась с емкостью. Подачу модельной жидкости из приемного сосуда в подпитывающий бак осуществляли центробежным насосом, а ее расход регулировали вентилем. Постоянство уровня жидкости в баке поддерживали с помощью поплавкового механизма, посредством рычага, связанного с концевым выключателем, входящим в состав электрической цепи питания приводного двигателя центробежного насоса.

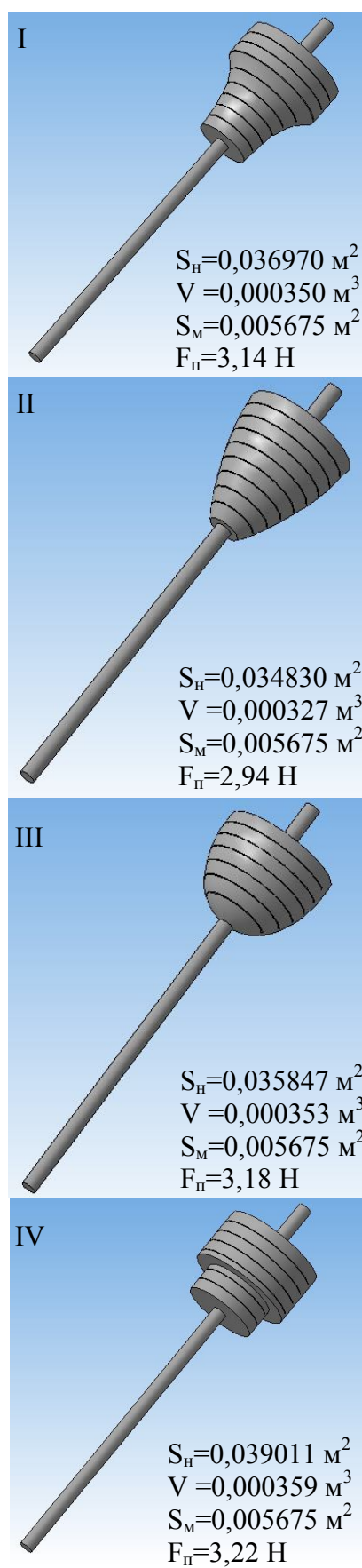


Рисунок 1 - Форма и геометрические параметры моделей отсечных элементов ( $S_H$  – площадь боковой поверхности;  $V$  – объем;  $S_M$  – площадь миделевого сечения;  $F_{\Pi}$  – запас плавучести)

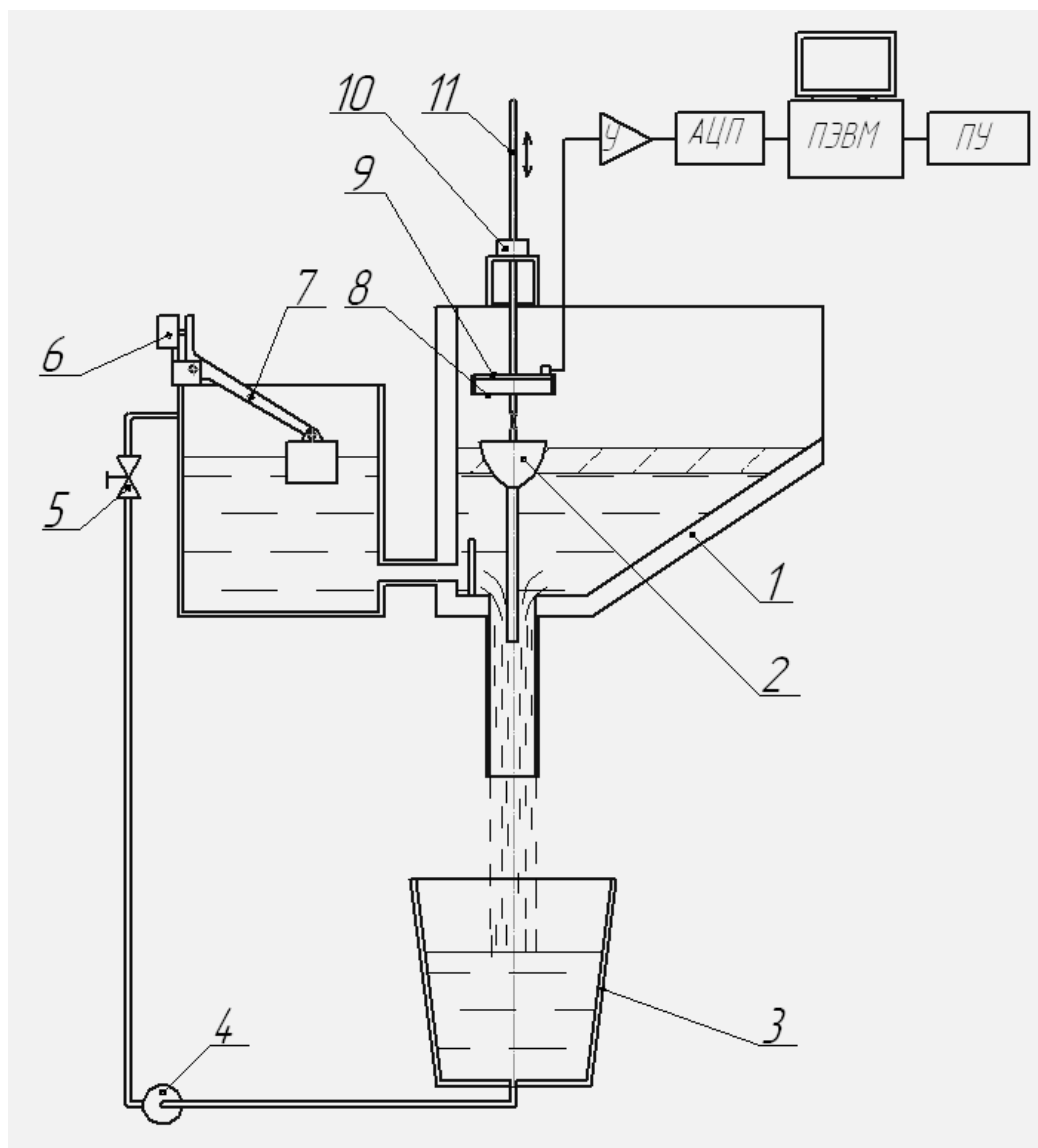
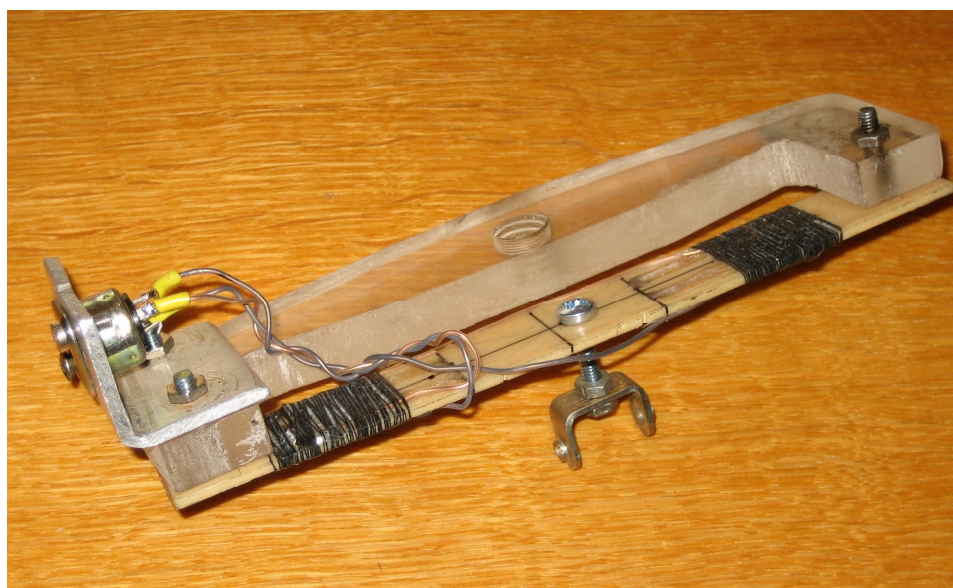


Рисунок 2 - Лабораторный комплекс для физического моделирования процесса отсечки конвертерного шлака: 1 – прозрачная модель ванны конвертера; 2 – модель отсечного элемента; 3 – приемный сосуд; 4 – центробежный насос; 5 – регулировочный вентиль; 6 – концевой выключатель; 7 – рычаг поплавка; 8 – тензорезисторный преобразователь; 9 – скоба; 10 – гайка; 11 – стержень с резьбой

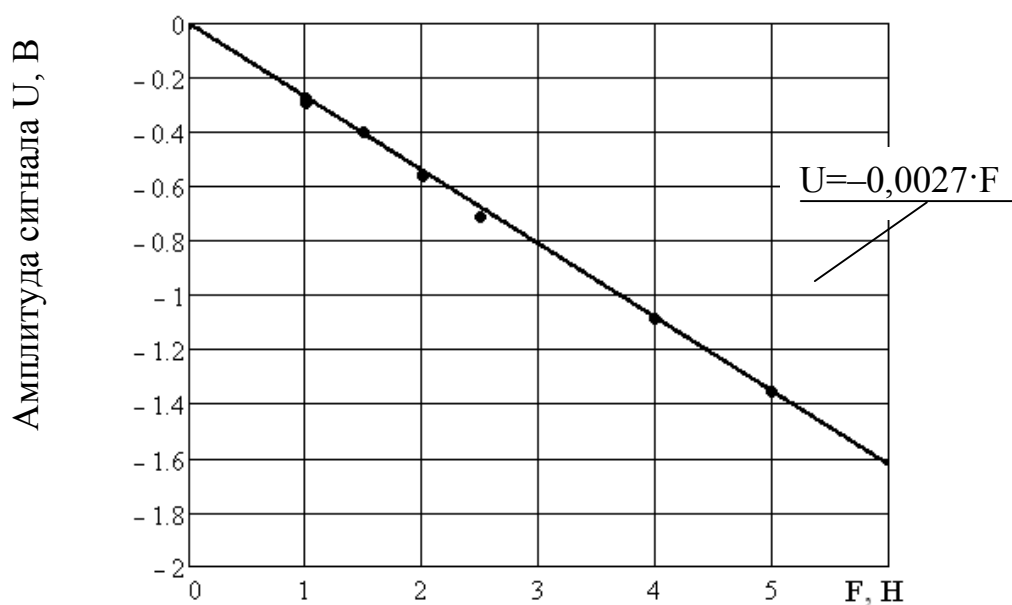
Тензорезисторный преобразователь (фото на рис.3 а), предназначенный для контроля сил, действующих на модель отсечного элемента, представлял собой пластинку, изготовленную из упругого материала и связанную своими концами с горизонтально расположенной С-образной скобой. Причем один конец пластинки закрепляли жестко, а второй с возможностью продольного перемещения относительно скобы, что обеспечивало беспрепятственный изгиб упругой системы при ее нагружении. На пластинку наклеены фольговые тензодатчики, соединенные по полумостовой схеме. Электрический сигнал, пропорциональный деформации пластинки, вызванной результирующей силой со стороны подвешенной к ней модели отсечного элемента, после усиления и преобразования в цифровой код поступал в системный блок ЭВМ для обработки и последующей распечатки на принтере его визуального представления.

Предварительно провели тарировку тензорезисторного преобразователя и оценили погрешность измерений, выполняемых с его использованием. По результатам

статистической обработки массива данных (рис. 3б), отображающих зависимость амплитуды аналогового сигнала, поступающего с преобразователя, от силы, приложенной к его упругой пластинке, погрешность измерений не превышала 4 %.



а



б

Рисунок 3 - Конструктивное исполнение тензорезисторного преобразователя (а) и график его тарировочной зависимости (б)

### Ход выполнения задания и полученные результаты

Жидкую сталь моделировали водой, а для имитации конвертерного шлака использовали минеральное масло, поскольку значения кинематической вязкости модельных жидкостей и реальных расплавов достаточно близки при соответствующих температурах реализации изучаемых процессов.

При моделировании соблюдали геометрическое и динамическое подобие, что подтверждалось равенством критериев Ньютона и Фруда для натурного образца и его модели. Указанные критерии, рассчитанные по известным зависимостям, имели следующие значения:

$$Ne = P_n / (\rho_n v_n^2 L_n^2) = P_m / (\rho_m v_m^2 L_m^2) = 0,009;$$

$$Fr = v_n^2 / (g L_n) = v_m^2 / (g L_m) = 2;$$

В этих выражениях:  $P$  – характерная действующая сила;  $\rho$  – плотность жидкой среды;  $v$  – скорость жидкостных потоков;  $L$  – характерный линейный размер;  $g$  – ускорение силы тяжести. Индексами ( $n$ ) и ( $m$ ) соответственно обозначены величины, относящиеся к натурному образцу и его модели.

С учетом того, что масштабные множители плотности, линейных размеров и скорости соответственно равны:  $a_\rho = 7$ ;  $a_l = 5$ ;  $a_v = a_l^{0,5} = 2,23$ , значение масштабного множителя сил составило:

$$a_F = a_\rho a_l^2 a_v^2 = 7 \cdot 5^2 \cdot 2,23^2 = 875.$$

Целью проводившихся исследований было установление соотношения сил, действующих на отсечный элемент во время блокирования им входного отверстия выпускного канала кислородного конвертера, а также оценка влияния формы и размеров поплавка-отсекателя на параметры его колебаний на границе раздела слоев жидкостей, имитирующих металл и шлак.

Для повышения достоверности информации, полученной в ходе эксперимента, контроль силового воздействия на модели отсечных элементов и их поведения в жидкой ванне осуществляли одновременно двумя способами.

С помощью измерительной системы в режиме реального времени регистрировали сигнал (рис. 4 а), соответствующий результирующей нагрузке  $F_p$ , действующей на поплавок-отсекатель и определяемой из баланса сил

$$F_p = F_z + G_n - F_\sigma - F_{\sigma c},$$

где  $F_z$  – сила вязкостного трения, увлекающая поплавок в глубь жидкой ванны (сила затягивания);

$G_n$  – сила тяжести поплавка;

$F_\sigma$  – выталкивающая сила;

$F_{\sigma c}$  – сила сопротивления, вызванная динамическим давлением жидкости на элемент при его резком погружении.

Синхронно с записью сигнала, используя цифровую видеокамеру, выполняли съемку картин, отображающих положение головной части отсечного элемента с нанесенными на нее кольцевыми линиями относительно слоев жидкостей, моделирующих сталь и шлаковый расплав. В результате анализа изображений отсечных элементов, последовательно зафиксированных на отдельных кадрах (рис. 4 б, в), удалось установить значения амплитуды и частоты их колебаний, скорость заглубления в жидкую ванну (табл. 1), а также объемы частей поплавка, погруженных в модельные жидкости. На основании полученных данных рассчитали значения выталкивающей силы по известной в гидравлике формуле

$$F_\sigma = g(\rho_\sigma V_{\sigma\sigma} + \rho_m V_{\sigma m}),$$

где  $\rho_\sigma$  – плотность воды, имитирующей сталь;

$\rho_m$  – плотность минерального масла, имитирующего шлак;

$V_{\sigma\sigma}$  – объем части отсечного элемента, погруженной в воду;

$V_{\sigma m}$  – объем части отсечного элемента, погруженной в масло.

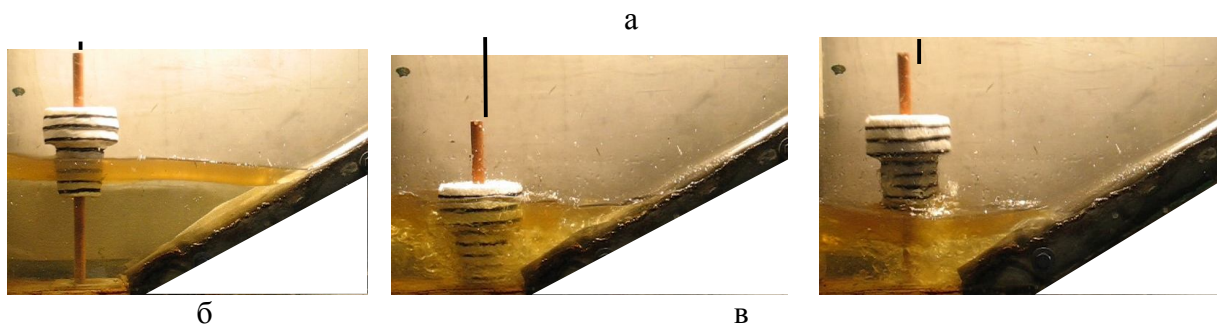
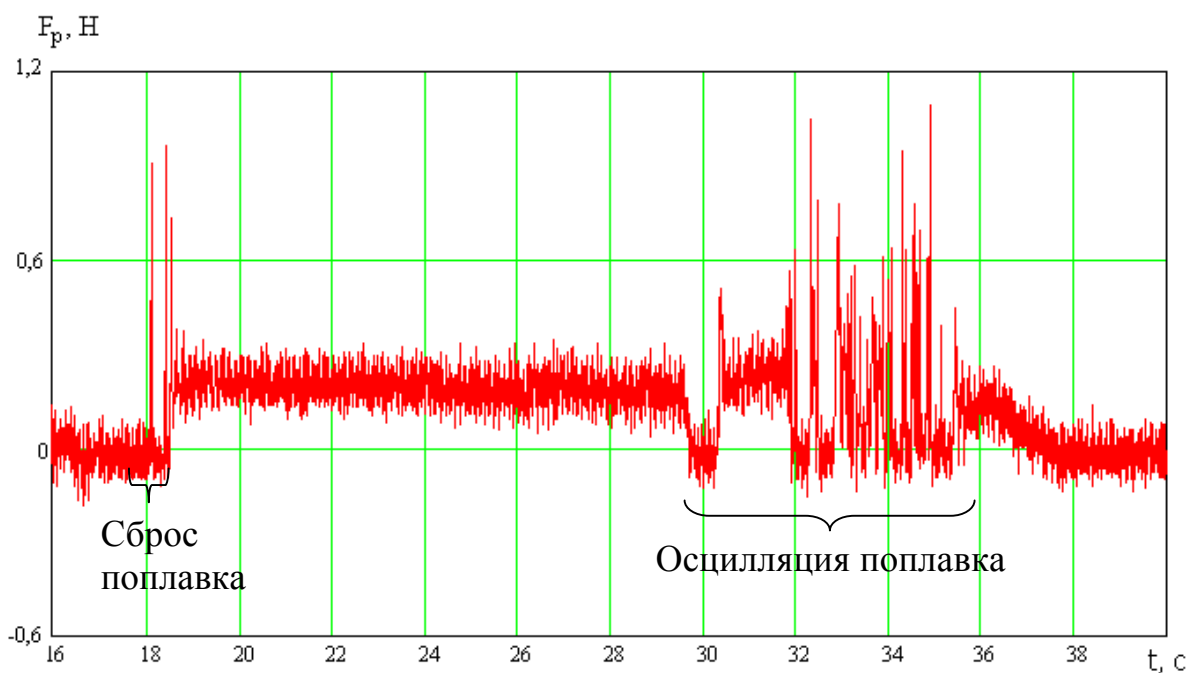


Рисунок 4 - Характерный вид сигнала при контроле результирующей нагрузки  $F_p$  (а), действующей на модель отсечного элемента после сброса в жидкую ванну (б) и во время его колебаний в заключительной стадии имитируемого процесса отсечки шлака (в)

**Таблица 1** Зафиксированные параметры процесса колебаний моделей отсечных элементов

Тип модели отсечного элемента	Амплитуда, мм	Частота, Гц	Скорость погружения в жидкую ванну, м/с
I	40	5	1,0
II	30	6	0,9
III	25	7	0,7
IV	20	7	0,6

Для вычисления силы динамического воздействия жидкости на быстро погружающийся в нее поплавок-отсекатель необходимы данные о коэффициенте сопротивления, зависящем от обтекаемости головной части элемента. Из-за отсутствия в справочной литературе такой информации потребовалось проведение дополнительного эксперимента, суть которого поясняет схема, показанная на рис. 5.

В соответствии с приведенной схемой, в сосуд, заполненный водой, поочередно помещали в перевернутом состоянии модели отсечных элементов, обладающих нулевой плавучестью и соединенных специальной подвеской с барабаном, закрепленным на валу

мотора-редуктора, имеющего регулируемую частоту вращения. Подвеска представляла собой траверсу, снабженную тензорезисторным преобразователем и связанную своей нижней частью с направляющим стержнем модели отсечного элемента. С верхней частью траверсы соединяли прочную синтетическую нить, второй конец которой закрепляли на барабане. При включении мотора-редуктора барабан наматывал нить и поднимал вверх модель отсечного элемента с фиксированной скоростью

$$v = \omega R,$$

где  $\omega$  – угловая скорость барабана;  
 $R$  – радиус барабана.

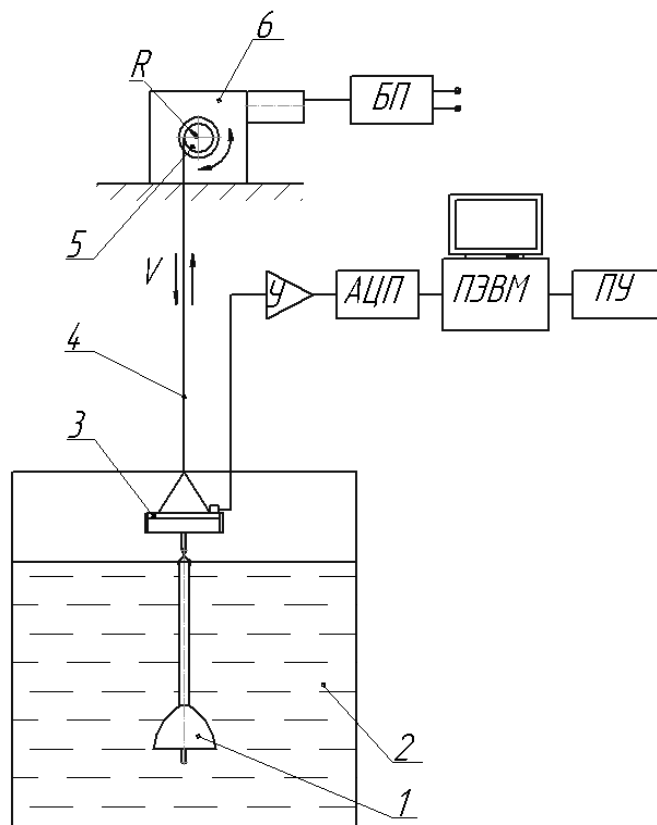


Рисунок 5 - Схема контроля силы сопротивления, действующей на движущуюся в жидкости модель отсечного элемента: 1 – модель отсечного элемента; 2 – сосуд с водой; 3 – тензорезисторный преобразователь; 4 – нить; 5 – барабан; 6 – мотор-редуктор

Во время вертикального перемещения в жидкости отсечного элемента преодолевалась действовавшая на него сила сопротивления, которую регистрировали с помощью тензорезисторного преобразователя. На распечатке сигнала, отображающей характер изменения действовавшей нагрузки, выделяли три участка, на которых зафиксированы соответственно натяжение нити при разгоне, установившемся движении и вызванное силой тяжести отсечного элемента, поднятого на поверхность жидкости.

Измерения для каждого типа модели отсечного элемента проводили несколько раз при разной скорости его движения в жидкости. По данным измерений построили графики зависимости сил сопротивления, действующих на модели элементов, от их скорости при установившемся движении в жидкости (рис. 6). Из этих графиков, используя значения

зафиксированной с помощью видеосъемки скорости резкого погружения моделей отсечных элементов в жидкую ванну во время проявившихся их колебаний, определяли силу  $F_{\partial c}$ , вызванную динамическим давлением жидкости на головную часть поплавка в момент его резкого погружения.

Силу вязкостного трения  $F_z$ , увлекающую отсечной элемент в глубь жидкой ванны, находили из уравнения (1) подставляя в его левую часть измеренные значения  $F_p$ , а в правую – известные значения силы тяжести модели элемента  $G_n$  и вычисленных сил  $F_e$  и  $F_{\partial c}$ .

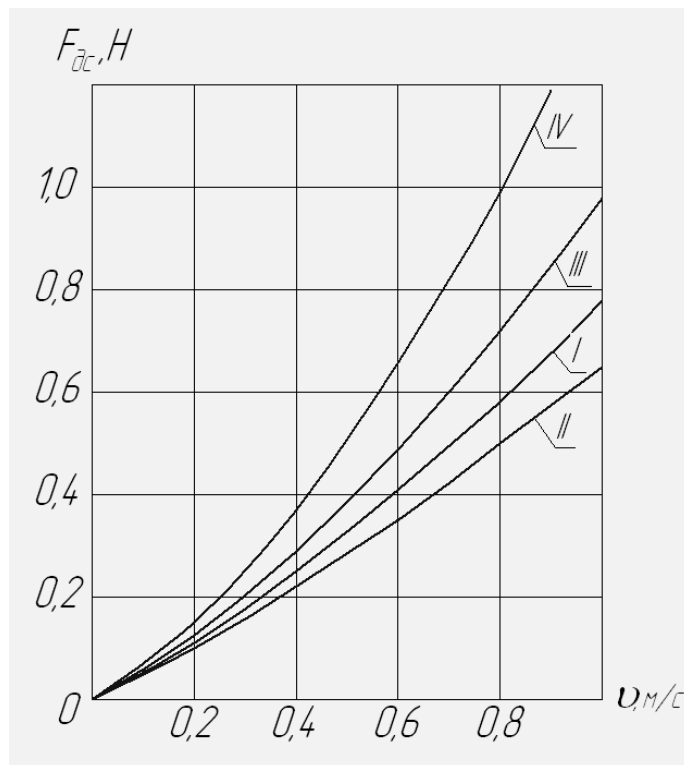


Рисунок 6 - Зависимости силы сопротивления, действующей на модели отсечных элементов, от скорости их движения в жидкости (римскими цифрами обозначен тип элемента в соответствии с рис.1)

Результаты расчета баланса сил, действующих на модели отсечных элементов, представлены в таблице 2.

**Таблица 2** Значения сил, действующих на модели отсечных элементов

Тип модели отсечного элемента	Значения сил, Н				
	$F_z$	$G_n$	$F_e$	$F_{\partial c}$	$F_p$
I	3,68	0,36	2,66	0,78	0,6
II	3,27	0,33	2,52	0,58	0,5
III	3,02	0,35	2,47	0,60	0,3
IV	2,77	0,37	2,29	0,65	0,2

## Выводы

1. Превышение суммы значений сил, затягивающих отсечный элемент в жидкую ванну, над суммой значений сил, препятствующих этому, существенно зависит от формы и объема головной части элемента, а также плотности материала, из которого он изготовлен. Последние два параметра должны обеспечивать заранее рассчитанное погружение элемента, т.е. его плавучесть, позволяющую ему

постоянно находиться на границе раздела слоев шлакового и металлического расплавов. Наряду с этим важное значение имеет такая характеристика отсекающего элемента, как запас плавучести, под которой понимают дополнительную нагрузку, соответствующую силе тяжести жидкой стали в объеме головной части поплавок, расположенной выше поверхности раздела металлической и шлаковой фаз.

2. У моделей отсечных элементов I и II типов запас плавучести оказался ниже силы, затягивающих их в жидкую ванну. Поэтому указанные модели элементов в заключительной стадии имитируемого процесса выпуска металла из конвертера тонули и преждевременно блокировали его выпускной канал, вследствие чего повышался объем жидкости, моделирующей сталь, которая оставалась вместе с имитатором шлака в модели плавильного агрегата. В производственной практике это приводит к потерям металла в скрап, т.е. к снижению выхода годного.
3. Прослеживается закономерность в превышении затягивающих сил над выталкивающими и в увеличении амплитуды колебаний моделей элементов на границе раздела слоев жидкостей, имитирующих металлический и шлаковый расплавы, что подтверждает причинно-следственную связь между резкими изменениями силового баланса и осцилляцией поплавков. Явление колебаний отсечных элементов, наблюдавшееся в заключительной стадии имитируемого процесса выпуска стали, отрицательно сказывается на эффективности задержания конечного шлака. Следовательно, предпочтительной формой поплавок элемента нужно признать ту, при которой амплитуда колебаний будет наименьшей. Поэтому для практического применения могут быть рекомендованы отсечные элементы, имеющие конструктивное исполнение, подобное моделям поплавков III и IV типов.

**Рекомендованная литература: [21, 54, 91, 92, 89].**

### **Лабораторная работа № 7**

#### **Исследование на физической модели параметров системы газодинамической отсечки конечного шлака при выпуске стали из кислородного конвертера**

##### **Постановка задачи**

Отсечка конечного технологического шлака при производстве конвертерной стали является важной технологической операцией, связанной с обеспечением ресурсо- и энергосбережения при осуществлении внеагрегатной обработки металла на установках ковш-печь. В связи с этим на 3-х крупнейших металлургических предприятиях Украины в настоящее время ведутся работы по отладке оборудования, обеспечивающего реализацию выпуска металла из кислородных конвертеров с удержанием конечного шлака путем газодинамического воздействия на него в летке плавильного агрегата. Оценка работы указанной отсечной системы в сталеплавильных цехах украинских комбинатов показала, что гарантированные фирмой-поставщиком показатели эффективности ее функционирования в полной мере не обеспечиваются по неустановленным пока причинам. Их поиск и устранение затруднены из-за отсутствия достоверной информации о степени влияния различных факторов на характер взаимодействия газовых и металлических потоков в выпускном канале конвертера при его закрытии в момент появления шлаковых частиц в струе стали.

В ранее опубликованных работах, посвященных данной проблеме, при экспериментальном исследовании запирающих свойств газовой струи изучались параметры ее взаимодействия со стенками тупикового канала, донная часть которого

имитировала поток расплава. Такая имитация в известной мере искажает реальную картину изучаемого физического процесса, поэтому для получения информации о явлениях, возникающих в момент встречи потоков жидкой и газовой сред в свободном пространстве, а затем в замкнутом объеме выпускного канала, требуется проведение дополнительных экспериментов.

Невозможность визуального контроля газо-гидродинамических процессов, протекающих в ванне реального кислородного конвертера во время прекращения перелива расплава воздействием на него струей газа, подаваемого под избыточным давлением навстречу его потоку, является главным посылком использования метода физического моделирования для изучения особенностей данного способа отсечки конечного конвертерного шлака.

### Цель исследования

Целью проводимых исследований является получение исходной информации, необходимой для разработки методики расчета энергосиловых параметров устройств, обеспечивающих эффективную реализацию процесса активного регулирования количества шлакового расплава, попадающего в разливочный ковш вместе с жидкой сталью. При планировании лабораторных исследований был выбран экстремальный эксперимент, предполагающий поиск оптимальных условий протекания изучаемого явления – резкого механического торможения металлического потока в выпускном канале кислородного конвертера с последующим газовым вытеснением расплава в его ванну.

### Материальное обеспечение

При моделировании процесса газодинамической отсечки конечного конвертерного шлака использована лабораторная установка (рис.1), включающую прозрачную модель верхней части кислородного конвертера 6, выполненную в масштабе 1:5 и снабженную системой газодинамического перекрытия выпускного канала.

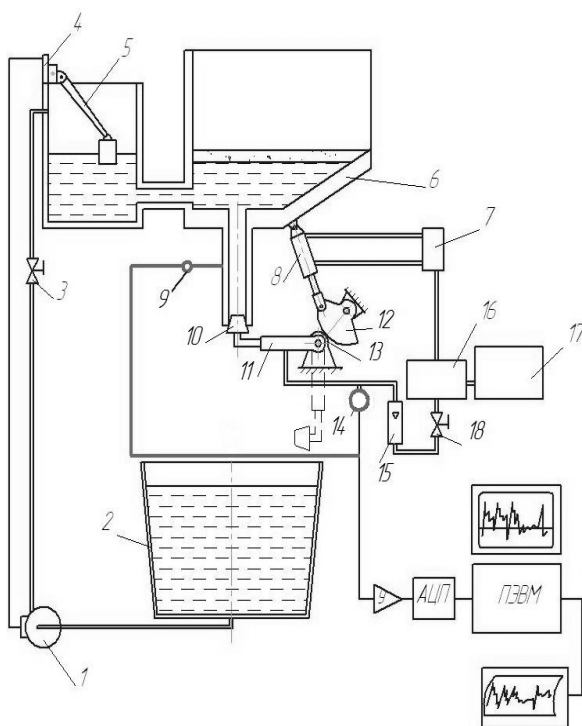


Рисунок 1 - Схема лабораторной установки для моделирования процесса газодинамической отсечки конвертерного шлака

В состав указанной системы входит рама, на которой смонтированы опоры рычага 11, несущего сменную пробку 10 с одним или несколькими соплами и имеющий возможность поворота относительно корпуса модели конвертера под силовым воздействием, передаваемым через ускоряющую зубчатую передачу 12, 13 от пневматического цилиндра 8. К соплу пробки 10 с помощью шланга подавали сжатый воздух, который предварительно закачивали в ресивер 16 компрессором 17. Давление воздуха перед соплом и его расход измеряли соответственно манометром 14 и ротаметром 15. Регулирование расхода сжатого воздуха, подаваемого к соплу пробки, осуществляли вентилем 18, а управление работой пневматического цилиндра выполняли с помощью золотника 7. В состав гидравлической системы установки входила емкость 2 для приема истекающей из модели конвертера жидкости, напорный резервуар с поплавковым устройством 5 и концевым выключателем 4, управляющими работой центробежного насоса 1, производительность которого при необходимости ограничивали вентилем 3. Общий вид физического аналога исследуемой системы газодинамической отсечки конечного конвертерного шлака приведен на рис. 2.

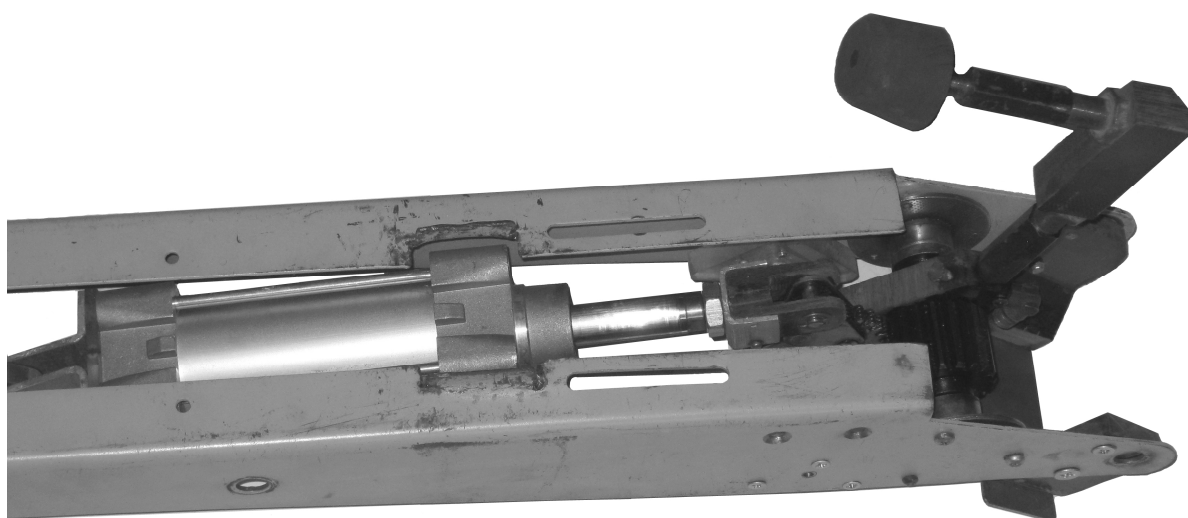


Рисунок 2 – Общий вид физического аналога газодинамической отсечки конвертерного шлака

Для контроля давления в выпускном канале модели конвертера в зоне взаимодействия жидкостного и воздушного потоков применили интегральный силиконовый сенсорный датчик 9 с температурной компенсацией типа MPX5700 (рис.3).

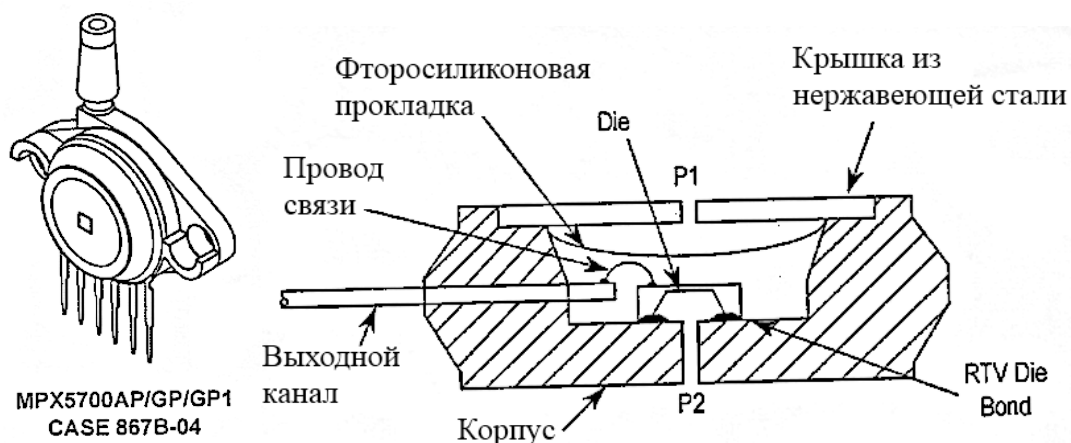


Рисунок 3 - Внешний вид (а) и устройство (б) сенсорного датчика давления

Предполагая, что характер взаимодействия газового и жидкостного потоков при срабатывании системы отсечки шлака в немалой степени зависит от числа и формы сопел пробки, на первом этапе лабораторных исследований провели сравнительные испытания пробок различного конструктивного исполнения (рис.4).

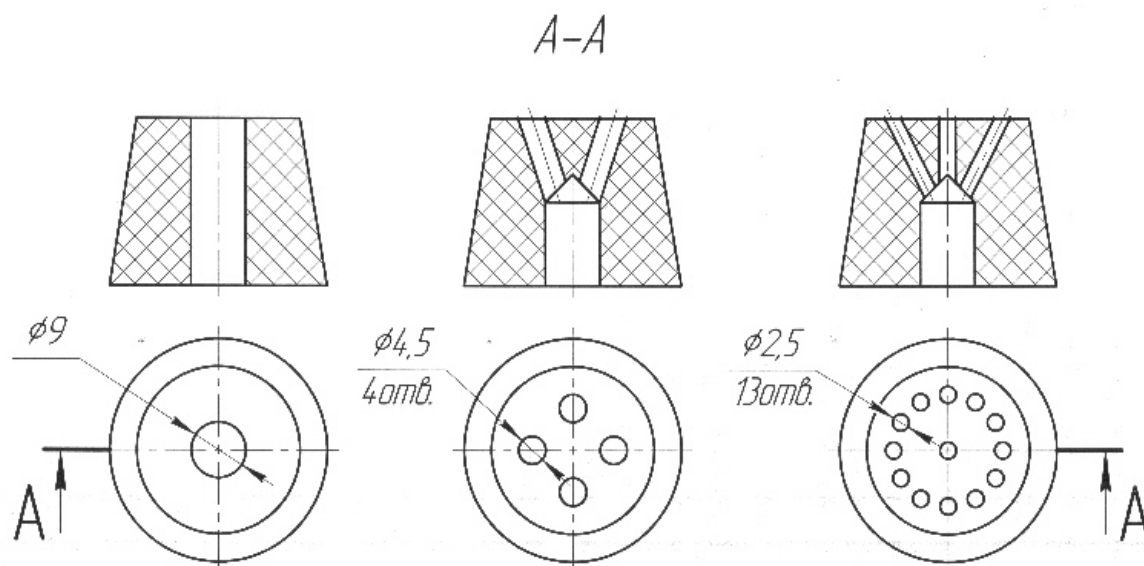


Рисунок 4 - Конструктивное исполнение пробок, использовавшихся при моделировании

Контроль скорости газовой струи, истекающей из сопел пробки, осуществляли с помощью зонда, снабженного тензорезисторным преобразователем (рис. 5).

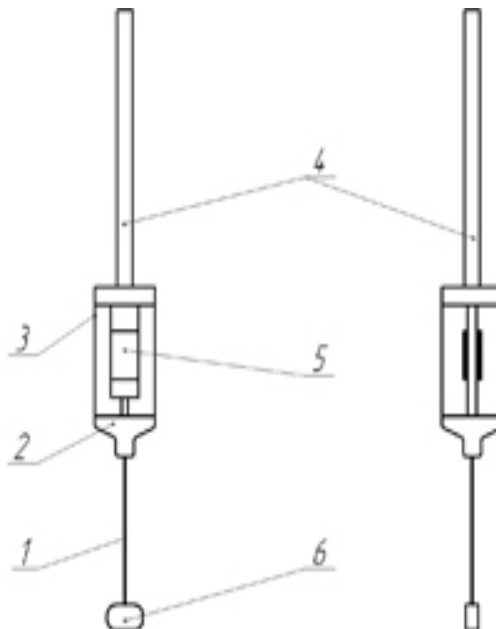


Рисунок 5 – Конструктивное исполнение зонда для контроля скорости газовых струй

Зонд включает миниатюрную пластинку 5 с наклееными фольговыми тензодатчиками, соединенными по полумостовой схеме. Пластинка была помещена в стеклянный баллончик 3, жестко связаный с пустотелой штангой 4, через которую проходят соединительные провода. Один конец пластинки защемлен, а к другому с помощью металлического стерженька 1, пропущенного через герметизирующий резиновый колпачок 2, крепили приемный элемент 6 – диск диаметром 5 мм. При

расположении приемного элемента перпендикулярно направлению движения газового потока на него действует скоростной напор, значение которого прямо пропорционально плотности и квадрату скорости движущейся газовой среды. Сила, вызванная динамическим напором газового потока, изгибает пластинку и деформирует датчики, в результате чего происходит разбалансировка моста сопротивлений. Регистрируемый при этом в режиме реального времени электрический сигнал позволяет судить о значениях скорости газовой струи на фиксированном удалении от сопла пробки.

### Ход выполнения задания и полученные результаты

Основной задачей анализа характера струйного течения, как известно, является определение полей скоростей и расходов по длине и сечению струи, ее границ и угла раскрытия, количества движения и кинетической энергии. В процессе функционирования системы отсечки, пробка с соплом, из которого истекает под избыточным давлением рабочий газ, вначале движется по дуге в окружающей атмосфере и в этот момент газовая струя может считаться свободной. После блокирования выпускного канала кислородного конвертера она не только попадает в замкнутый объем, но и встречает динамическое противодействие со стороны потока расплава. Поэтому рассматривали два случая формирования, развития и движения газовых потоков: в свободном пространстве и в ограниченном стенками канале.

Во время исследования свободных газовых струй изучали характеристики их распределения и формы. В первую очередь определяли профиль потоков газа по сечению факела, а также оценивали его размеры на заданном расстоянии от сопла пробки. В качестве оценочного показателя использовали скорость газового потока (рис. 6) в характерных точках.

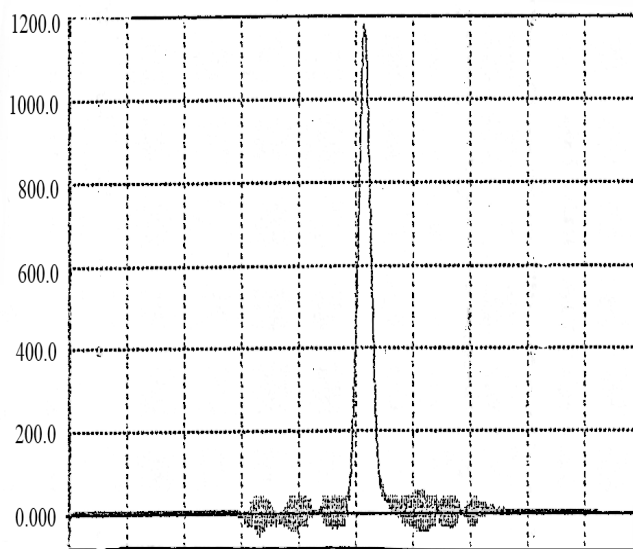


Рисунок 6 - Вид регистрировавшихся сигналов при контроле скорости воздушных потоков

В результате серии измерений для каждой из трех опробованных пробок установили корневой угол газового факела, который рассчитывали по формуле

$$\beta = 2 \arctg (a / b),$$

где  $a$  и  $b$  – размеры, приведенные на рис. 7.

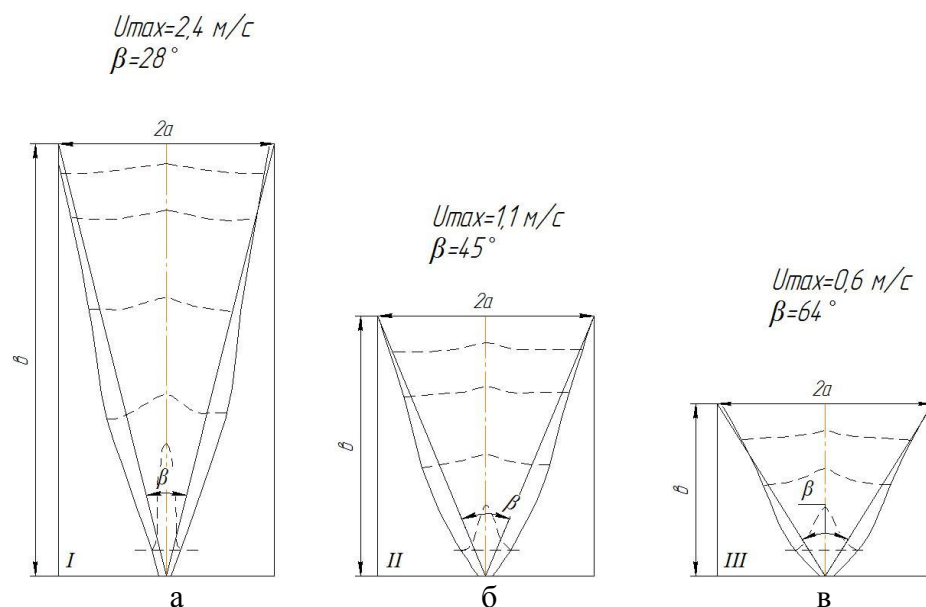


Рисунок 7 - Параметры осесимметричных свободных струй воздуха, истекающих из сопел пробок: а – с одним центральным каналом; б – с 4-мя каналами; в – с 13-ю каналами

Полученные данные позволили установить параметры свободных осесимметричных воздушных струй, истекающих из сопел использовавшихся пробок. В качестве примера на рис. 8 показаны графики изменения скоростей воздушных потоков на различном удалении от пробок при давлении 0,098 МПа на входе их сопел. При этом дальность воздушных струй для пробок с одним, пятью и четырнадцатью соплами соответственно составила 1, 0,6 и 0,4 м, осяевая скорость потока на удалении 100 мм от торца пробки имела значения 2,4 м/с, 1 м/с 0,65 м/с, а корневой угол факела 28, 45 и 64°.

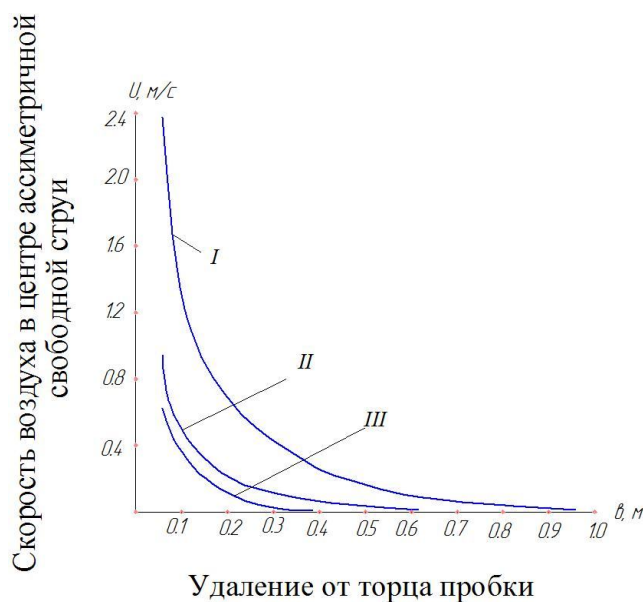


Рисунок 8 - Графики изменения осевых скоростей воздушных струй для использовавшихся пробок

Второй этап лабораторных исследований был связан с экспериментами на гидравлической модели кислородного конвертера, в ходе которых изучали характер изменения параметров жидкостных потоков в канале модели конвертера в заключительной стадии процесса выпуска жидкости, имитирующей расплав; исследовали

влияние на полноту отсечки имитатора шлака формы и числа отверстий в пробке, обеспечивающей блокирование выпускного канала; оценивали эффективность воздействия газовой струи на встречный жидкостный поток в выпускном канале модели конвертера.

Жидкую сталь моделировали чистой водой, так как их кинематические вязкости одинаковы и равны  $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  соответственно при температурах 1550 и 20 °С. Для имитации шлака с вязкостью  $(10 - 33) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при 1595 °С использовали минеральное масло с вязкостью  $35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при 20 °С.

При моделировании соблюдали геометрическое и динамическое подобие, что подтверждалось равенством критериев Ньютона, Фруда и Струхала для натурального образца и его модели. При этом значения указанных критериев, рассчитанных по известным зависимостям, составили

$$Ne = P_n / (\rho_n v_n^2 L_n^2) = P_m / (\rho_m v_m^2 L_m^2) = 0,009;$$

$$Fr = v_n^2 / (g L_n) = v_m^2 / (g L_m) = 2;$$

$$St = (v_n t_n) / L_n = (v_m t_m) / L_m = 1.$$

В этих выражениях:  $P$  – характерная действующая сила;  $\rho$  – плотность жидкой среды;  $v$  – скорость жидкостных потоков;  $L$  – характерный линейный размер;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $t$  – время.

С учетом того, что масштабные множители плотности, линейных размеров и скорости соответственно равнялись  $a_\rho = 7$ ;  $a_l = 5$ ;  $a_v = a_l^{0,5} = 2,23$ , значение масштабного множителя сил составляло:

$$a_F = a_\rho a_l^2 a_v^2 = 7 \cdot 5^2 \cdot 2,23^2 = 875.$$

В качестве главных параметров процесса динамического взаимодействия в выпускном канале модели конвертера газового и жидкостного потоков были приняты их скорости в зоне контакта, расходы и давления.

Осредненное значение скорости жидкостного потока в выпускном канале модели кислородного конвертера рассчитывали по формуле

$$v_{\text{ср.ж}} = 4V / (\pi d_k^2),$$

где  $V$  – объемный расход жидкости, истекающей из модели кислородного конвертера,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$d_k$  – диаметр выпускного канала модели конвертера, м.

Для контроля в режиме реального времени, регистрации и последующей распечатки записанного сигнала, поступавшего с выхода сенсорного датчика (рис.2) и характеризовавшего изменение давления газа в полости выпускного канала модели конвертера в процессе взаимодействия двух встречных потоков – жидкостного и воздушного, имитирующих сталь и технологический газ, использовался измерительный комплекс, включавший усилитель, аналого-цифровой преобразователь и ЭВМ с принтером.

В случае применения пробки с одним центральным соплом диаметром 9 мм, обеспечивающим наибольшую дальноточность воздушной струи с наименьшим корневым углом факела, на границе ее взаимодействия со встречным потоком жидкости в выпускном канале модели конвертера образуется каверна, распадающаяся затем на скопление пузырей в верхней части канала, которые вытесняют из него заторможенную жидкость в ванну модели агрегата.

Совершенно иную картину наблюдали при использовании пробок с несколькими соплами, из которых истекали воздушные струи с большим в 1,5 – 2,2 раза корневым углом факела. При встрече жидкостного потока и воздушной струи, создаваемой пробкой

с несколькими рассредоточенными соплами, в нижней части выпускного канала модели плавильного агрегата газовая среда создает своего рода поршень, который перемещается вверх преодолевая динамическое давление жидкой фазы и вытесняет ее в ванну модели.

Результаты визуального контроля характера взаимодействия встречных потоков воздуха и жидкости в выпускном канале модели кислородного конвертера достаточно хорошо согласуются с данными измерений давления в зоне их контакта. На рис. 9 приведены распечатки зарегистрированных сигналов, позволяющих оценить мгновенные значения и частоту пульсаций давления в контактной зоне.

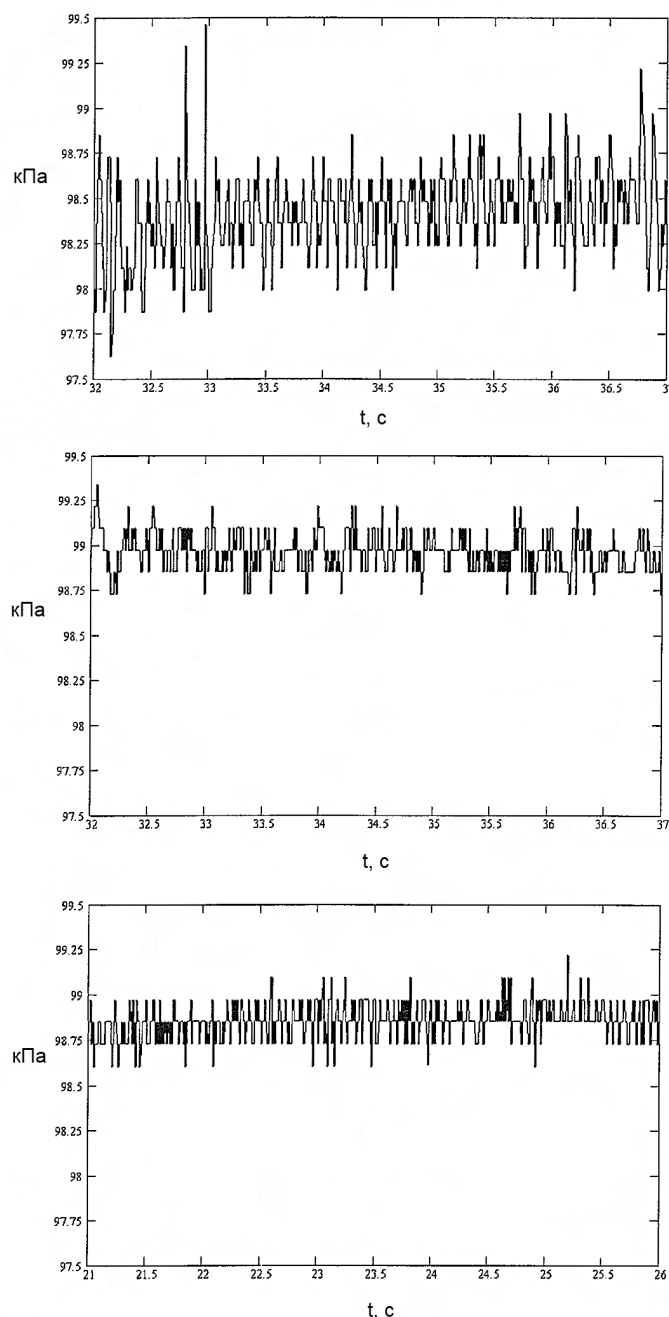


Рисунок 9 - Вид сигналов, зафиксированных во время контроля давления в выпускном канале модели конвертера при запираии его пробками:

- а) – с одним центральным соплом диаметром 9 мм; б) – с 4-мя соплами диаметром 4,5 мм;  
в) – с 13-ю соплами диаметром 2,5 мм

Зафиксированная разница в длительности процесса вытеснения воздухом жидкости из выпускного канала в ванну модели кислородного конвертера объясняется

разностью мощности, развиваемой воздушным потоком при различном конструктивном исполнении пробок и определяемой в первом приближении как произведение давления воздуха на его расход. Расчетные значения мощности воздушных потоков для использовавшихся пробок соответственно составляли 9,8, 7,1 и 3,8 Вт. Снижение мощности воздушного потока при увеличении числа каналов пробки и уменьшении их диаметров связано с ростом местных сопротивлений, вызывающих сокращение скорости и расхода истекающего воздуха.

При использовании пробки с одним центральным соплом значение давления в выпускном канале изменялось в пределах 98 – 98,75 кПа, а для пробок с 4-мя и 13-ю рассредоточенными соплами пределы колебаний давления составили соответственно 98,75 – 99,25 кПа и 98,62 – 99 кПа.

Как видно, размах колебаний давлений в зоне взаимодействия потоков воздуха и жидкости, ограниченной стенками канала модели конвертера, в рассмотренных случаях составлял 0,75; 0,5 и 0,38 кПа, что обусловлено разным динамическим давлением воздушных струй, суммировавшимся с динамическим напором жидкостного потока, который имел практически одинаковые значения во всех трех вариантах блокирования выпускного канала.

## **Выводы**

В соответствии с данными, полученными в ходе физического моделирования изучаемого технологического процесса, можно сделать следующие выводы:

- на характер процессов, протекающих в канале кислородного конвертера во время газодинамической отсечки конечного технологического шлака, в значительной мере влияют параметры газовых струй, истекающих из сопел пробки, блокирующей летку плавильного агрегата. Главными из них являются дальнобойность и корневой угол факела газовой струи.

- при промышленной реализации газодинамической отсечки конвертерного шлака следует отдавать предпочтение пробкам, имеющим один центральный газоподводящий канал соответствующего диаметра, поскольку в этом случае удастся снизить местные потери напора, достичь максимальной дальнобойности газовой струи, обеспечить быстрое перекрытие выпускного канала и минимизировать количество шлакового расплава, попадающего в разливочный ковш.

- для эффективного функционирования системы газодинамической отсечки конечного конвертерного шлака необходимо обеспечить требуемую мощность газового потока, вытесняющего металлический расплав из выпускного канала плавильного агрегата в его ванну. Давление и расход рабочего газа должны задаваться из условия равенства энергий или мощностей взаимодействующих в выпускном канале газовых и жидкостных потоков с учетом геометрических параметров летки конвертера и пробки, перекрывающей ее канал.

**Рекомендуемая литература:** [11, 10, 16].

## Лабораторная работа № 8

### Исследование на физической модели работы манипулятора для замены огнеупорных труб, экранирующих струю стали при ее переливе из разливочного ковша в промежуточный ковш

#### Постановка задачи

Экранирование струи стали от окружающей атмосферы с помощью защитной огнеупорной трубы на участке разливочный ковш – промежуточный ковш является обязательным технологическим приемом в условиях производства качественной непрерывнолитой заготовки. Механизированную замену и удержание огнеупорной трубы в процессе серийной разливки стали на МНЛЗ осуществляют, как известно, с помощью специального манипулятора, кинематическая схема которого должна обеспечивать требуемую точность позиционирования относительно стакана-коллектора затвора сталеразливочного ковша защитного элемента, надежную его фиксацию в рабочей позиции и синхронное перемещение с подъемно-поворотным станком.

За последнее десятилетие были запатентованы несколько конструктивных схем манипуляционных систем, однако в производстве наибольшее распространение получила одна из них, показанная на рис. 1.

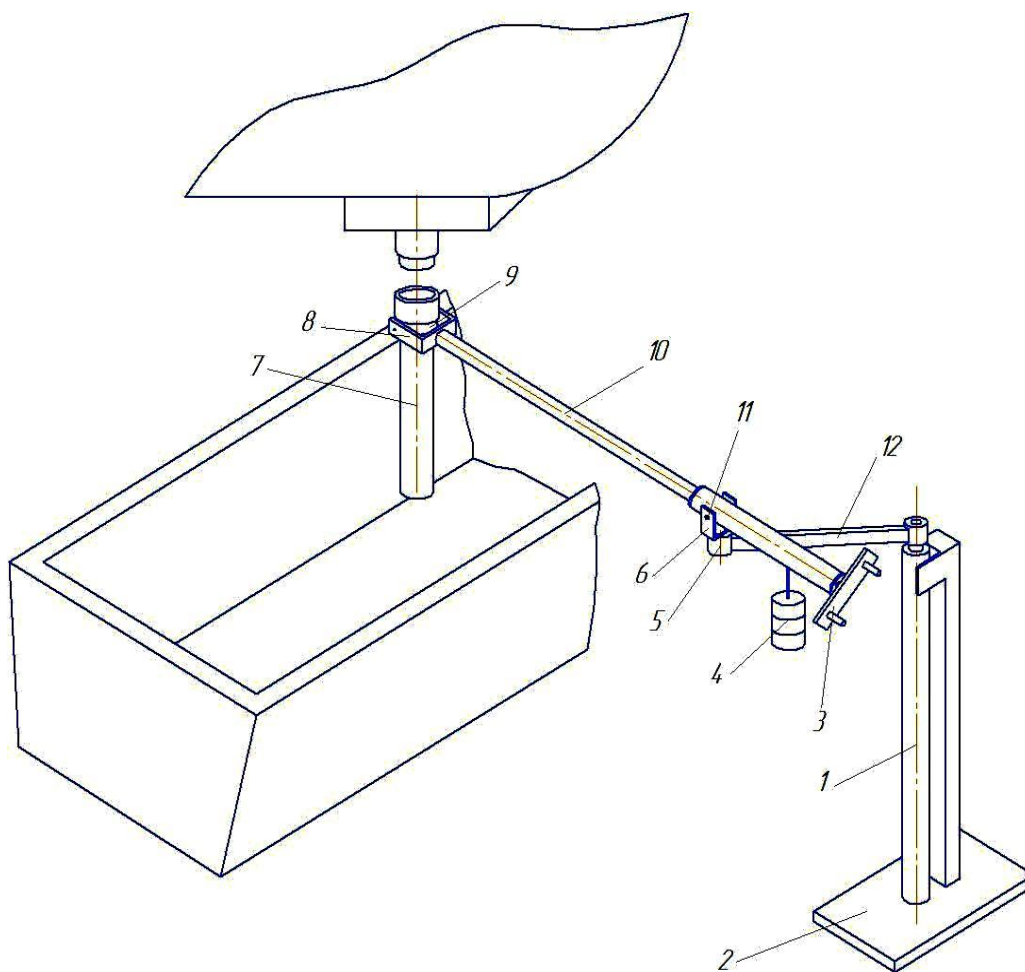


Рисунок 1 – Конструктивная схема манипулятора, для замены защитных труб, применяемая на большинстве металлургических предприятий при непрерывной разливке стали

В ее состав входит колонна 2, закрепленная на основании 1 и несущая поворотный кронштейн 12, на конце которого установлена подшипниковая опора 5 с вертикальной вилкой 6, удерживающей на цапфах мундштук 11. В мундштуке на двух подшипниковых опорах установлена штанга 10, снабженная вилкой 8, несущей на цапфах опорное кольцо 9 для удержания защитной огнеупорной трубы 7, имеющей возможность относительного поворота в вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось штанги 10. На задней части мундштука 11 размещены противовес 4 и рукоятка 3 для поворота вручную штанги 10 в горизонтальной и вертикальных плоскостях при выполнении требуемых перемещений и ориентации в пространстве объекта манипулирования – защитной трубы.

Практика применения подобной защитной системы в сталеплавильных цехах зарубежных и отечественных металлургических предприятий показала, что эффективность ее использования в значительной мере зависит от плотности стыка между стаканом-коллектором разливочного ковша и огнеупорной трубой, а также от обеспечиваемого совпадения продольных осей их каналов. Для улучшения герметизации стыка применяют вставки, выполненные из пластоэластичного материала, состоящего из огнеупорного наполнителя, легкоплавкого неорганического связующего, каучука и технологических добавок.

Достаточно часто с целью уменьшения подсоса воздуха в полость защитной трубы, ее стык со стаканом-коллектором ковшового затвора обдувают по всему периметру аргоном, используя при этом специальные кольцевые пористые элементы.

Следует отметить, что указанные меры могут оказаться малоэффективными из-за имеющейся конструктивной недоработки используемого манипулятора. Довольно часто в процессе эксплуатации сталеразливочного ковша его металлическая донная часть под длительным воздействием высоких механических и тепловых нагрузок подвергается короблению, в результате которого нарушается перпендикулярность относительно вертикали базовой поверхности фланца, сваренного в днище для крепления затвора, вследствие чего продольная ось разливочного устройства, а значит, и струя стали, истекающая из ковша со скоростью 10-4 м/с, также будет отклоняться от вертикали. В случаях, если ось поворота фланца в вертикальной плоскости, вызванного короблением днища ковша, не совпадает с осью поворота опорного кольца относительно удерживающей его вилки или сама вилка неточно зафиксирована относительно корпуса шиберного затвора (фото на рис. 2), струя стали размывает внутреннюю поверхность канала защитной трубы, что является причиной преждевременного выхода из строя огнеупорного изделия (фото на рис. 3).



Рисунок 2 – Относительное положение защитной трубы и стакана-коллектора затвора при перекосе базовой поверхности фланца, вызванного короблением днища ковша



а



б

Рисунок 3 – Защитная труба (а) и характер ее повреждения (б), связанного с несовпадением осей состыкованных огнеупоров

Результаты статистического анализа срока службы кварцевых труб свидетельствует о том, что из-за возникающего несовпадения продольных осей каналов ковшового затвора и защитной трубы длительность ее нормального функционирования до замены сокращается минимум в 2-3 раза. В связи с этим повышается расход дорогостоящих огнеупорных труб, а также в разливаемую сталь попадает большое количество неметаллических включений.

### **Цель исследования**

Поиск технического решения, направленного на устранение негативных последствий, связанных с преждевременным выходом из строя защитных огнеупорных труб.

### **Материальное обеспечение**

При модернизации манипуляционной системы реализованы два технических решения, направленные на обеспечение самоустановки защитной трубы относительно стакана-коллектора ковшового затвора при переводе ее в рабочую позицию и достижение за счет этого соосности каналов состыкованных огнеупорных элементов, а также на облегчение и ускорение выполнения операции по замене вышедшего из строя керамического изделия.

Суть решения поставленной задачи поясняет рис. 4, в соответствии с которым в вилке 1, жестко связанной с концом штанги 7, на цапфах 5 установлено с возможностью относительного поворота несущее кольцо 2, внутри которого на цапфах 4 размещено опорное кольцо 3, также имеющее возможность поворота.

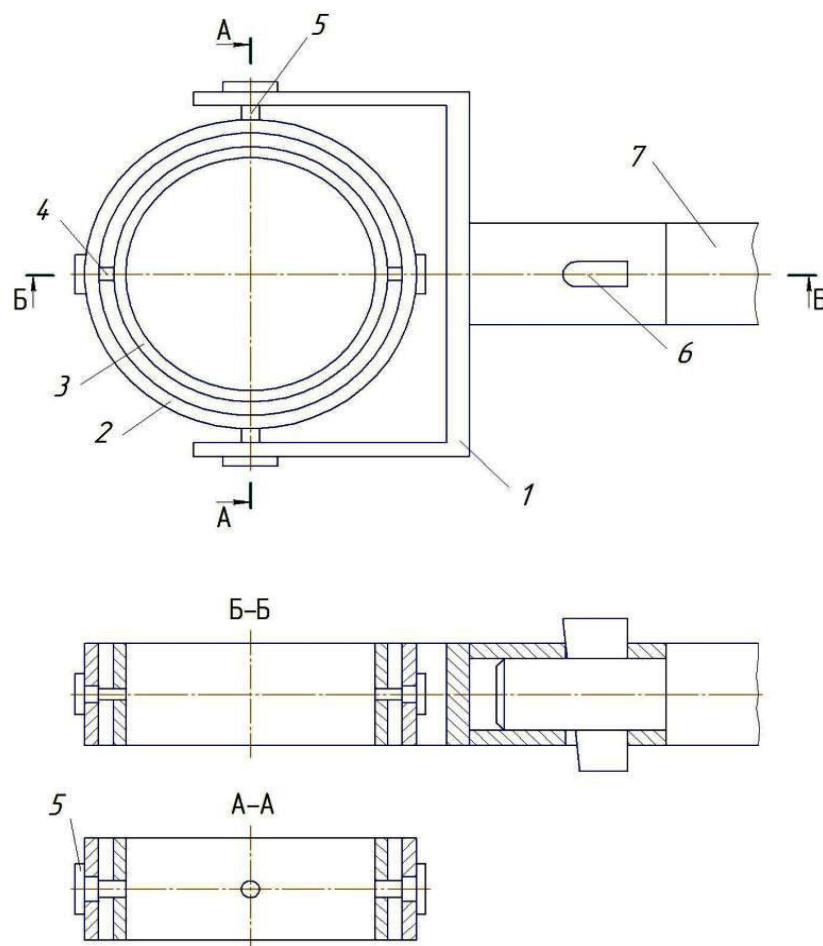


Рисунок 4 – Конструктивное исполнение опорного узла, обеспечивающего самоустановку защитной трубы относительно стакана-коллектора ковшового затвора: 1 – вилка; 2 – наружное несущее кольцо; 3 – внутреннее опорное кольцо; 4 – 5 – цапфы; 6 – штанга; 7 – клин

При этом оси поворота обоих колец лежат в одной плоскости и пересекаются под углом  $90^\circ$ . Благодаря этому, защитная труба, удерживаемая опорным кольцом в вертикальном положении во время выполнения с ней манипуляционных операций, имеет возможность отклоняться от вертикали на угол  $3-5^\circ$  в любом направлении. Этим обеспечивается соосность каналов стакана-коллектора ковшового затвора и состыкованной с ним трубы, поскольку контактные поверхности обоих огнеупорных изделий выполнены коническими.

Таким образом, истекающая из ковша струя стали, на всем протяжении канала защитной трубы, не оказывает динамических воздействий на ее внутреннюю поверхность и не вызывает интенсивной эрозии и износа.

Учитывая экстремальные условия работы опорного узла и необходимость его периодической замены в случае налипания на его поверхности закристаллизовавшихся брызг металла, в конструкции применено быстроразъемное клиновое соединение 8 вилки со штангой.

Как уже отмечалось, поворот штанги относительно ее продольной оси в существующих конструкциях манипулятора осуществляют вручную, воздействуя на непосредственно связанный с ней рычаг или вращая маховик, установленный на быстроходном валу специального редуктора, передающего крутящий момент штанге. В первом случае выполнение поворота штанги связано со значительными физическими

нагрузками, а во втором с замедлением манипуляционной операции. С учетом этого в конструкции модернизированного манипулятора вращение штанги относительно ее продольной оси осуществляется с помощью электромеханического привода, включающего (рис. 5) двигатель постоянного тока с плавным регулированием частоты вращения, вертикальный трехступенчатый редуктор, а также рукоятку с кнопками, для дистанционного управления и ориентации в пространстве рычажной системы, уравновешенной контргрузом.

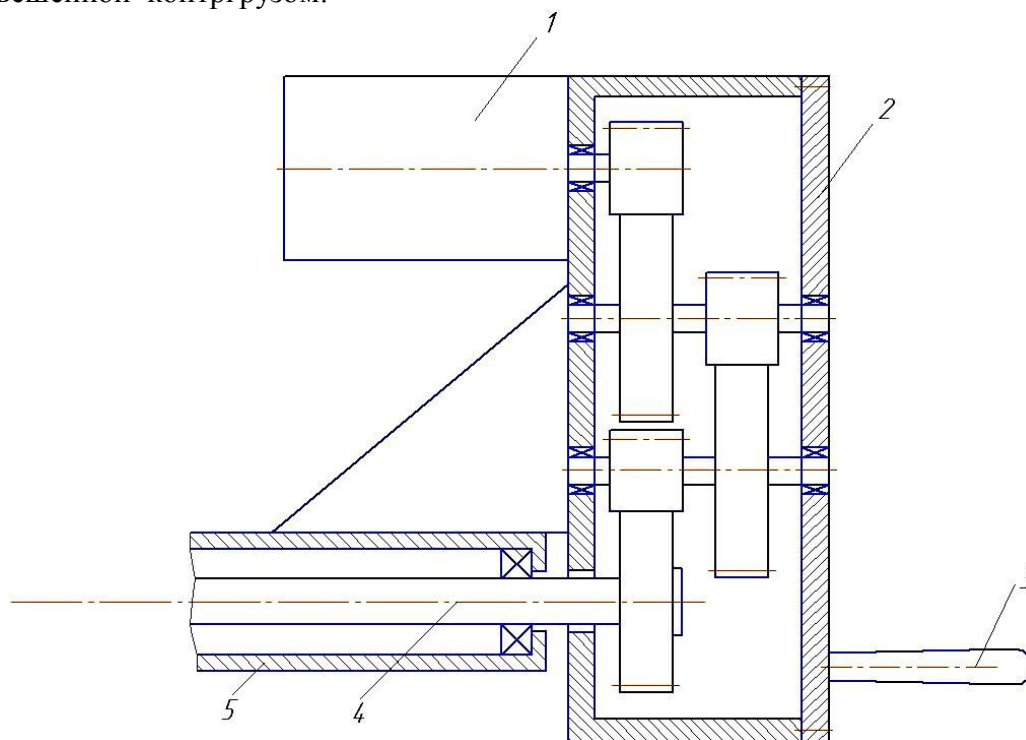


Рисунок 5 – Схема электромеханического привода механизма поворота штанги: 1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – вертикальный трехступенчатый редуктор; 3 – рукоятка; 4 – хвостовик поворотной штанги; 5 – мундштук

### Ход выполнения задания и полученные результаты

Для проверки правильности принятых технических решений, корректности полученных расчетных зависимостей, выявления и устранения “узких мест” в конструкции предлагаемой манипуляционной системы еще на стадии ее проектирования изготовлен опытный образец усовершенствованного устройства (фото на рис. 7), на котором в лабораторных условиях провели тестирование надежности функционирования всех его узлов. Экспериментальные исследования включали:

- контроль напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных элементов механической системы, манипулятора;
- измерение энергосиловых параметров механического привода в различных условиях его работы;
- определение скорости и точности позиционирования объекта манипулирования (модели защитной трубы) относительно стакана-коллектора шиберного затвора, обеспечиваемые электроприводом и системой его управления.

Как показали результаты прочностных расчетов, в процессе работы манипулятора, наибольшей нагрузке подвергается поворотный кронштейн (рис. 1), размеры и форма поперечного сечения которого при заданном вылете, должны соответствовать физическим

напряжениям, вызванных изгибом и кручением под действием силы тяжести штанги, защитной трубы и электромеханического привода.

Поскольку в рычажной системе исследуемого манипулятора было обеспечено грузовое уравнивание штанги, во внимание принимали только деформацию кронштейна, связанную с его изгибом. Для контроля значений возникающих деформаций и вызываемых при этом напряжений в теле кронштейна использовали метод тензометрии, в соответствии с которым на подготовленную поверхность исследуемой детали наклеили фольговые тензодатчики, соединенные по мостовой схеме (рис. 8). С помощью такого тензорезисторного преобразователя получали электрический сигнал, пропорциональный возникающей деформации кронштейна в зоне размещения моста сопротивлений, который поступал на вход усилителя и после преобразования с помощью АЦП в цифровой код, подавался в системный блок ПЭВМ для обработки и последующего визуального представления (рис. 9).



Рисунок 7 – Опытный образец усовершенствованного манипулятора

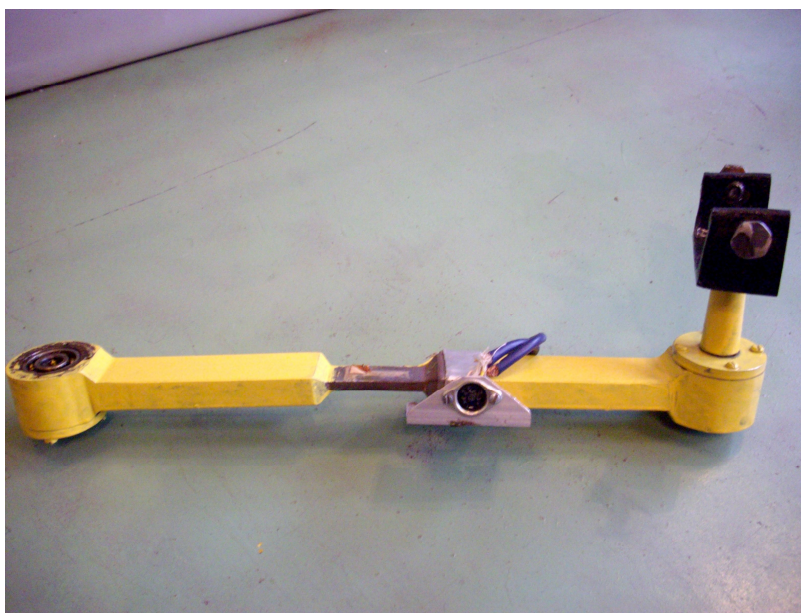


Рисунок 8 – Установка тензодатчиков на консоли манипулятора

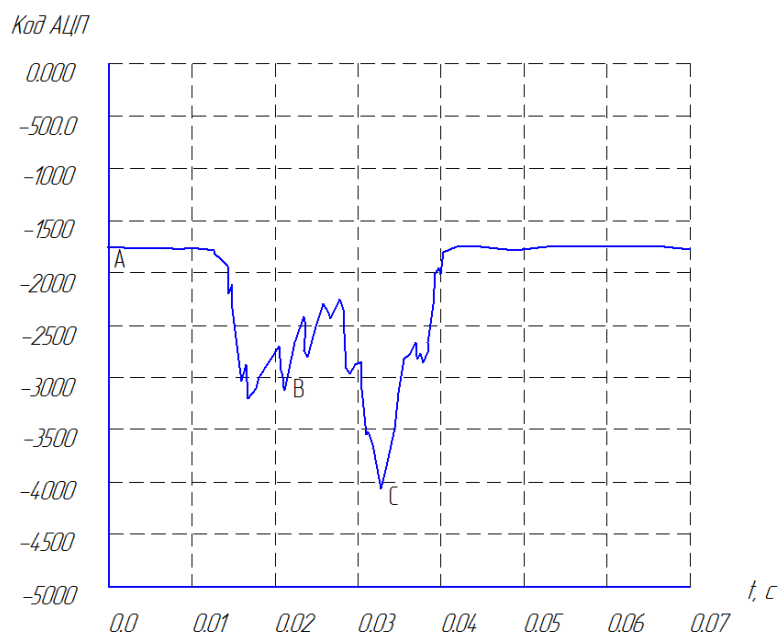


Рисунок 9 – Характер изменения напряженно-деформированного состояния консоли манипулятора

Сведения о реальных значениях деформаций кронштейна, полученные после расшифровки зарегистрированных сигналов с помощью тарировочной зависимости (рис. 10), позволили найти оптимальную форму его поперечного сечения, при которой обеспечивается требуемая прочность детали при минимальной ее материалоемкости.

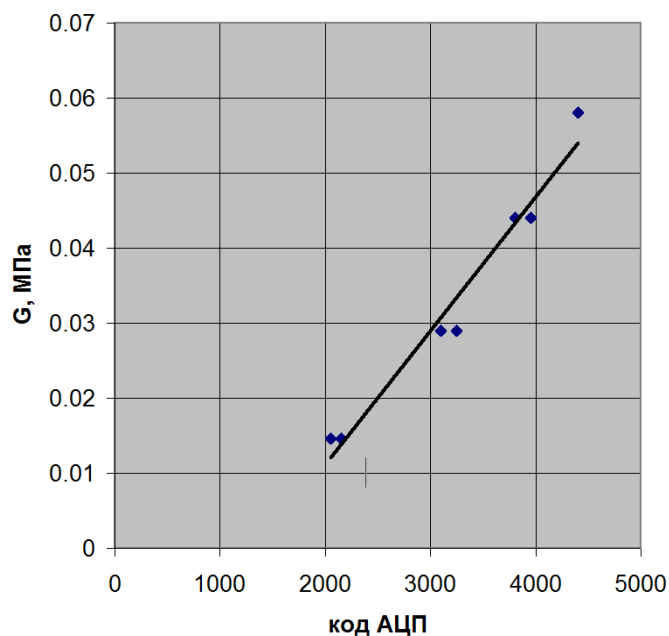


Рисунок 10 - График линейной зависимости цифровых параметров тарировки от величины изгибающего напряжения

На гидравлической модели (фото на рис. 11) выполнили сравнительные испытания манипуляторов существующей и предложенной конструкций, которые показали, что действие известного негативного фактора, вызывающего локальный интенсивный износ

защитного огнеупора фото на рис. 12, практически полностью устраняется благодаря возможности самоустановки трубы, удерживаемой с помощью усовершенствованного манипулятора (фото на рис. 13).

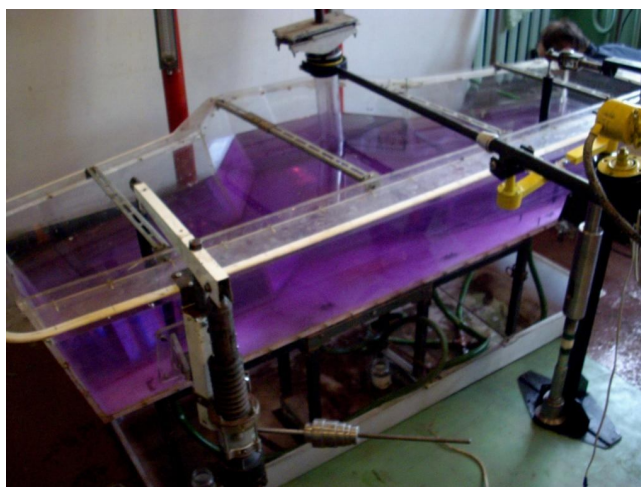


Рисунок 11 – Гидравлическая модель промежуточного ковша, оборудованного манипуляционной системой замены защитных огнеупорных труб



Рисунок 12 - Моделирование процесса разливки стали при использовании манипулятора существующей конструкции (случай несоосности каналов ковшового затвора и защитной трубы)



Рисунок 13 – Моделирование процесса разливки стали при использовании усовершенствованного манипулятора, обеспечивающего самоустановку защитной трубы относительно ковшового затвора

## **Выводы**

Конструктивная схема предложенного манипулятора с самоустанавливающимся опорным узлом, позволяет устранить негативные последствия, связанные с несовпадением продольных осей каналов ковшового затвора и экранирующей огнеупорной трубы во время разливки стали с защитой ее от вторичного окисления. Это обеспечивает заметное снижение расхода защитных огнеупорных изделий и себестоимость производимой непрерывнолитой заготовки.

**Рекомендуемая литература:** [19, 22, 42, 48, 63, 95].

## **Лабораторная работа № 9**

**Исследование на физических моделях эффективности применения устройств, регулирующих направленность потоков расплава в промежуточном ковше МНЛЗ**

### **Постановка задачи**

Необходимость совершенствования технологии непрерывной разливки стали требует проведения обширных теоретических и экспериментальных исследований гидродинамических процессов, связанных с перетеканием металла из основного ковша в промежуточный и далее в кристаллизаторы МНЛЗ. Особое внимание при этом уделяют условиям эксплуатации промежуточного ковша, конструктивное исполнение которого существенно влияет на обеспечиваемую стабильность таких технологических параметров, как скорость и температура разливки, в значительной мере определяющих структуру металла и состояние поверхности отливаемых слитков. В последнее время с целью ослабления действия факторов, негативно влияющих на гидродинамическую обстановку

в ванне промежуточных ковшей многоручьевых МНЛЗ, активизированы работы, связанные с поиском эффективных технических решений, позволяющих активно воздействовать на характер распределения потоков жидкой стали во время ее движения из приемной зоны к местам расположения стаканов-дозаторов.

Достаточно действенным средством, облегчающим решение ряда сложных задач, связанных с внедрением в практику металлургического производства передовой технологии непрерывной разливки стали, является физическое моделирование, позволяющее существенно снизить трудовые, временные и материальные затраты при проведении исследований.

Главными параметрами, характеризующими гидродинамику процессов, протекающих в ванне промежуточных ковшей, считают скорость и турбулентность потоков металла, а также длительность его пребывания в ковше (резидентное время). Поэтому при физическом моделировании этих процессов в первую очередь осуществляют контроль указанных величин. Основные трудности, возникающие при проведении измерений скоростей жидкостных потоков в моделях промежуточных ковшей, обусловлены с одной стороны относительно малыми скоростями движения среды (0,05 – 0,30 м/с), а с другой - высокой степенью турбулентности, достигающей в характерных зонах жидкой ванны 50%.

### **Цель исследования**

Целью проводимого исследования являлась экспериментальная проверка на физической модели эффективности функционирования специальных устройств, обеспечивающих активное влияние на картину распределения и динамику жидкостных потоков в ванне промежуточного ковша 4-х ручьевой МНЛЗ.

### **Материальное обеспечение**

Модельные исследования проводят на лабораторной установке, общий вид которой показан на рис. 1. В ее состав входят прозрачные, выполненные из органического стекла объемные модели промежуточного ковша 4-х ручьевой МНЛЗ и распределительного устройства (рис. 2), а также зонд для контроля скорости жидкостных потоков, схематично представленный на рис. 3. Зонд снабжен тензометрическим преобразователем, включенным в измерительную схему, в состав которой входит усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и ПЭВМ. Тензометрический преобразователь содержит плоский упругий элемент 5 с наклеенными фольговыми тензодатчиками, помещенный в герметичный стеклянный баллон 3, верхняя часть которого жестко соединена с полый штангой 4, служащей для его фиксации в нужном положении во время проведения измерений, а также вывода проводов, соединяющих контакты датчиков с усилителем. Верхний конец упругого элемента заземлен, а нижний соединен с рычагом 1, вставленным в отверстие резинового колпачка 2, надетого на нижнюю часть баллона. На нижнем конце рычага 1 посредством резьбового соединения закреплен диск 6. Достоинством такого зонда является то, что его можно использовать в химически активных, электропроводных или загрязненных средах. Он имеет хорошую частотную характеристику (верхняя граница частотного диапазона 100 Гц). Благодаря тому, что устройство подобного типа является измерителем двунаправленного действия, оно хорошо функционирует вблизи границы изменения направления потоков.

### **Ход выполнения задания и полученные результаты**

При наблюдении за потоками модельной жидкости направление их движения обозначают с помощью визуализации, предполагающей подачу в циркулирующую

жидкость специальных красителей, вводимых в жидком состоянии с помощью шприца или с использованием напорной емкости, располагаемой над моделью на высоте не менее 2м.



Рисунок 1- Общий вид лабораторной установки для моделирования процесса непрерывной разливки стали

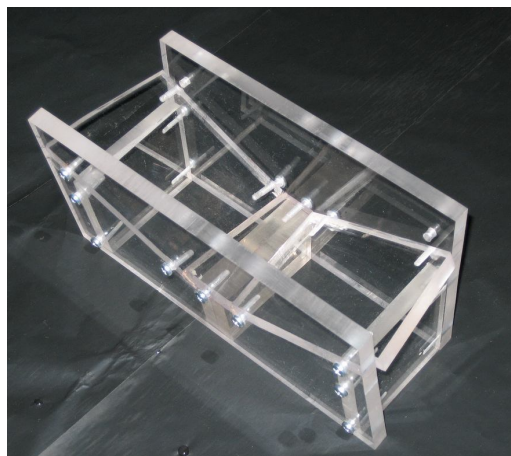


Рисунок 2 - Модель устройства для распределения жидкостных потоков

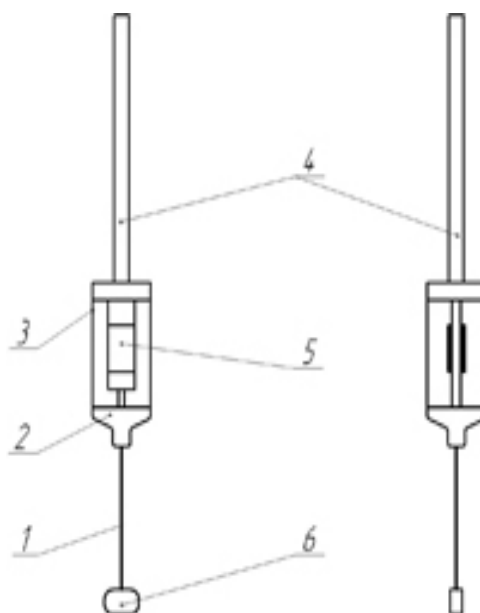


Рисунок 3 - Схема зонда для измерения скорости жидкостных потоков

С использованием аппаратных средств контроля параметров гидродинамических процессов выполнили проверку новых технических решений в области непрерывной разливки и выработали рекомендации по практическому применению предложенных новшеств в конструкциях промежуточных ковшей МНЛЗ, эксплуатируемых в сталеплавильных цехах ряда металлургических предприятий.

Модификация донной части промежуточного ковша за счет применения сменного огнеупорного блока, имеющего профилированную рабочую поверхность и прикрепляемого с помощью замкового устройства к днищу промежуточного ковша в месте падения струи металла, обеспечивает направленное движение потока по дугообразным траекториям. На рис. 4 показаны достигаемую с помощью распределительного устройства направленность и скорость распространения потоков визуализированной жидкости, имитирующей расплав. При правильно подобранных углах наклона боковых граней распределительного устройства в ванне промежуточного ковша можно обеспечить траектории потоков металла, в наибольшей мере способствующие развитию процессов удаления неметаллических включений и распределения тепловой энергии в объеме расплава, что в итоге положительно скажется на качестве отливаемой заготовки.

Для проверки перспективности исследований в данном направлении смоделировали процесс распространения потоков металла в промежуточном ковше при использовании модифицированных огнеупорных изделий, подающих жидкую сталь. В качестве альтернативного решения опробовали новое конструктивное исполнение погружной защитной трубы, имеющей глуходонный канал с двумя боковыми выходными отверстиями в нижней части. Для оценки эффективности регулирования жидкостных потоков с помощью такой трубы изготовили несколько ее моделей, имеющих различную форму и площадь проходного сечения отводящих каналов, а также угол между их осями в горизонтальной плоскости. Сечения отводящих каналов имели форму круга, квадрата и прямоугольника. Угол между осями каналов варьировали в пределах  $160 - 180^\circ$ .

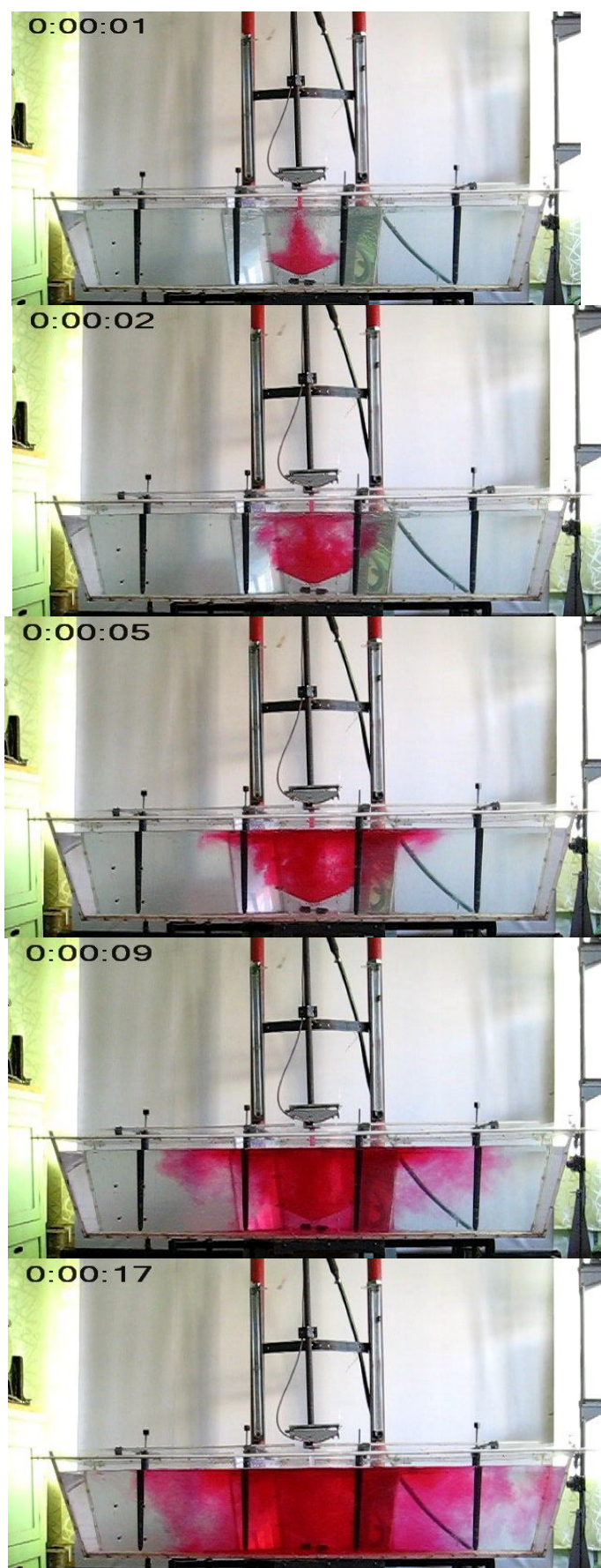


Рисунок 4 - Изменяющиеся во времени картины развития направленности потоков жидкости при имитации разливки открытой струей при наличии распределительного устройства

Эксперименты показали, что защитная труба такой конструкции обеспечивает организацию строго направленных жидкостных потоков в ванне промежуточного ковша (фото на рис.5). Установлено также, что траекторию потоков можно корректировать, меняя форму и размеры проходного сечения отводящих каналов. Так, при использовании защитной трубы, имеющей круглые отводящие каналы, диаметры которых равнялись диаметру канала стакана-коллектора ковшового затвора, струи жидкости при попадании в модель промежуточного ковша возбуждают два потока, начинающих движение в противоположных направлениях по периметру ванны и встречающихся в средней ее части у передней стенки, образуя циркуляционные контуры, взаимодействующих между собой. В результате такого взаимодействия модельная жидкость из приемной части вначале поступает к дальним ручьям, а затем к ближним, что создает благоприятные условия для температурной стабилизации процесса разливки.

Наличие защитной трубы, как известно, не дает полной гарантии предотвращения вторичного окисления стали на участке сталеразливочный ковш - промежуточный ковш, поскольку из-за эжекционного действия струи металла в полости трубы создается разрежение, вызывающее подсос воздуха в зазор между ее чашей и торцом стакана-коллектора затвора сталеразливочного ковша. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что из-за возникающего разрежения жидкость, моделирующая расплав, поднимается в полости защитной трубы над свободной поверхностью жидкой ванны модели промежуточного ковша. Высота подъема модельной жидкости зависит от интенсивности подсоса воздуха через неплотное соединение стакана-коллектора затвора и защитной трубы и насосного эффекта, развиваемого жидкостной струей. Весь воздух, поступающий в полость защитной трубы, увлекается струей жидкости и уносится в ванну на значительную глубину. Затем пузырьки захваченного воздуха всплывают и возбуждают циркуляцию жидкости в вертикальных плоскостях по замкнутому контуру в приемной части модели промежуточного ковша со скоростью 0,08 – 0,15 м/с, оказывая тем самым существенное влияние на характер гидродинамических процессов, протекающих в этой зоне ванны. Эти процессы не только способствуют оголению поверхности металла, но и резко снижают эффективность действия устройства – разделителя потоков.

Создав условия, препятствующие интенсивному захвату воздуха струей металла в полости защитной трубы, можно повысить эффективность функционирования устройства, регулирующего направленность потоков в приемной части промежуточного ковша. В связи с этим смоделировали вариант разливки с применением эжектора, обеспечивающего регулируемую эвакуацию воздуха из полости защитной трубы. При создании разрежения в полости защитной трубы, как показали результаты измерений скорости потоков модельной жидкости на выходе из ее полости, полученные с помощью зонда, снабженного тензорезисторным преобразователем, амплитуда регистрируемого сигнала, фиксирующего пульсации скорости, снижается в 7 – 10 раз. Благодаря эффекту торможения потока жидкости в полости защитной трубы создаются благоприятные условия для всплытия неметаллических включений и снижения насыщения металла газами. Для сравнения на рис. 6 приведены фотографии картин потоков модельной жидкости, характерных для разных условий работы направляющего устройства.

Как видно из фотографий, на которых отображены картины движения жидкостных потоков, регулируемых направляющим устройством при различной интенсивности барботирования в зоне, прилегающей к защитной трубе, эффективность его функционирования повышается с уменьшением объема воздуха, попадающего в жидкую ванну.

Результаты контроля резидентного времени (данные таблицы) свидетельствуют о том, что комплексное применение системы регулирования направлений потоков модельной жидкости, защитной трубы и эжекторного устройства, способствует увеличению в 1,2 – 1,5 раза длительности движения жидкой среды от места ее поступления в ванну модели ковша до места расположения выпускных каналов, т.е в

промышленном варианте использования разработки можно улучшить условия для удаления неметаллических включений.

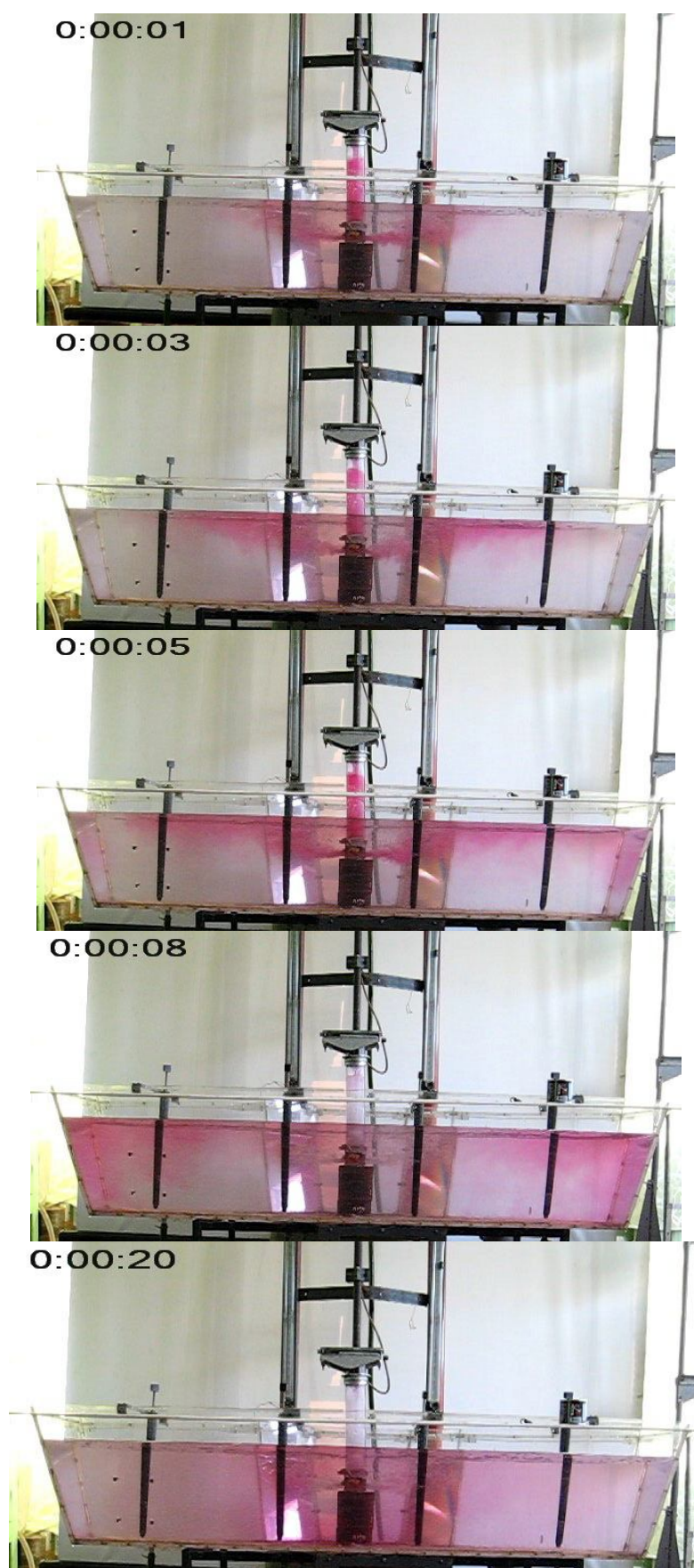
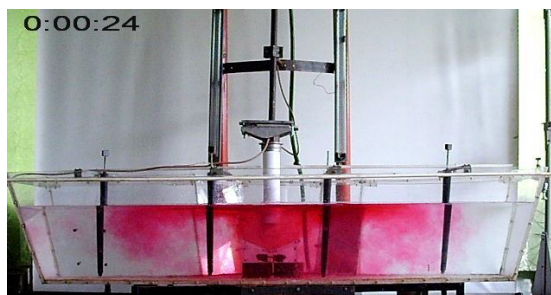
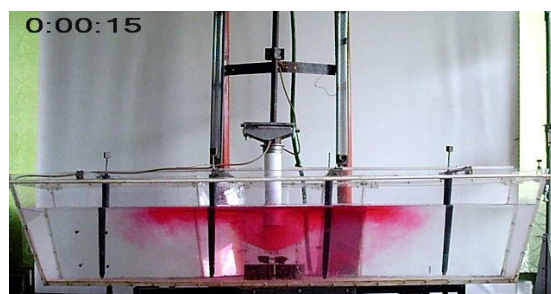
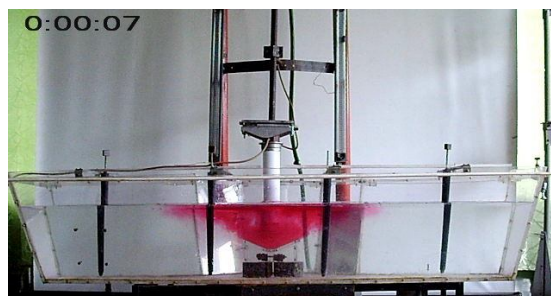
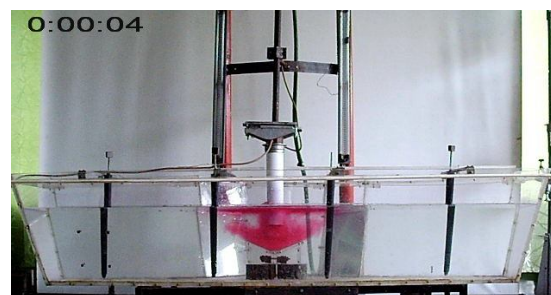
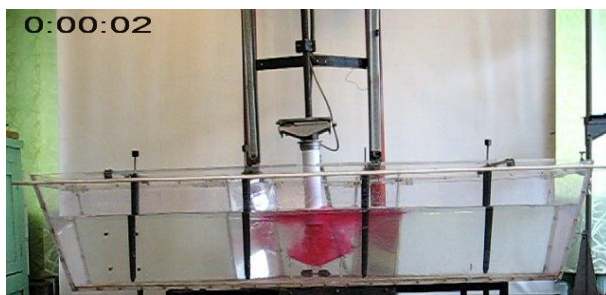
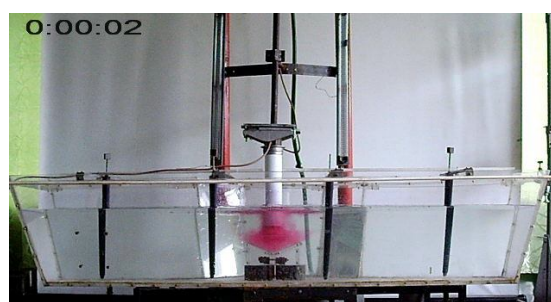
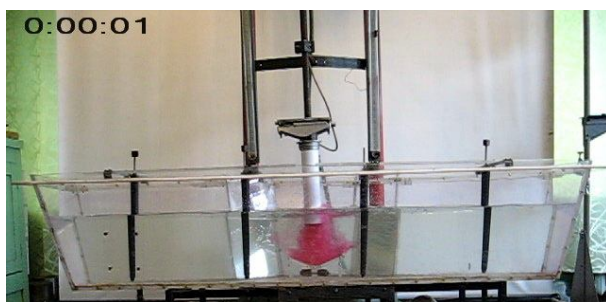


Рисунок 5 - Кинограмма картин распределения жидкостных потоков в ванне модели промежуточного ковша при использовании модифицированной защитной трубы



а

б

Рисунок 6 - Кинограммы картин распространения потоков жидкости в ванне модели промежуточного ковша при разливке через погружную трубу с использованием распределителя потоков при отсутствии (а) и при наличии (б) эжекторного устройства

Таблица

Длительность движения жидкости из приемной части модели промежуточного ковша к ее выпускным каналам при различных вариантах организации потоков, с

Вариант реализации процесса разливки	Угол наклона пластин регулирующего устройства, °	Номер ручья (выпускного канала)*			
		I	II	III	IV
Открытой струей при наличии регулирующего устройства	18	33	13	12	35
	23	50	14	14	40
	28	40	15	12	30
Через защитную трубу при наличии регулирующего устройства	18	43	12	12	46
	23	62	23	20	60
	28	53	20	18	50
Через защитную трубу при наличии регулирующего и эжекторного устройств	18	74	60	65	76
	23	75	65	68	80
	28	70	58	55	72
Через защитную трубу с двумя боковыми отверстиями	-	12	15	15	12

\* II и III - ближние ручьи;

I и IV - дальние ручьи.

## Выводы

Таким образом, физическое моделирование как метод научного исследования по-прежнему будет играть значительную роль при выполнении работ, связанных с поиском решений, направленных на повышение эффективности процесса непрерывной разливки стали в части улучшения гидродинамики потоков расплава в промежуточном ковше МНЛЗ и условий выполнения в нем технологических операций рафинирования металла в поточном режиме.

**Рекомендуемая литература:** [7, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 28, 30, 67, 68, 84, 61, 73, 74, 81, 94].

## Лабораторная работа № 10

### Изучение на физических моделях особенностей работы различных стопорных систем промежуточного ковша МНЛЗ

#### Постановка задачи

Поддержание постоянства уровня жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ, как известно, является одним из главных требований технологии получения качественной непрерывнолитой стальной заготовки. Поэтому стабилизация объемного расхода стали, поступающей из промежуточного ковша в кристаллизатор, стала особо актуальной технологической задачей, решаемой в условиях литья заготовок методом «плавка на плавку».

Резкое повышение числа плавов, разливаемых серийно, потребовало в свою очередь активизации работ, связанных с созданием разливочных устройств, позволяющих в совокупности с системой автоматического управления обеспечить устойчивое функционирование высоко-производительных машин непрерывного литья заготовок при максимально возможных скоростях вытягивания слитка из кристаллизатора.

Несмотря на многообразие технических решений, заложенных в разливочные устройства промежуточных ковшей, их можно разделить на две основные группы,

включающих стопорные и шибберные системы.

Оборудование промежуточных ковшей скользящими затворами различного конструктивного исполнения стало возможным благодаря освоению выпуска огнеупорных плит высокого качества. Достигнутые успехи при использовании разливочных устройств шибберного типа подтверждают целесообразность продолжения работ, направленных на расширение их применения в данной области. Однако в обозримом будущем при непрерывной разливке стали закрытой струей регулирование расхода металла, истекающего из промежуточного ковша в кристаллизатор, будут выполнять с помощью стопорных систем.

Стопорная система промежуточного ковша МНЛЗ включает огнеупорный стопор-моноблок, посредством резьбового соединения закрепленный на конце консоли, жестко связанной с подвижной стойкой, размещенной в 2-х направляющих втулках или роликовых опорах с возможностью вертикального возвратно-поступательного перемещения с помощью гидравлического (реже электромеханического) привода при работе в автоматическом режиме, а в случае необходимости перехода на ручное управление благодаря рычажному или реечному механизмам.

Следует отметить, что до настоящего времени специалисты не пришли к единому мнению относительно критериев выбора компоновочной схемы стопорной системы промковша МНЛЗ. Несмотря на преобладание использования гидравлического привода в качестве исполнительного механизма, имеющего ряд несомненных преимуществ, в последних разработках известных зарубежных фирм «Техноап» (Россия), SERT (Франция) предпочтение отдано электромеханическим устройствам, преобразующим вращательное движение вала электродвигателя постоянного тока в поступательное перемещение несущей стойки разливочного устройства. В качестве весомых аргументов, подтверждающих целесообразность применения подобных систем, приводятся факты устранения пожарной опасности и снижения в 10 – 20 раз расходов на обслуживание в сравнении с гидравлическим приводом.

При сопоставительной оценке достоинств и недостатков известных стопорных систем необходимо учитывать идентичность условий их применения, а также обеспечиваемые параметры взаимодействия звеньев, образующих кинематические пары, входящие в кинематическую структуру преобразующего механизма. Учитывая экстремальные условия эксплуатации сталеразливочного оборудования и связанные с ними трудности использования контрольно-измерительных средств оценки силового нагружения натурного образца стопорного устройства, требуемую информацию о значении и характере нарастания сил технологического сопротивления целесообразно устанавливать по результатам проведенных лабораторных исследований.

### **Цель исследования**

Целью лабораторного эксперимента является сопоставительный анализ устойчивости функционирования стопорных систем промежуточного ковша МНЛЗ, выполненный в идентичных условиях.

### **Материальное обеспечение**

Для проведения исследований изготовлены два физических аналога (фото на рис.1) стопорной системы промежуточного ковша МНЛЗ, которые в конструктивном отношении в масштабе 1 : 4 в точности соответствовали реальным образцам исследуемых разливочных устройств с различным типом привода.

Для контроля исследуемых параметров разливочных устройств применили измерительную систему (рис.2), включающую тензорезисторный преобразователь, четырехканальный усилитель переменного тока УТ4-1 ТУ 25.06.1377–82,

двухкоординатный акселерометр ADXL 210 фирмы ANALOG DEVICES и IBM-совместимый компьютер с установленной на его шине платой L-1250 многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L – CARD.

Тензорезисторный преобразователь для контроля силы, развиваемой приводом, размещали на промежуточном элементе, связывающем шток гидроцилиндра или ходовой гильзы с концом консоли, а акселерометр, позволяющий фиксировать линейные ускорения в пределах от  $-10g$  до  $+10g$  при частоте записи сигнала  $1 - 10$  кГц, крепили к подвижной стойке.

Требуемую частоту опроса акселерометра назначали исходя из условия:

$$f_n \leq 1/T \leq f_v,$$

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

### **Ход выполнения задания и полученные результаты**

В ходе проводившихся лабораторных экспериментов изучали характер изменения усилия, требуемого для перемещения в вертикальном направлении стопора-моноблока, а также оценивали соотношение статических и динамических нагрузок, действующих на привод в различных условиях функционирования разливочной системы.

При моделировании работы исследуемых стопорных механизмов управление приводами их физических аналогов осуществляли с помощью упрощенной следящей позиционной системы, которая замыкалась через датчик положения уровня воды, имитирующей жидкую сталь, в полости модели кристаллизатора.

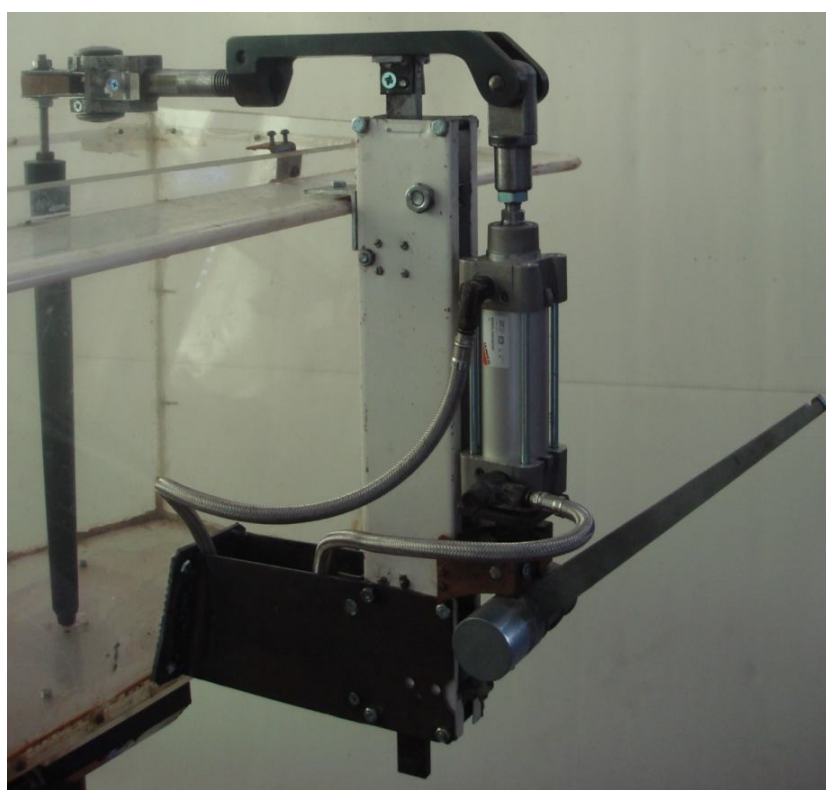
Датчик положения включал группу верхних и нижних неподвижных контактов, размещенных на колодке, жестко закрепленной на внутренней поверхности боковой стенки модели кристаллизатора, и группу подвижных контактов, установленных на поворотном рычаге, один конец которого посредством шарнира связан с колодкой, а второй конец снабжен поплавком. Неподвижные контакты с помощью проводов соединяли с электродвигателем или с катушками гидрораспределителя, подающего рабочую жидкость в полости цилиндра. К подвижным контактам датчика подводили питающее напряжение.

Принцип работы такой системы управления состоял в том, что при изменении уровня жидкости в модели кристаллизатора в большую или меньшую сторону от заданной отметки, поплавок воздействовал на рычаг, при повороте которого происходило замыкание подвижных контактов либо с верхними, либо с нижними неподвижными контактами. От порядка и длительности замыкания указанных контактов зависят направление и продолжительность вращения вала электродвигателя или перемещения штока гидроцилиндра, а, следовательно, и высота подъема стопора-моноблока относительно входного отверстия канала разливочного стакана и объемный расход жидкости, поступающей в модель кристаллизатора. Таким образом, система управления приводом физических аналогов стопорной системы имела дискретную обратную связь, обеспечивающую автоматическое функционирование моделей разливочных устройств.

Обработку цифрового представления сигналов, поступающих от тензорезисторного преобразователя и акселерометра, выполняли на ЭВМ в реальном масштабе времени при помощи прикладной программы Power Graph 2.0. В качестве примера на рис. 3 приведен характерный вид регистрировавшихся сигналов.



а



б

Рисунок 1 – Действующие физические модели исследуемых стопорных систем с электромеханическим (а) и гидравлическим (б) приводами

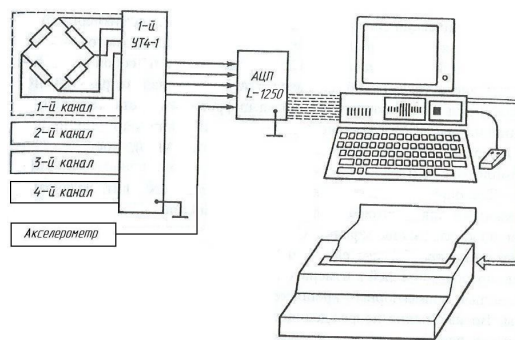
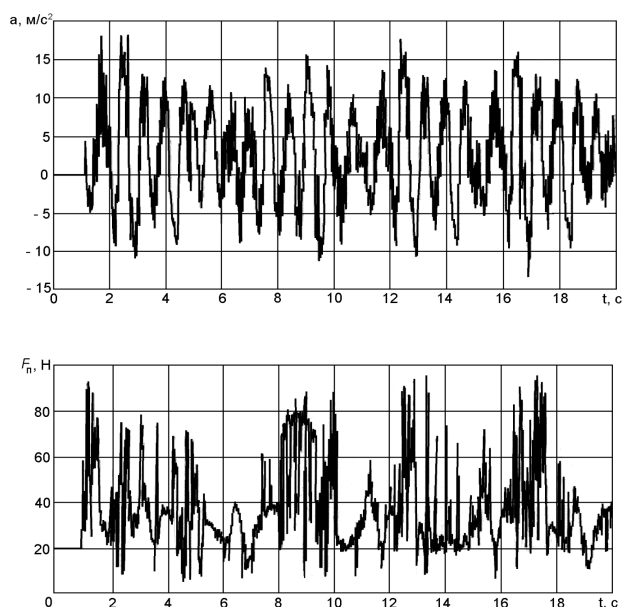


Рисунок 2 – Контрольно-измерительная схема, применяемая при контроле энергосиловых параметров физических моделей стопорных систем



б

Рисунок 3 – Вид сигналов при контроле ускорения (а) и силы, развиваемой приводом модели стопорной системы (б) в процессе ее функционирования

## Выводы

1. Работа физических аналогов стопорной системы характеризуется значительными динамическими нагрузками. При этом отношение максимального значения динамической нагрузки к статической достигало 2,5–3,2.
2. Наблюдавшиеся значительные пульсации контролируемых параметров стопорной системы (ускорений и сил) свидетельствуют о наличии в ней механических колебаний, вследствие действия переменных нагрузок и упругости звеньев механизма перемещения стопора-моноблока. Такие колебания отрицательно сказываются на качестве автоматического регулирования объемного расхода жидкой стали, поступающей из промежуточного ковша в кристаллизатор.

Рекомендуемая литература: [14, 19, 80, 86].

## Лабораторная работа № 11

### Моделирование ударного взаимодействия элементов устройства быстрой замены стаканов-дозаторов промежуточных ковшей сортовых МНЛЗ

#### Постановка задачи

Изменение геометрии канала стакана-дозатора промежуточного ковша отрицательно сказывается на условиях формирования струи металла, перетекающего в кристаллизатор, и приводит к дестабилизации скоростного режима процесса непрерывного литья сортовой заготовки, что в конечном итоге является причиной его прекращения, и, следовательно, уменьшения серийности разливки.

В условиях разливки стали на слябовых МНЛЗ изменение формы канала погружного стакана также представляет актуальную проблему, влекущую за собой снижение на 1,5 % выхода годного из-за необходимости удаления из полученной заготовки участка, формировавшегося во время прекращения поступления жидкой стали в кристаллизатор, связанного с заменой вышедшего из строя защитного огнеупорного изделия новым.

Успешное решение указанных проблем стало возможным благодаря оборудованию промежуточных ковшей специальными устройствами, работающими по принципу действия шиберных затворов и позволяющих осуществлять замену вышедшего из строя дозирующего или защитного стакана за 0,3 -0,5 с, т.е. практически без прерывания струи стали. Особенности динамических явлений, протекающих во время работы указанных устройств, обусловлены не только возникновением больших ударных ускорений, а и тем обстоятельством, что перемещаемые по направляющим керамический стакан находится в заземленном состоянии, поскольку прижат к базовой огнеупорной плите блоками витых или тарельчатых пружин, развивающих усилие, достаточное для обеспечения надежного контакта между рабочими поверхностями огнеупорных элементов. В силу указанных обстоятельств становится невозможным использование для расчетов динамических нагрузок в узлах дозирующего устройства как теоретических зависимостей, рассмотренных в классической механике для случаев абсолютно упругого, не вполне упругого и абсолютно неупругого ударов свободно движущихся тел с различной массой, так и результатов ранее проведенных экспериментальных исследований процессов ударного взаимодействия несвободных тел, протекающих при забивке свай и работе буровых машин.

Известные трудности получения достоверных теоретических данных о наиболее важных параметрах процесса удара, обусловленные необходимостью принятия ряда различных допущений и гипотез, которые часто искажают реальную картину взаимодействия соударяющихся тел, вызывают необходимость проведения экспериментальных работ, связанных с данной проблемой.

Экспериментальное изучение физических явлений, сопровождающих ударный процесс, требует не только разработки оригинальных методик лабораторных исследований, наличия современных контрольно-измерительных средств, а и строгого соблюдения ряда условий по организации опытов и подготовке аппаратуры к их проведению. Условия проведения лабораторных экспериментов и вводимые при этом ограничения должны в максимальной мере соответствовать физике исследуемого процесса и способствовать уяснению сути сопутствующих ему явлений.

## Цель исследования

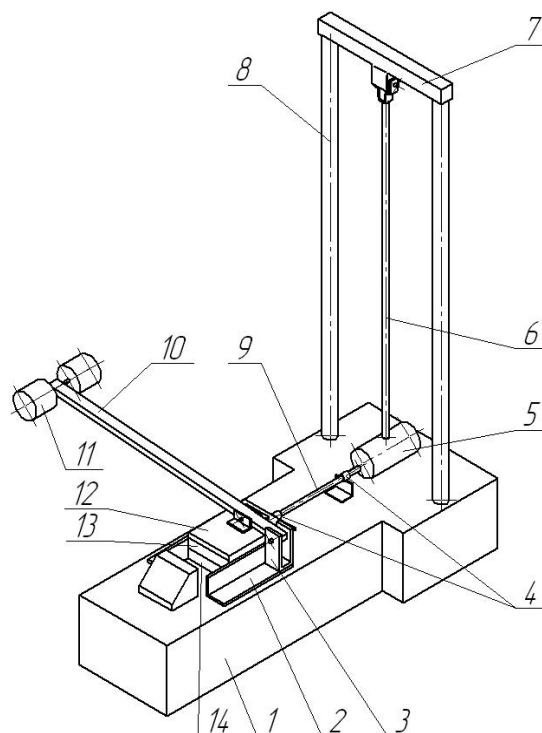
Целью исследования является получение информации о параметрах процесса ударного взаимодействия элементов системы, один из которых находится в защемленном состоянии.

## Материальное обеспечение

Экспериментальные исследования проводили на специальном стенде, устройство которого поясняет схема, приведенная на рис.1.



а



б

Рисунок 1 – Общий вид (а) и схема (б) лабораторного стенда для исследования процесса ударного взаимодействия тел

В его состав входит коробчатая рама 1 с направляющими 2, между которыми неподвижно закреплена опорная плита 15 и имеющий возможность относительного продольного перемещения брусок 14, прижимаемый пластиной 13. Силу прижатия бруска 14 пластиной 13 обеспечивали комплект грузов 12, закрепленных на большем плече рычага 11, посредством шарниров соединенного с пластиной 13 и кронштейном 3. Для создания силы принудительного перемещения бруска 14, защемленного между опорной плитой 15 и пластиной 13, служил молот 5, соединенный с нижним концом маятника 7, подвешенного на перемычке 8, которую крепили на двух вертикальных колоннах 9. Силовое взаимодействие между молотом 5 и бруском 14 осуществляли посредством промежуточного элемента 10, установленного в направляющих втулках 4.

Благодаря такому конструктивному исполнению стенда обеспечивали варьирование в широких пределах характеристики ударного импульса как за счет изменения скорости молота в момент удара по бруску, так и изменением отношения их масс.

Начальная скорость молота в момент контакта с промежуточным элементом составляла

$$v = \sqrt{2gl(1 - \cos\alpha)},$$

где  $g$  - ускорение силы тяжести;  
 $l$  - длина маятника;  
 $\alpha$  - угол отклонения маятника от вертикали.

При этом масса бруска была постоянной (6 кг), а массу молота дискретно изменяли за счет комплекта грузов, и она составляла 9,6, 14,4 и 19,2 кг.

Для контроля параметров исследуемого процесса ударного взаимодействия между рабочими элементами лабораторного стенда применили измерительную систему, включающую тензорезисторный преобразователь, четырехканальный усилитель постоянного тока УТ4-1 ТУ 25.06.1377-82, двухкоординатный акселерометр ADXL 210 фирмы ANALOG DEVICES и IBM- совместимый компьютер с установленной на его шине платой L-154 12-тиразрядного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD. Тензорезисторный преобразователь размещали на промежуточном звене, а акселерометр, позволяющий фиксировать линейные ускорения в пределах от  $-10g$  до  $+10g$  при частоте записи сигнала 1 – 10 кГц, крепили к бруску. Требуемую частоту опроса акселерометра назначали исходя из условия

$$f_n \leq 1/T \leq f_v,$$

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

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

### Ход выполнения задания и полученные результаты

В ходе проводившихся лабораторных экспериментов изучали характер изменений усилия, соотношения статических и динамических нагрузок, действующих в системе при соответствующих перемещениях зажатого бруска; сопоставляли значения указанных физических величин, которые регистрировали в условиях передачи энергии удара через промежуточные элементы, имеющие различную динамическую жесткость, рассчитанную по формуле

$$A = \rho c S,$$

где  $\rho$  – плотность материала промежуточного элемента;  
 $c$  – стержневая скорость распространения волны  
напряжения в теле элемента;  
 $S$  – площадь поперечного сечения элемента.

Скорость распространения деформации сжатия в промежуточном элементе считали равной скорости звука в материале, из которого он изготовлен, и определяли по формуле

$$c = \sqrt{E / \rho},$$

где  $E$  – модуль упругости материала элемента;  
 $\rho$  – плотность материала.

Анализ формы и амплитуды регистрируемых сигналов (рис. 2) показал, что кажущийся однократный удар молота, вызывавший перемещение зажатого бруска, проявляется в виде нескольких последовательных соударении, в процессе которых

происходит импульсная передача ему энергии. Очевидно, что кинетическая энергия при активной фазе единичного соударения затрачивается на упругую деформацию промежуточного элемента, который в последующей пассивной фазе восстанавливается и обуславливает относительное движение соударяющихся тел в противоположном направлении. Это приводит к одновременному снижению скорости ударяющего тела, резкому увеличению скорости ударяемого тела и уменьшению силы контактного взаимодействия, значение которой может уменьшиться до нуля в момент отрыва бруска от промежуточного элемента.

Переданная бруску при соударении кинетическая энергия расходуется на преодоление сил трения, возникающих на его контактных поверхностях скольжения, а также силы инерции. Как только эта энергия полностью расходуется, скорость бруска уменьшается и происходит его повторное соударение с догнавшим элементом. После нескольких соударений, когда кинетическая энергия ударной системы снижается на уровень, достаточный только для преодоления сил сопротивления, действующих на брусок, все тела движутся с одинаковой скоростью с замедлением до полной остановки.

Число соударений, их длительность и характер взаимодействия соударяющихся тел зависит от динамической жесткости промежуточного элемента. В качестве примера на

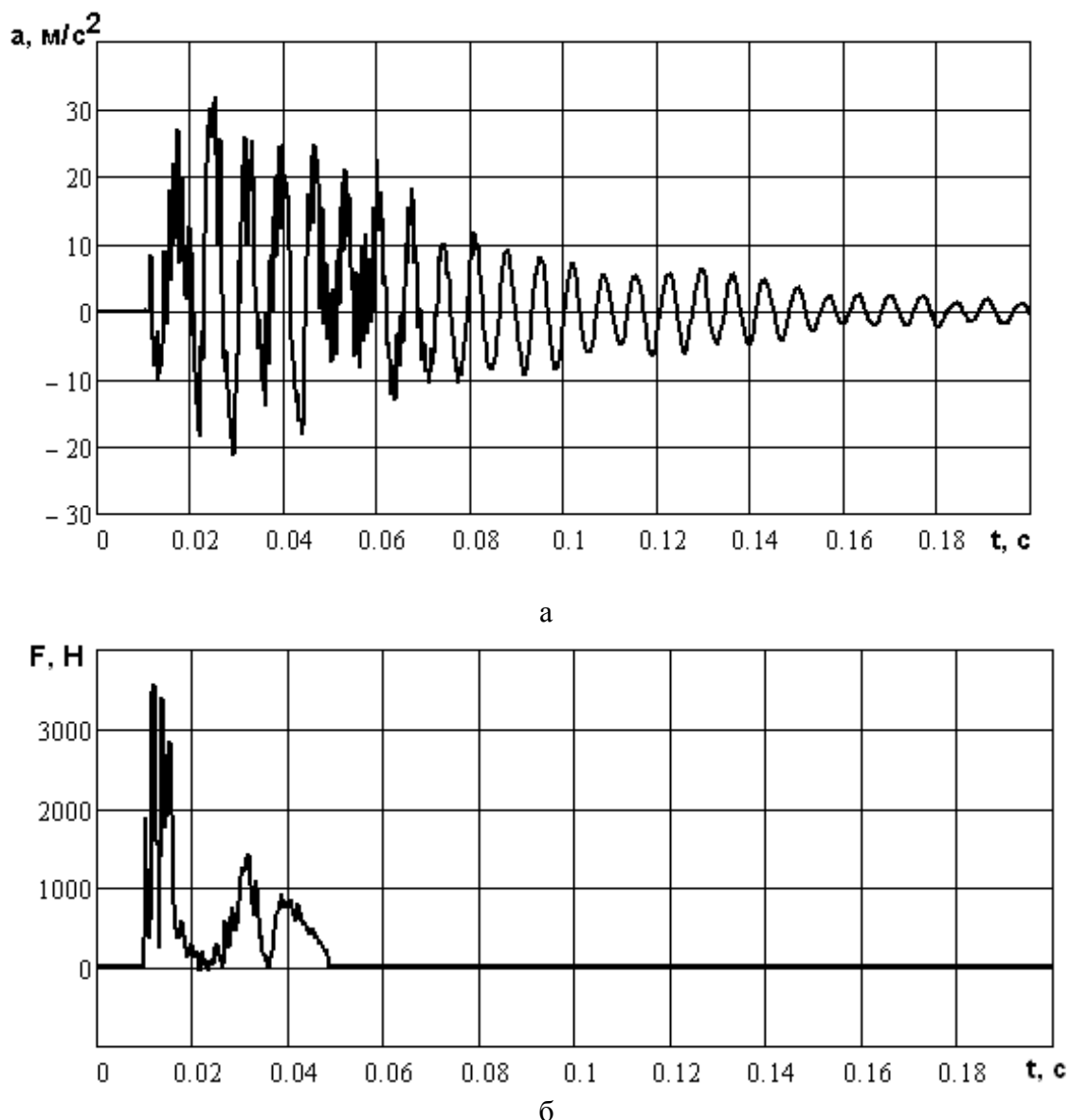
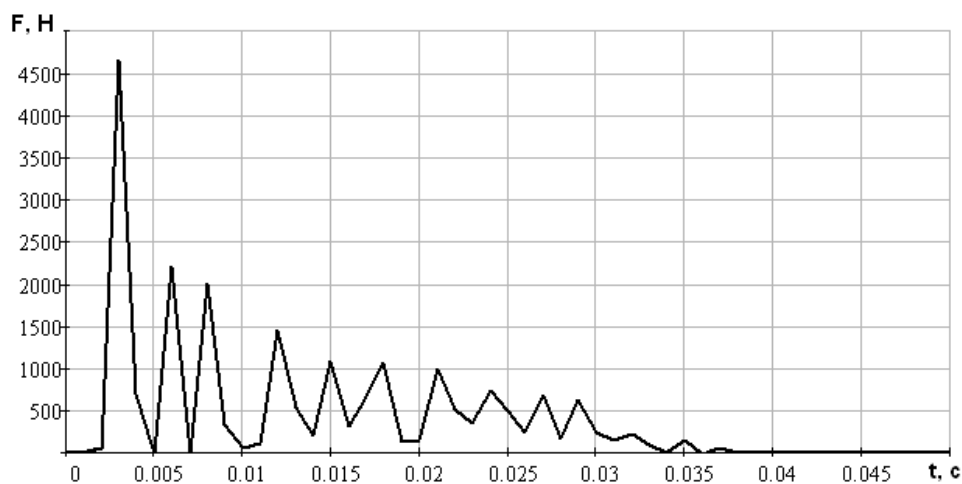


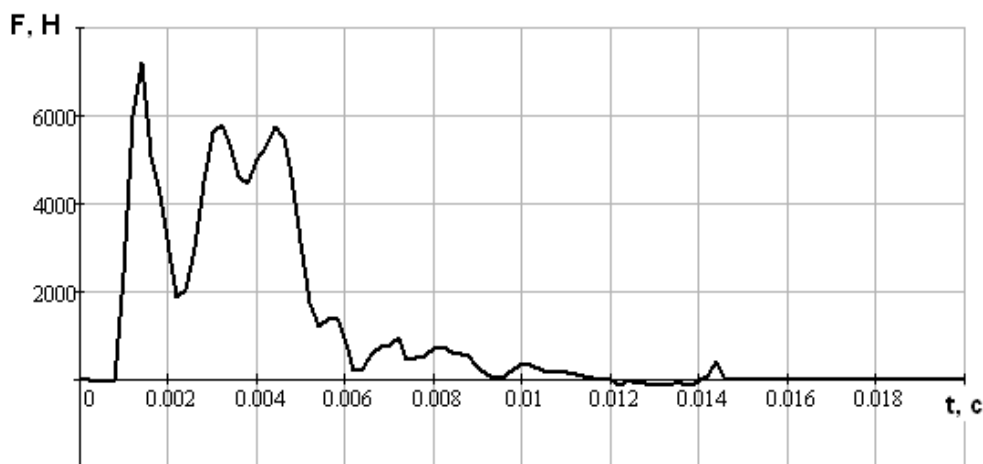
Рисунок 2 - Вид сигналов при контроле ускорения (а) и силы контактного взаимодействия (б) при передаче ударной нагрузки

рис.3 приведена форма зарегистрированных сигналов при передаче ударной нагрузки через элементы с различной динамической жесткостью. Увеличение динамической жесткости промежуточного элемента приводит к снижению числа соударений, росту ударной силы и уменьшению колебаний ее значений в начальной стадии процесса взаимодействия.

При обработке информации об изменении ускорения бруска, подвергнутому ударному воздействию, волновые колебания не учитывали, поскольку полная длительность удара превышала время пробега упругой волны вдоль данного тела в десятки раз.



а



б

Рисунок 3 - Характер изменения ударной силы при передаче энергии через элементы с динамической жесткостью 8720 кг/с (а) и 41250 кг/с (б)

Данные эксперимента, приведенные в таблице, и графики зависимостей, показанные на рис. 4, свидетельствуют о том, что независимо от силы прижатия бруска и соотношения масс соударяющихся тел, повышение энергии удара вызывает пропорциональное увеличение перемещения проталкиваемого элемента, развиваемого при этом ускорения и возникающих сил инерции.

Для оценки степени раздельного влияния на обеспечиваемое перемещение бруска массы и скорости молота построили графики, приведенные на рис. 5. Полученные

зависимости позволяют утверждать о преобладающем влиянии изменения массы ударяющего элемента на перемещение бруска. Этим, в первую очередь, можно объяснить увеличение доли полезно используемой энергии на преодоление сил сопротивления при повышении соотношения масс ударяющего и ударяемого тел (рис.5).

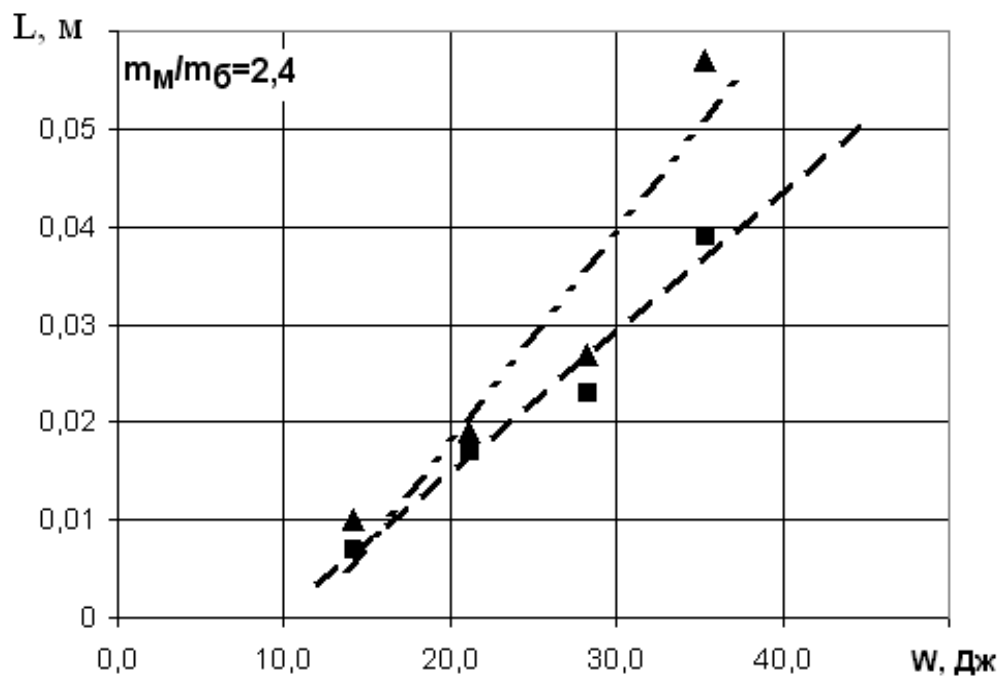
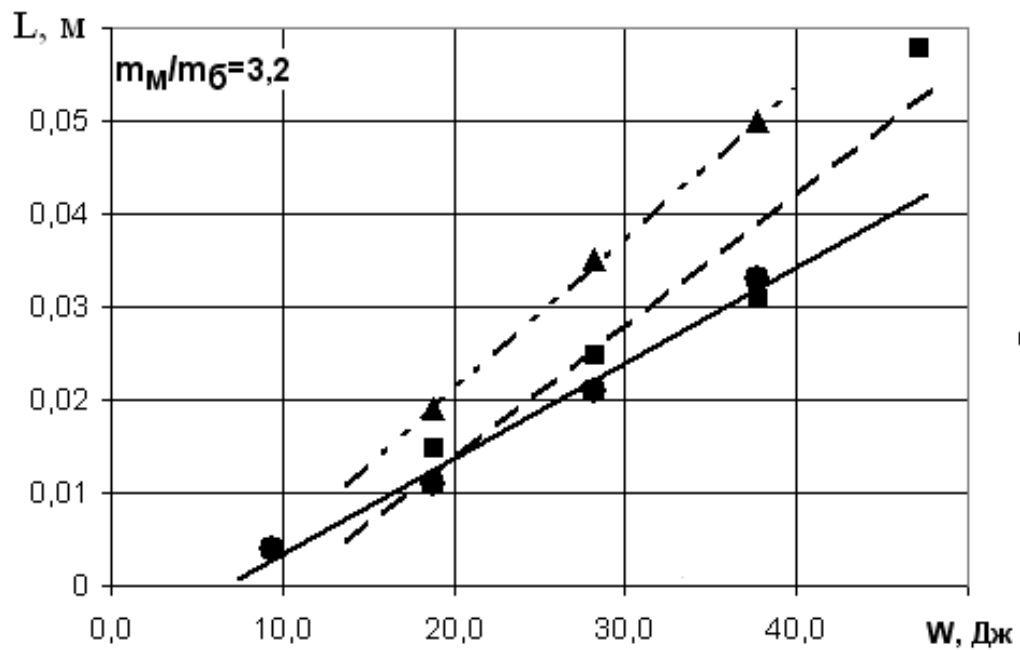
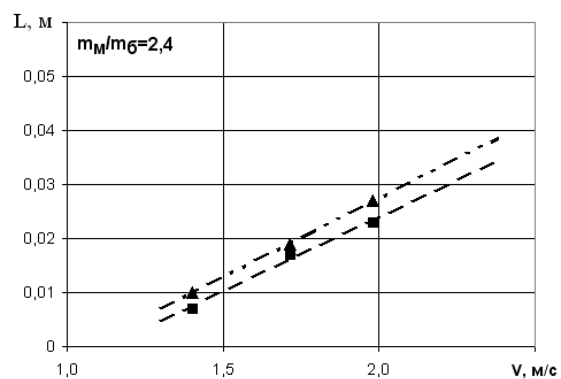
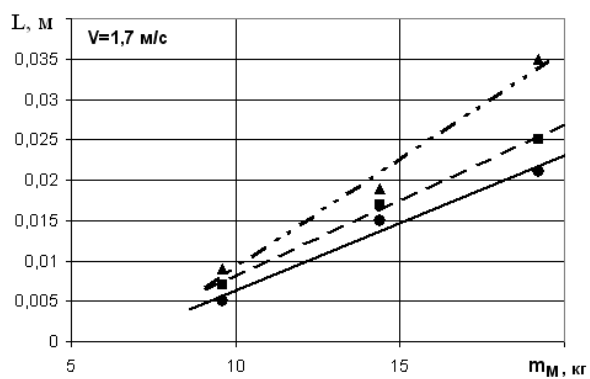
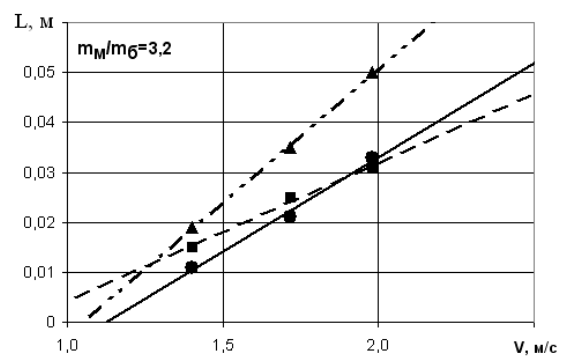
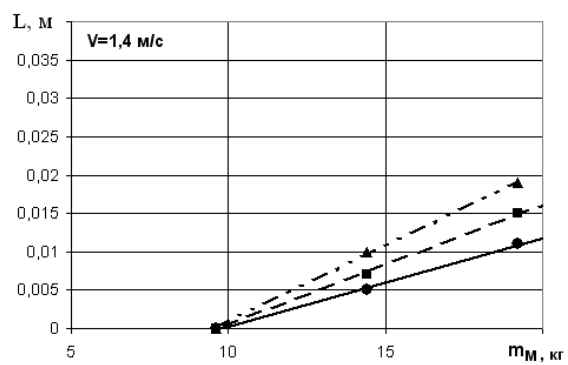


Рисунок 4 - Зависимость перемещения несвободного бруска от энергосиловых параметров

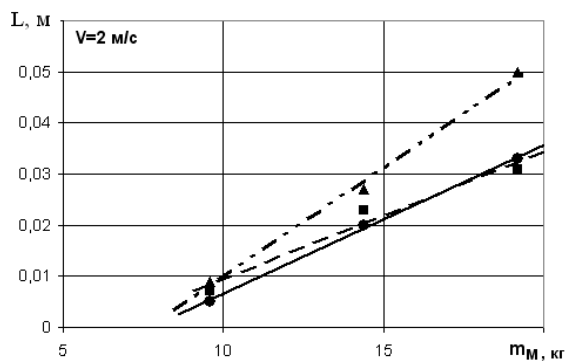
ударного процесса при силе прижатия бруска:

▲ - - - - 1377 Н      ■ - - - - 1746 Н      • ———— 2116 Н

$m_M, m_6$  – массы молота и бруска соответственно



б



а

Рисунок 5 - Зависимость перемещения несвободного тела от изменения массы (а) и скорости (б) молота при силе прижатия:

▲ - - - - 1377 Н      ■ - - - - 1746 Н      ● ———— 2116 Н

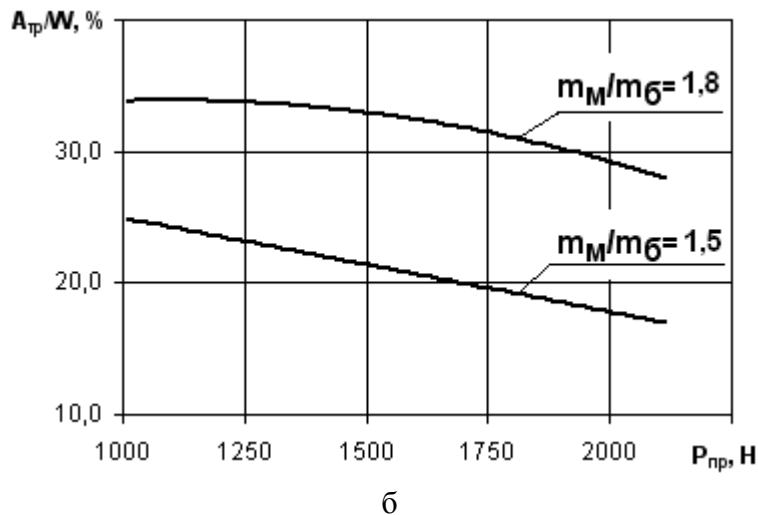
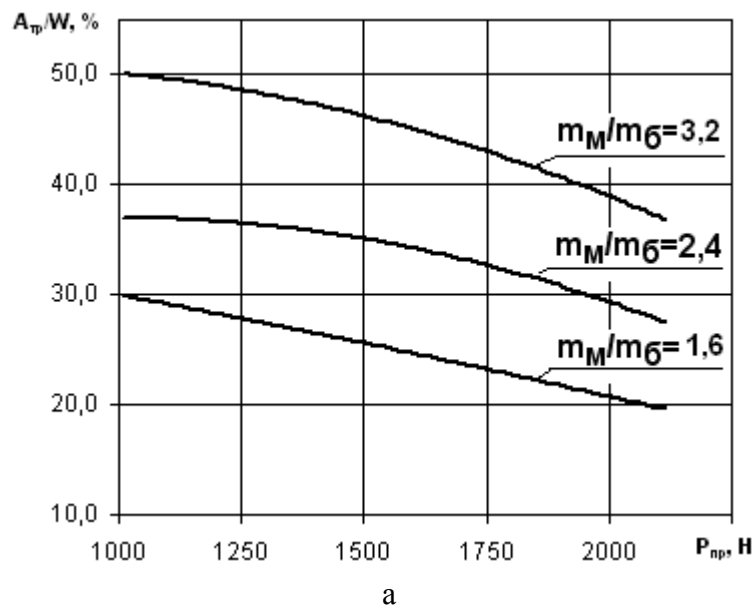


Рисунок 6 - Зависимость доли энергии удара, затраченной на преодоление сопротивления перемещению несвободного бруска от силы его прижатия при передаче ударной нагрузки через элемент с динамической жесткостью 8720 кг/с (а) и 41250 кг/с (б)

## Выводы

1. Силу инерции, вызванную значительными линейными ускорениями подвижного элемента (от 15 до 30 м/с<sup>2</sup>) и составляющую 35 – 42% от силы трения, необходимо в обязательном порядке учитывать при выполнении расчетов энергосиловых параметров системы соударяющихся тел, входящих в состав металлургических машин и механизмов.
2. Доля энергии, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления, меняется в пределах 30 – 50%, а остальная ее часть расходуется на деформацию взаимодействующих в ударном процессе тел (рис. 6).
3. Потери кинетической энергии возрастают при увеличении скорости удара, поэтому энергетически выгодно осуществлять повышение импульса силы контактного взаимодействия соударяющихся тел не за счет скоростных характеристик ударного механизма, а изменением массы бойка. В противном случае резко увеличивается опасность возникновения контактных напряжений, способных вызвать нарушение целостности ударяемого элемента, которым в разливочном устройстве является

огнеупор, заключенный в металлическую обечайку. Вместе с этим минимальное значение скорости движения бойка должно обеспечивать требуемую длительность перемещения огнеупорного элемента из одного крайнего положения в другое, поскольку от быстроты срабатывания разливочной системы в значительной мере зависит эффективность выполнения соответствующей технологической операции.

4. Отмеченные особенности функционирования рассмотренных систем потребуют решения оптимизационной задачи, связанной с определением значений конструктивных и технологических параметров, при которых с наименьшими энергетическими, материальными и временными затратами достигается максимальный экономический эффект.

**Рекомендуемая литература:** [26, 29, 35, 36, 43, 59, 71, 85, 87, 88].

## **Лабораторная работа № 12**

### **Исследование на физическом аналоге энергосиловых параметров устройства быстрой смены стакана-дозатора промежуточного ковша сортовой МНЛЗ**

#### **Постановка задачи**

На рынке металлургического оборудования в настоящее время потенциальным потребителям предлагают достаточно широкий выбор механических устройств быстрой смены погружных стаканов промежуточных ковшей МНЛЗ, однако при этом в технической литературе отсутствует какая-либо информация, связанная с расчетом и оптимизацией рабочих параметров систем быстрой замены стаканов-дозаторов, в связи с чем показатели эффективности их применения в условиях сталеплавильных цехов зарубежных и отечественных металлургических предприятий существенно разнятся.

Несмотря на то, что данные устройства в конструктивном исполнении идентичны двухплитному скользящему затвору, использование для расчета силовых характеристик их приводов зависимостей, полученных для затворов шиберного типа, не представляется возможным, так как скоростные режимы работы упомянутых разливочных систем практически несопоставимы. При одинаковом рабочем ходе подвижных частей у обеих систем, составляющем 120-130мм, продолжительности их перемещения из одного крайнего положения в другое отличаются на порядок, так как плита затвора совершает полный ход за 3 – 7 с, а стакан-дозатор – за 0,3 – 0,5 с.

Резкое нарастание скорости движения отработанного и резервного стаканов-дозаторов в начальной стадии процесса их смены, обеспечиваемой гидравлическим приводом, влечет за собой развитие динамических нагрузок, действующих на элементы конструкции разливочного устройства. Установление и учет характера изменения статических и инерционных сил, преодолеваемых приводом, позволит обосновать и оптимизировать значения его энергосиловых параметров, что в конечном счете будет способствовать повышению надежности и экономичности всей двигательной системы, а также развитию теоретических основ ее расчета.

Достичь поставленной цели можно лишь, основываясь на известных методах решения задач динамики привода гидромеханических систем, применяемых в металлургии, и дополнив их новыми положениями, разработанными с учетом специфики функционирования устройств дозированного перелива стали из промежуточных ковшей МНЛЗ.

Учитывая экстремальные условия эксплуатации сталеразливочного оборудования и связанные с ними трудности использования контрольно-измерительных средств для получения данных о силовом нагружении натурного образца во время выполнения операции по замене вышедшего из строя огнеупорного элемента, требуемую информацию

о значении и характере нарастания сил технологического сопротивления установили по результатам поставленных специальных экспериментальных исследований.

### **Цель исследования**

Целью исследования является качественная и количественная оценка энергосиловых параметров функционирования системы быстрой смены стаканов-дозаторов промежуточных ковшей сортовой МНЛЗ.

### **Материальное обеспечение**

Исследования проводятся на физическом аналоге (рис.1) системы быстрой смены стакана-дозатора промежуточного ковша сортовой МНЛЗ, который в конструктивном отношении и по масштабу в точности соответствовал реальному образцу и отличался лишь способом обеспечения силы прижатия сменного огнеупорного элемента. Контролируемую силу воздействия на опорную поверхность его металлической обоймы развивали с помощью набора грузов, навешиваемых на два рычага. За счет изменения массы грузов и длины рычагов достигали строгой фиксации в широком диапазоне значений силы прижатия стакана-дозатора, что позволяло повысить точность проводимых измерений.

Эксперименты выполняют на испытательном стенде, показанном на рис. 2. Он включает сварную раму, на которой жестко крепили аналог разливочного устройства, приводимого в действие гидравлической системой, включавшей силовой цилиндр, насос, предохранительный и обратный клапаны, а также гидроаккумулятор, обеспечивающий требуемое быстродействие системы.

Контроль силовых и скоростных параметров привода разливочного устройства при различных режимах его работы осуществили с использованием измерительного комплекса, в состав которого входили: тензорезисторный преобразователь, двухкоординатный акселерометр ADXL 210 фирмы ANALOG DEVICES, четырехканальный усилитель переменного тока УТ4-1 ТУ 25.06.1377-82 и IBM- совместимый компьютер с установленной на его шине платой L-1250 12-тиразрядного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD. При этом тензорезисторный преобразователь и акселерометр, позволяющий фиксировать линейные ускорения в пределах от  $-10g$  до  $+10g$ , размещали на полой штанге, передающей силовое воздействие штока гидроцилиндра сменному стакану-дозатору. Обработку цифрового представления сигналов, поступающих от тензорезисторного преобразователя и акселерометра, выполняли на ЭВМ в реальном масштабе времени при помощи прикладной программы Power Graph 2.0.

Учитывая то обстоятельство, что отечественные огнеупорные заводы еще не производят керамические изделия, используемые в системах дозированного перелива стали из промежуточных ковшей в кристаллизаторы МНЛЗ, для проведения лабораторных экспериментов потребовалось изготовление сменного комплекта стаканов-дозаторов, форма и размеры которых (фото на рис. 3) соответствовали конструктивному исполнению нового разливочного устройства. Опытные элементы представляли огнеупорный блок, включающий плиту с размерами 85 x 116 x 25 мм и стакан, заключенные в металлическую обойму и имеющие сквозной канал с требуемым проходным сечением (диаметр 17 мм). Поверхность скольжения плит изготовленных стаканов-дозаторов после их термической обработки подвергали шлифованию алмазным кругом.

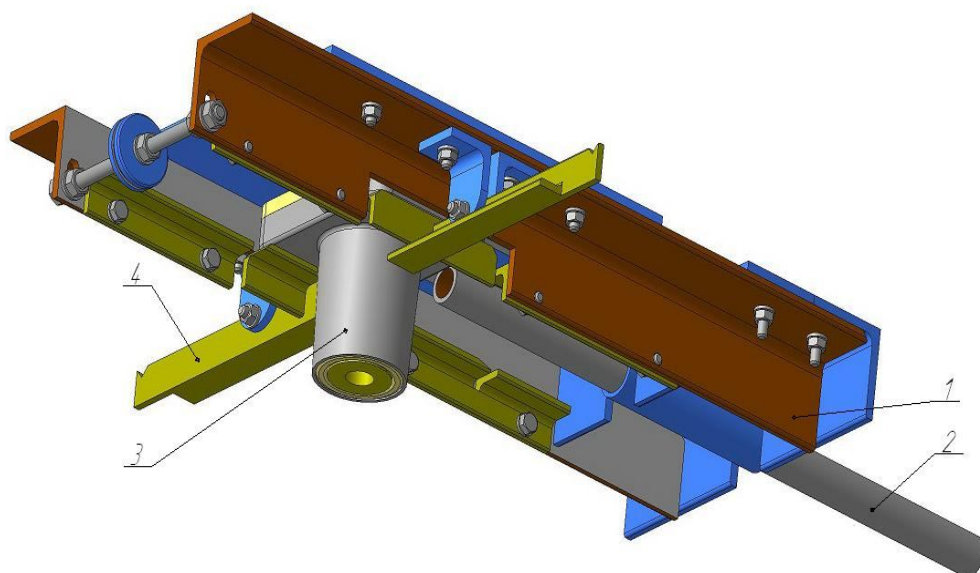


Рисунок 1 - Физический аналог устройства для быстрой замены стаканов-дозаторов промежуточного ковша сортовой МНЛЗ:

1 – корпус; 2 – передаточный стержень; 3 – стакан-дозатор; 4 – рычаг

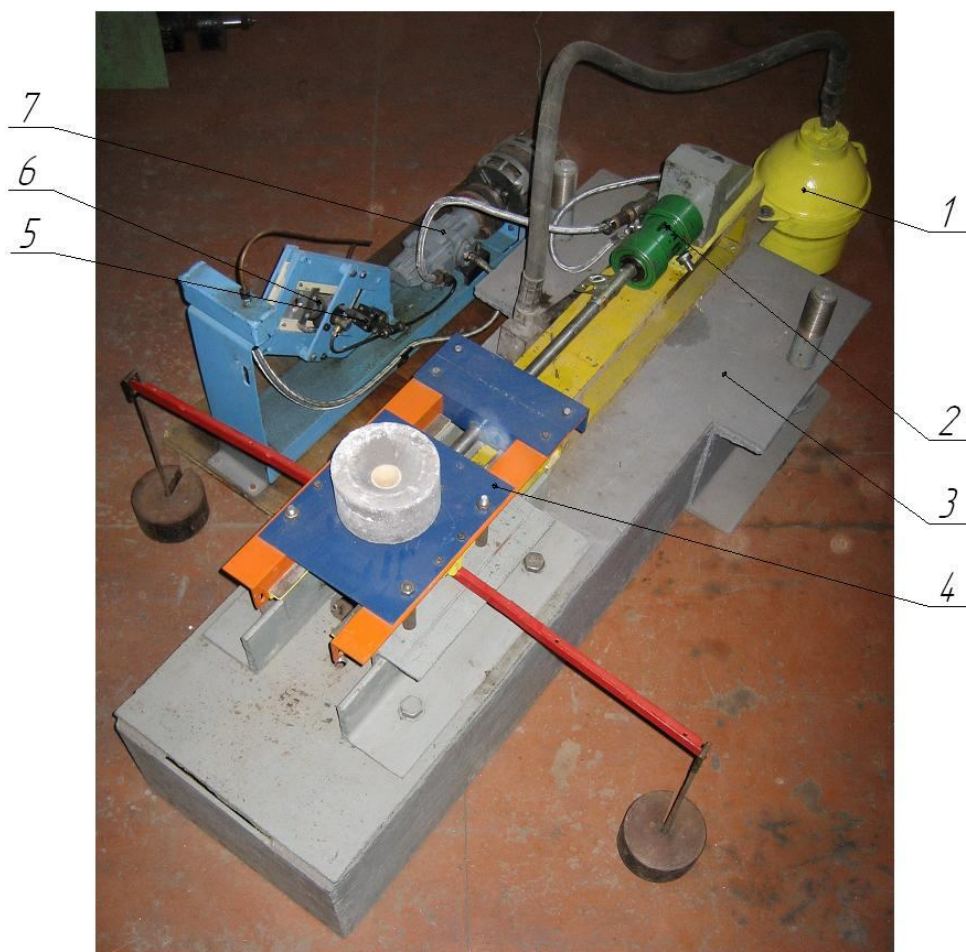


Рисунок 2 - Стенд для проведения экспериментальных исследований энергосиловых параметров системы быстрой замены стаканов-дозаторов



Рисунок 3 - Опытный сменный комплект огнеупорных стаканов-дозаторов

### Ход выполнения задания и полученные результаты

В ходе проводившихся лабораторных экспериментов изучали характер изменения усилия, требуемого для перемещения стакана-дозатора, а также оценивали соотношение статических и динамических нагрузок, действующих на привод в различных условиях контакта элементов разливочной системы. Статическое сопротивление проталкиванию резервного стакана-дозатора с исходной позиции в рабочую обусловлено силами трения, возникающими при относительном перемещении двух пар контактирующих поверхностей, прижатых одна к другой для предотвращения прохода между огнеупорами жидкой стали под воздействием ферростатического давления. При этом одна пара трения образована плоскими поверхностями огнеупорных изделий, а вторая – поверхностью металлической обоймы стакана дозатора и прижимающими ее элементами опорного узла разливочной системы. Естественно, статическая сила сопротивления, действующая на привод, зависит от состояния трущихся поверхностей и усилия их прижатия, а точность ее определения от принимаемых коэффициентов трения скольжения, реальные значения которых могут не совпадать по ряду причин со справочными данными.

Практика непрерывной разливки стали длинными сериями с использованием стаканов-дозаторов свидетельствует о том, что в 50 – 60 % случаев необходимость их замены обусловлена снижением обеспечиваемого расхода истекающего металла из-за образования корки на стенке выпускного канала. При этом в процессе замены огнеупорного элемента на привод устройства действует дополнительная нагрузка, связанная с разрушением в начале перемещения стакана-дозатора образовавшегося слоя отложений. Следует отметить, что появление такой нагрузки по времени совпадает с возникновением инерционной силы, обусловленной линейным ускорением стаканов-дозаторов в начале страгивания их с места. В связи с этим возникают значительные трудности отдельного определения на промышленном оборудовании составляющих сил, вызывающих совокупную технологическую нагрузку.

Определение динамических нагрузок на привод, вызываемых ударным воздействием на стакан-дозатор штока силового гидроцилиндра в момент трогания с места всех подвижных частей разливочной системы, предполагает наличие информации о развиваемых при этом линейных ускорениях, поскольку массы всех элементов, участвующих в ускоренном движении, заранее известны.

Поэтому одной из задач, решаемых при проведении лабораторных экспериментов, было качественное и количественное сопоставления значений суммарной силы, препятствующей перемещению заменяемого стакана-дозатора, для двух вариантов

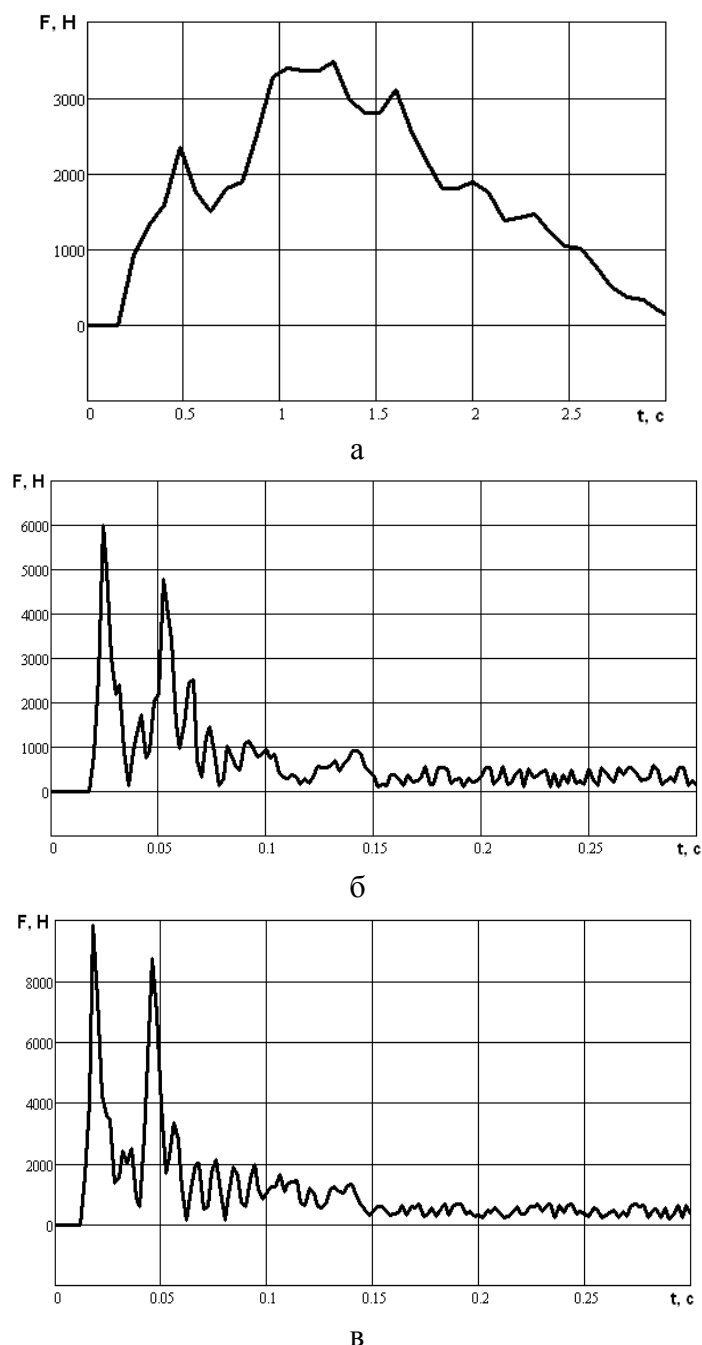


Рисунок 4 - Зафиксированная нагрузка на привод устройства при различных условиях процесса замены стакана-дозатора:

- а) средняя скорость перемещения стакана-дозатора 0,03 м/с;
- б) средняя скорость перемещения стакана-дозатора 0,3 м/с при отсутствии свинцовой втулки в канале;
- в) средняя скорость перемещения стакана-дозатора 0,3 м/с при наличии свинцовой втулки в канале

изучаемого процесса функционирования разливочного устройства, условия которых отличаются лишь наличием или отсутствием настыли в сталевыпускном канале. С этой целью провели серию опытов, в ходе которых выполнили измерения силы сопротивления перемещению стакана-дозатора для случаев размывания и затягивания его канала. Настыль в канале опытного огнеупорного изделия имитировали втулкой, формируемой методом литья. В качестве материала имитатора настыли использовали свинец, имеющий в твердом состоянии прочностные характеристики, значения которых близки к соответствующим параметрам корки стали при температуре начала ее

затвердевания на поверхности менее нагретой стенки канала, а также слоя, образующегося в случае его зарастания из оксидов алюминия.

Толщину стенки свинцовой втулки назначали исходя из того, что замену огнеупора в промышленных условиях осуществляют, когда пропускная способность его канала снижается на 15-20 % от значения, заданного технологической инструкцией. Для стаканов-дозаторов, используемых на сортовых МНЛЗ, это соответствует уменьшению диаметра поперечного сечения канала на 4 – 4,8 мм, т.е. образованию корки толщиной от 2 до 2,4 мм.

Измерения параметров исследуемого процесса замены стакана-дозатора выполняли в следующей последовательности. Предварительно осуществляли настройку системы прижатия сменного элемента физического аналога разливочного устройства, для чего на рычаги с одинаковыми плечами навешивали требуемое количество грузов с одинаковой суммарной массой. На приемные планки устройства устанавливали резервный стакан-дозатор. Непосредственно перед включением привода устройства запускали программу Power Graph 2.0. Убедившись в нормальном функционировании измерительной системы осуществляли пуск привода и выполняли запись сигналов, поступающих с тензорезисторного преобразователя и акселерометра в течение цикла замены стакана-дозатора. Снимаемые с датчиков электрические сигналы после усиления и преобразования в 12-разрядный числовой код обрабатывали на ЭВМ в реальном масштабе времени с использованием прикладной программы фирмы L-CARD, поставляемой в комплекте с АЦП. Графическое представление зафиксированных сигналов для визуального контроля и последующего анализа выводили на экран монитора и распечатывали на принтере. Для каждого фиксированного значения силы прижатия сменного огнеупорного элемента провели по три контрольных замера. Во время первого измерения подачу рабочей жидкости в полость силового гидроцилиндра осуществляли насосом с отключением гидроаккумулятора. При этом длительность процесса замены стакана-дозатора составляла от 2,8 до 3,2 с, а развиваемые линейные ускорения были незначительными ( $0,06 - 0,08 \text{ м/с}^2$ ), в связи с чем нагрузка на привод определялась лишь силами трения, действующими на контактных поверхностях трущихся пар.

Второй опыт проводили при включенном гидроаккумуляторе, что позволяло резко ускорить перемещение комплекта огнеупорных элементов и сократить длительность процесса замены стакана-дозатора до 0,28 – 0,33 с. В этом случае в момент контакта элементов системы наряду со статической действовала ударно-динамическая нагрузка.

В третьем опыте моделировали быструю замену стакана-дозатора, осуществляемую из-за зарастания его канала, т.е. при наличии в нем свинцовой втулки. Характерный вид регистрировавшихся сигналов показан на рис. 4, а результаты обработки полученных данных приведены в таблице 1. Причем силу, необходимую для разрушения металлической корки (свинцовой втулки), определяли как разность между пиковыми значениями общей нагрузки, зафиксированными в третьем и втором опытах, а ударно-динамическую силу - как результат, полученный вычитанием из совокупного значения нагрузки суммы значений статических сил, препятствующих перемещению стаканов-дозаторов в процессе их смены.

## **Выводы**

1. На основании информации, приведенной в таблице, можно утверждать о преобладающем влиянии силы прижатия стакана-дозатора на все виды нагрузок, преодолеваемых гидравлическим приводом разливочного устройства.

2. Результаты визуального контроля состояния контактных поверхностей стаканов-дозаторов и образующихся срезов свинцовых втулок свидетельствуют о том, что наличие металлической корки в канале огнеупорного элемента вызывает расклинивающие усилия, которые могут превысить обеспечиваемую силу его прижатия, в результате чего возможен проход жидкой стали в образующийся зазор.

**Таблица 1** Значение энергосиловых параметров имитируемого процесса замены стакана-дозатора

Условия моделирования процесса замены стакана-дозатора				Силы, преодолеваемые гидроприводом, Н			
Сила прижатия стакана-дозатора, Н	Длительность процесса замены стакана-дозатора, с	Толщина имитируемого слоя отложений внутри канала, мм	Ускорение стакана-дозатора при трогании с места, м/с <sup>2</sup>	Пиковое значение общей нагрузки, преодолеваемой приводом	Сила, необходимая для разрушения металлической корки на стенках канала	Суммарная сила трения	Ударнодинамическая нагрузка при трогании с места стаканов-дозаторов
1000	2,8	-	0,08	650	-	550	100
	0,29	-	4,8	1220	-	580	640
	0,3	2	2,5	5030	3710	650	670
2000	2,9	-	0,075	1210	-	1100	110
	0,28	-	4,7	2730	-	1080	1650
	0,29	2,1	2,4	6650	3820	1150	1680
3000	2,8	-	0,08	1680	-	1600	80
	0,29	-	4,65	4050	-	1630	2420
	0,3	2,1	2,3	7950	3900	1650	2400
4000	2,9	-	0,075	2180	-	2100	80
	0,28	-	4,7	4600	-	2200	2300
	0,29	2,1	2,3	8500	3900	2280	2320
5000	3	-	0,07	2700	-	2600	100
	0,3	-	4,6	5550	-	2700	2850
	0,31	2,2	2,2	9480	3930	2780	2740
6000	3	-	0,07	3090	-	2980	110
	0,31	-	4,5	6000	-	3350	2650
	0,32	2,1	2	9840	3840	3370	2630
7000	3,1	-	0,067	3510	-	3400	110
	0,3	-	4,3	7200	-	3520	3680
	0,31	2	1,8	11000	3800	3550	3650
8000	3,2	-	0,06	4370	-	4250	120
	0,31	-	4,2	8440	-	4320	4120
	0,32	2,2	1,6	12330	3890	4350	4090

3. Необоснованное увеличение силы прижатия огнеупорного элемента может привести к возникновению значительных контактных напряжений в теле стакана-дозатора,

вызванных совместным действием статических и ударных нагрузок. При силе прижатия, превышающей 4000 Н, пиковое значение силы, действующей на сменный стакан-дозатор со стороны штока приводного гидроцилиндра, достигает 9400 – 12330 Н. В этом случае в зоне контакта головки штока гидроцилиндра с корпусом металлической обоймы огнеупорного стакана-дозатора, как показывают расчеты, возникают напряжения в пределах 52 – 68 МПа, что превышает допустимое значение для огнеупорного материала, из которого изготовлен элемент. Поэтому силу прижатия при сборке системы быстрой замены стакана-дозатора следует назначать исходя из условия отсутствия зазора между контактными поверхностями огнеупорных элементов в момент срезания металлической корки, образовавшейся на стенке канала, и результатов последующей проверки на отсутствие предельно опасных напряжений в огнеупорном изделии при силовом воздействии на него штока гидроцилиндра.

**Рекомендуемая литература:** [17, 19, 32, 33, 34, 77, 82].

### **Лабораторная работа № 13**

#### **Модельные исследования работы устройства аварийного закрытия сталевыпускного канала промежуточного ковша**

##### **Постановка задачи**

Процесс получения качественной непрерывнолитой заготовки предполагает обеспечение высокой стабильности скоростных режимов подачи жидкой стали в кристаллизаторы МНЛЗ, эффективное экранирование струи металла от окружающей атмосферы и надежное функционирование разливочной системы в условиях реализации литья длинными сериями. Указанным требованиям в наибольшей мере отвечает классическая схема дозированного перелива стали из промежуточного ковша в кристаллизаторы с использованием стопора-моноблока в комплексе с погружным стаканом. Практика использования подобной разливочной системы промежуточного ковша подтвердила необходимость ее дальнейшего совершенствования с целью повышения рабочего ресурса и безопасности эксплуатации. Поэтому в настоящее время, наряду с исследованиями, направленными на увеличение термостойкости керамических частей системы, ведутся работы по ее комплектации вспомогательным устройством, которое позволяет в аварийной ситуации, возникшей из-за поломки стопора-моноблока, осуществить одновременное перекрытие ручья и отделение погружного стакана от разливочного узла промежуточного ковша при необходимости его беспрепятственного перевода из рабочей позиции в резервную. Конструктивная схема такого устройства приведена на рис. 1.

Оно состоит из монтажной плиты с центральным отверстием, закрепленной на наружной поверхности днища промежуточного ковша и имеющей направляющие, в которых установлен с возможностью относительного перемещения подвижный суппорт, несущий нож-отсекатель. Движение суппорта с большой скоростью обеспечивается съемным силовым гидроцилиндром благодаря подаче в его полость под избыточным давлением рабочей жидкости, поступающей от гидравлического аккумулятора.

Эффективность срабатывания устройства при аварийном перекрытии ручья МНЛЗ зависит от правильного выбора энергосиловых параметров его привода и обеспечиваемого режущим механизмом равномерного скола нижней части стакана-дозатора в момент отделения от него погружного стакана. Отсутствие опыта проектирования подобных устройств и перспективность их использования на современных машинах непрерывного литья заготовок предопределяет необходимость

проведения исследований, связанных с получением исходной информации, требуемой для расчета и конструирования разливочных систем нового поколения.

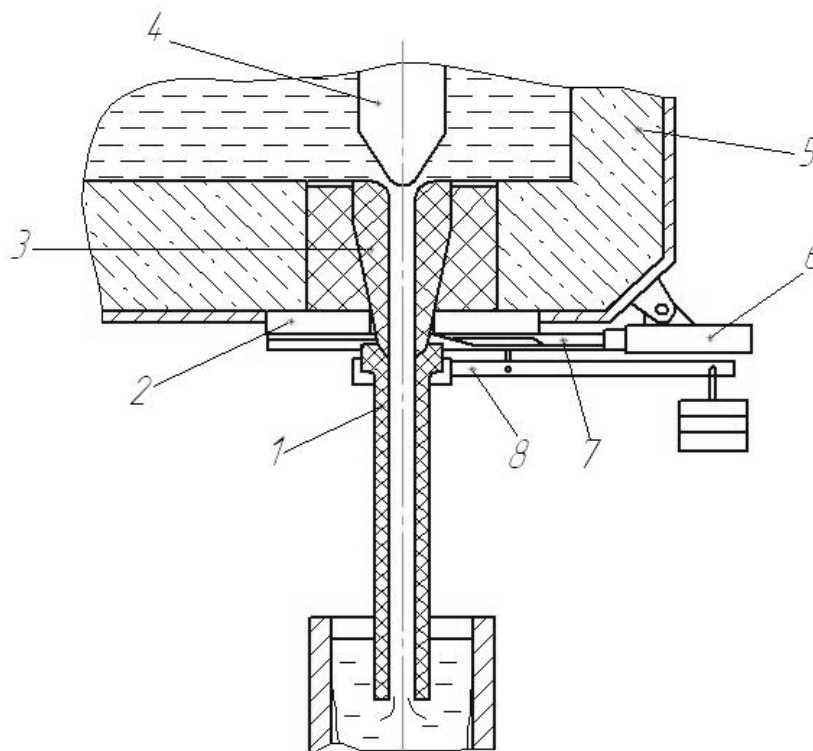


Рисунок 1- Конструктивная схема устройства аварийного закрытия выпускного канала промежуточного ковша МНЛЗ: 1 – погружной стакан; 2 – монтажная плита; 3 – стакан-дозатор; 4 – стопор-моноблок; 5 – промежуточный ковш; 6 – силовой гидроцилиндр; 7 – суппорт с ножом-отсекателем; 8 – грузовой механизм прижатия погружного стакана

В процессе аварийного перекрытия сталевыпускного канала промежуточного ковша на гидравлический привод устройства действуют статические и динамические нагрузки. Статические силы сопротивления, препятствующие перемещению подвижного суппорта, обусловлены с одной стороны трением, возникающим между поверхностями контакта ножа и срезаемого им огнеупора, а с другой стороны – дополнительной нагрузкой, связанной с разрушением слоя отложений оксидов алюминия или корочки застывшего металла на стенках канала. Динамические нагрузки в механической системе вызваны ускоренным перемещением ее подвижной части (суппорт с ножом) в момент пуска привода.

Естественно, что расчетные значения энергосиловых параметров исследуемой системы, полученные с использованием указанных зависимостей, требуют практического подтверждения. Для этого необходимо сопоставить теоретические и экспериментальные данные, соответственно вычисленные и зафиксированные на практике для одних и тех же исходных и граничных условий функционирования исследуемого устройства.

Сложность и опасность проведения натурных экспериментов в производственных условиях обуславливают целесообразность организации лабораторных испытаний, которые позволили бы осуществить проверку корректности результатов расчета, выполненного с использованием приведенных теоретических зависимостей.

## Цель исследования

Целью эксперимента является получение информации о параметрах процесса аварийного закрытия ручья в момент срезания погружного стакана, защищающего струю металла от контакта с окружающей атмосферой.

## Материальное обеспечение

Исследования проводят с применением физического аналога изучаемого устройства, входившего в состав лабораторного стенда, схема которого представлена на рис. 2. Он включает основание 5, на котором установлена пустотелая колонна 13 с размещенным внутри режущим механизмом, состоящим из втулки 3, фиксирующей огнеупорный элемент 4, по форме и размерам подобный стакану-дозатору промежуточного ковша; подвижного суппорта 10, установленного с возможностью вертикального перемещения в направляющей втулке 8 и несущего нож-отсекатель 1, прижимаемый к втулке 3 через ролик 2 рычагом 7 с подвеской грузов 6 на конце. Массивный молот 12 подвешивается над суппортом через блок 14 на фиксированной высоте  $h$  и сбрасывается по направляющей 11. Датчик 9 фиксирует момент срезания, сигнал  $U$  от которого поступает на АЦП, подключенный к ПЭВМ и ПУ. Рычаг 7 имеет длину  $l_1$  от точки опоры до точки приложения силы  $P_{\text{н}}$ , а грузы 6 имеют длину подвеса  $l_2$  и вес  $G$ .

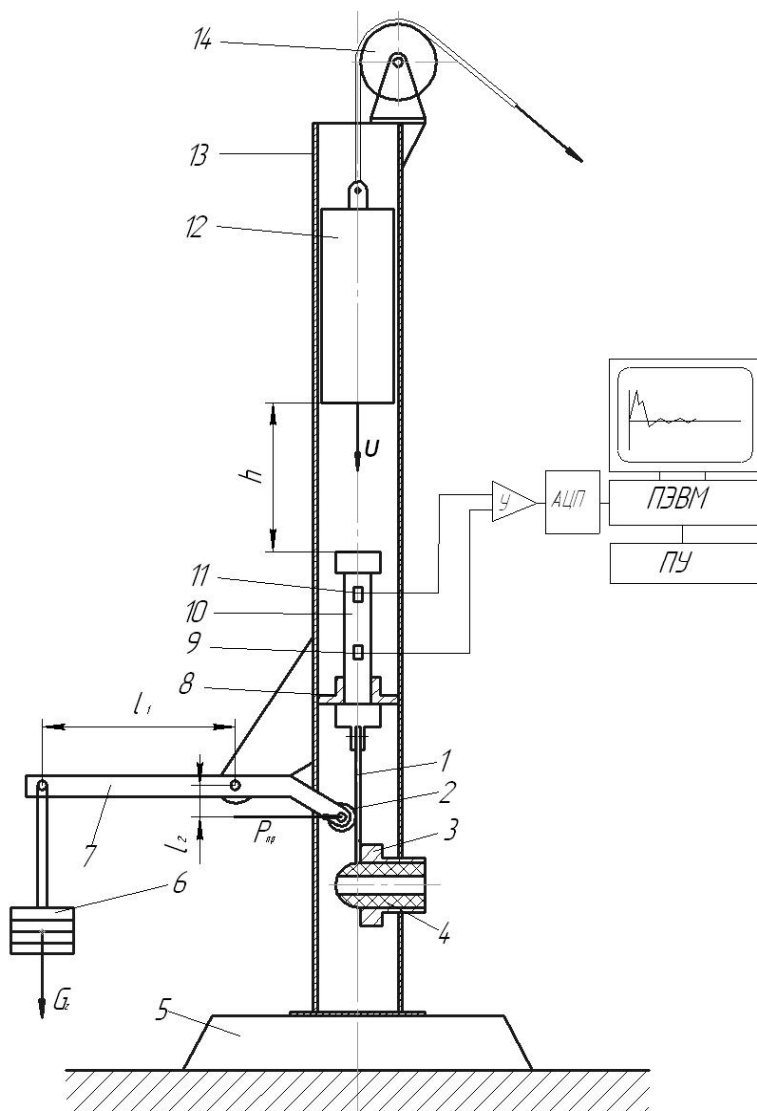


Рисунок 2 - Схема лабораторного стенда

Силу, необходимую для срезания ножом-отсекателем части огнеупорного элемента, выступающей из фиксирующей втулки, задавали массивным молотом 12, подвешиваемым над суппортом через блок 14 на фиксированной высоте и сбрасываемым

в нужный момент времени. Благодаря такому конструктивному исполнению стенда обеспечивали варьирование в широких пределах характеристики ударного импульса за счет изменения скорости падающего молота в момент его силового контакта с подвижным суппортом, значение которой определяли из выражения

$$v = \sqrt{2gh},$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;

$h$  – путь, проходимый молотом до момента его контакта с верхней торцевой поверхностью подвижного суппорта.

Для контроля параметров процесса ударного взаимодействия между рабочими элементами лабораторного стенда применили измерительную систему, включающую тензорезисторный преобразователь, четырехканальный усилитель постоянного тока УТ4-1 ТУ 25.06.1377-82, акселерометр ADXL 210 фирмы ANALOG DEVICES и IBM-совместимый компьютер с установленной на его шине платой L-154 12-тиразрядного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD. Тензорезисторный преобразователь 9, состоящий из четырех фольговых тензодатчиков, соединенных по мостовой схеме, и акселерометр 11, позволяющий фиксировать линейные ускорения в пределах от  $-10g$  до  $+10g$  при частоте записи сигнала 1 – 10 кГц, крепили на подвижном суппорте 10. Требуемую частоту опроса  $f$  акселерометра назначали исходя из условия

$$f_n \leq 1/T \leq f_b,$$

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

Усиленный электрический сигнал, поступающий с моста сопротивлений, после преобразования с помощью АЦП в цифровой код подавали в системный блок ЭВМ для обработки и последующей распечатки на принтере зарегистрированного результата. Обработку цифрового представления сигналов выполняли в реальном масштабе времени при помощи прикладной программы Power Graph 2.0.

### **Ход выполнения задания и полученные результаты**

Исследования проводили с использованием специально изготовленных модельных образцов стаканов-дозаторов. Материалом для них служила огнеупорная бетонная масса, которую предварительно увлажняли, добавляя 5% воды, тщательно перемешивали, а затем засыпали в подготовленную прозрачную пластиковую форму с соосно закрепленной металлической трубкой для формирования центрального сквозного канала. Заполненную огнеупорным материалом форму подвергали воздействию вибрации. Сформировавшееся огнеупорное изделие сутки выдерживали при комнатной температуре, после чего извлеченную из пластиковой оболочки модель стакана-дозатора (фото на рис. 3) просушивали в муфельной печи при температуре  $800^\circ\text{C}$  в течении 6 часов с последующим охлаждением с печью до температуры окружающей среды.

С целью оценки влияния конфигурации ножа на характер разрушения моделей огнеупорных стаканов-дозаторов и затрачиваемую при этом энергию, изготовили шесть типов ножей, отличающихся формой и углами заточки режущей части (рис. 4 а).

Для имитации металлической корки, образующейся во время разливки стали на стенках канала стакана-дозатора и в значительной мере определяющей в момент его аварийного закрытия нагрузку, действующую на привод устройства, в канал моделей огнеупорных стаканов устанавливали специальные втулки, предварительно

отливаемые из свинца. Выбор в качестве материала втулок свинца обусловлен тем, что он в холодном состоянии обладает схожими реологическими свойствами со сталью, имеющей температуру окончания кристаллизации.

В ходе эксперимента провели серию измерений, во время которых для каждого из 6 ножей контролировали ударную силу и ускорение, развиваемые системой нож - суппорт в момент отделения нижней части огнеупорного элемента и перерезания свинцовой втулки в его канале, а также изучали характер разрушения и состояние образовавшихся поверхностей скола у разделенных частей модели стакана-дозатора. С каждым ножом опыт повторяли три раза, поочередно устанавливая в канал разрушаемого огнеупорного элемента свинцовые втулки с толщиной стенки 1, 1,5 и 2 мм.

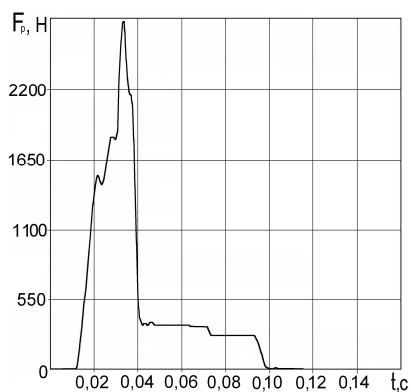
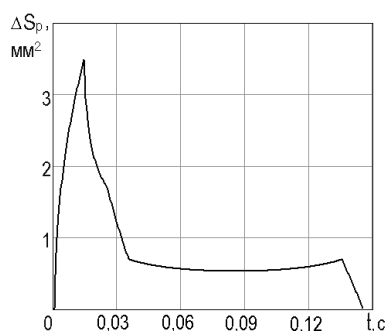
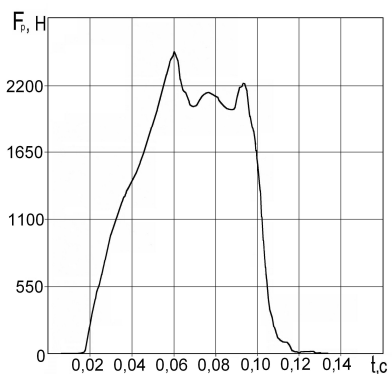
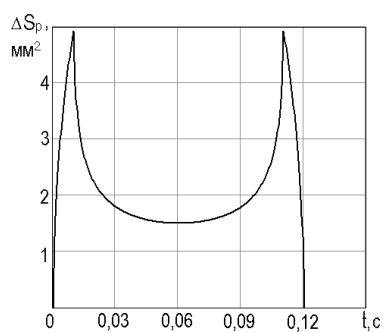
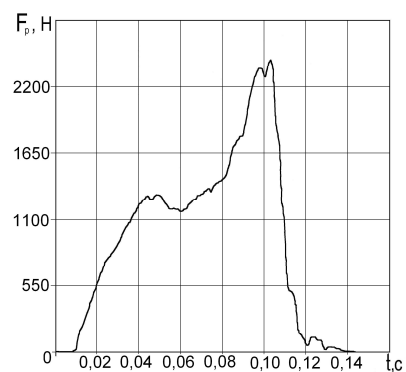
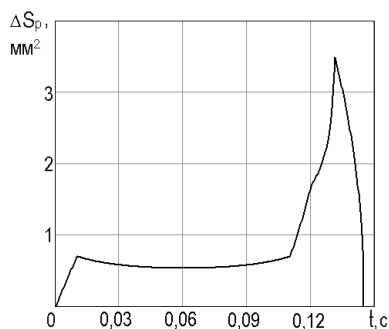


Рисунок 3 - Образцы моделей огнеупорного стакана-дозатора

Характерный вид зависимостей изменения во времени площади поперечного сечения металлической втулки, разрушаемой ножом, и регистрируемой при этом ударной силы показан соответственно на рис. 4 б и 4 в.

Форма и амплитуда зафиксированных сигналов свидетельствуют о том, что геометрия режущей части ножа главным образом влияет на изменение нагрузки, действующей в системе в процессе отсечения нижней части огнеупорного стакана-дозатора и разрушения металлической втулки в его канале. Указанная нагрузка напрямую зависит от площади поперечного сечения огнеупорного элемента, срезаемой в единицу времени ножом по мере его продвижения. Этим можно объяснить различие в числе пиковых значений регистрируемой силы и последовательности их появления в течение всего цикла реза для опробованных типов ножей. Так, в случае использования шевронного ножа максимальная нагрузка в системе возникает в начальный момент его взаимодействия с разрушаемым огнеупорным элементом. При клиновидном ноже максимум нагрузки зафиксирован в заключительной стадии процесса разрушения стакана-дозатора. Для прямого ножа характерно более равномерное распределение нагрузки в течение всего цикла реза. Следует отметить, что наблюдавшиеся максимальные значения силы сопротивления (технологической нагрузки) для испытанных ножей при одинаковых условиях их применения отличались в пределах

10 – 15 %, а ускорение подвижной части системы, зафиксированное во время опытов, составило 25 – 32 м/с<sup>2</sup>.



а

б

в

Рисунок 4 - Конструкции опытных ножей (а) и характер изменения параметров процесса отделения нижней части стакана-дозатора при их использовании: площади срезаемого поперечного сечения металлической втулки (б) и ударной силы резания (в)

От угла заточки режущей ножа существенно зависит состояние поверхности скола верхней части стакана-дозатора (фото на рис.5). Более ровная поверхность образующей торцевой части огнеупора и меньший зазор между нею и верхней плоскостью ножа, перекрывающей канал, наблюдались в тех случаях, когда угол заточки режущей части составлял  $45^\circ$ . Если указанный угол был прямым, то на корпусе огнеупора появлялись продольные трещины, а зазор между его нижним торцом и верхней гранью ножа достигал 2-3 мм, что может привести к снижению надежности системы принудительного перекрытия выпускного канала промежуточного ковша, поэтому использовать такой режущий инструмент на практике не следует.



а

б

в

Рисунок 5 - Характерный вид поверхностей скола срезаемых частей моделей стаканов-дозаторов и находящихся в их каналах металлических втулок при использовании клинового (а), прямого (б) и шевронного (в) ножей

## Выводы

1. При одинаковых условиях их применения ножей с различной формой и углом заточки режущих кромок усилия резания отличаются в пределах 10 – 15 %, а ускорение подвижной части системы составляет 25 – 32 м/с<sup>2</sup>.
2. Для промышленного применения в устройстве аварийного закрытия ручья МНЛЗ рекомендуется использовать шевронный нож с углом наклона режущей кромки  $45^\circ$ .

Рекомендуемая литература: [19, 80].

## Лабораторная работа № 14

### Моделирование функционирования комплексной разливочной системы промежуточного ковша

#### Постановка задачи

С учетом достоинств и недостатков, выявленных при эксплуатации зарубежных образцов оборудования, предназначенного для выполнения механизированной замены погружных стаканов в условиях серийной разливки стали на слябовых МНЛЗ, предложена новая конструктивная схема системы быстрой смены защитных огнеупорных элементов,

включающая стационарно размещенный на рабочей площадке манипулятор и закрепленное на наружной поверхности днища промежуточного ковша разливочное устройство, снабженное погружным огнеупорным стаканом. Манипулятор позволяет в заданной последовательности без применения дорогостоящих средств автоматики обеспечить подачу сменного погружного стакана по расчетной траектории на приемные салазки разливочного устройства промежуточного ковша и силового гидроцилиндра, осуществляющего по команде перемещение стакана из исходной позиции в рабочую. Новые технические решения, заложенные в конструкцию разливочной системы, требуют предварительной проверки перед началом проектирования ее опытно-промышленного образца.

### Цель исследования

Целью исследования является проверка функционирования новой разливочной системы с использованием ее физического аналога, а также получение информации, необходимой для разработки теории расчета энергосиловых параметров манипулятора и устройства быстрой смены погружного стакана.

### Материальное обеспечение

Исследование функционирования предложенной разливочной системы проводили с использованием физических моделей ее структурных элементов: манипулятора и устройства быстрой смены погружного стакана.

Модель манипулятора (рис. 1) состоит из основания 16, на котором смонтирована поворотная колонна 15, установленная в нижней 17 и верхней 14 неподвижных подшипниковых опорах и снабженная пустотелой консолью 2, жестко связанной с платформой 9. На этой платформе размещен силовой гидроцилиндр 7 и на цапфах 4 и 6 закреплена скоба 8, несущая сменный погружной стакан 5.

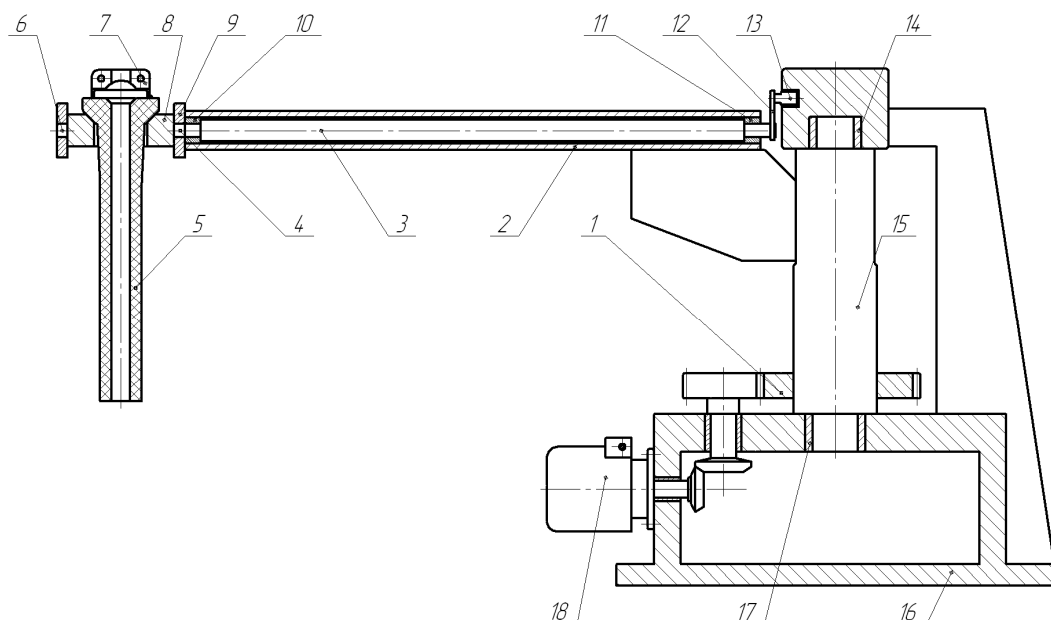


Рисунок 1 – Схема разработанной системы быстрой смены погружного стакана

Скоба 8 имеет возможность поворота в вертикальной плоскости относительно пустотелой консоли с помощью механизма, включающего трансмиссионный вал 3, установленный внутри консоли в подшипниковых опорах 10 и 11 и удерживающий на конце, обращенном к поворотной колонне 15, рычаг 12, снабженный роликом 13, размещенным в профилированном направляющем пазу, выполненном на наружной цилиндрической

поверхности корпуса верхней неподвижной подшипниковой опоры 14 поворотной колонны. Другой конец вала 3 жестко связан с цапфой 4 несущей скобы. Нижняя часть поворотной колонны 15 снабжена зубчатым венцом 1, посредством зубчатых передач связанным с электромеханическим приводом 18, закрепленным на основании 16.

Физический аналог разливочного устройства, выполненный в масштабе 1:2,5, снабжен сменным комплектом погружных стаканов, форма и размеры которых соответствовали конструктивному исполнению нового разливочного устройства. Опытные элементы представляли огнеупорный блок, включающий плиту с размерами 85×116×25 мм и стаканы, заключенные в металлическую обойму и имеющие сквозной канал с требуемым проходным сечением (рис. 2). Поверхность скольжения плит изготовленных погружных стаканов после их термической обработки подвергалась шлифованию алмазным кругом.



Рисунок 2 – Комплект огнеупорных элементов разработанного разливочного устройства

Конструктивное исполнение примененных в физическом аналоге разливочного устройства прижимных элементов, снабженных роликами, показано на рисунке 3, а общий вид одной из секций разливочного устройства с прижимными элементами – на рисунке 4.



Рисунок 3 – Поворотные прижимные элементы, снабженные роликами

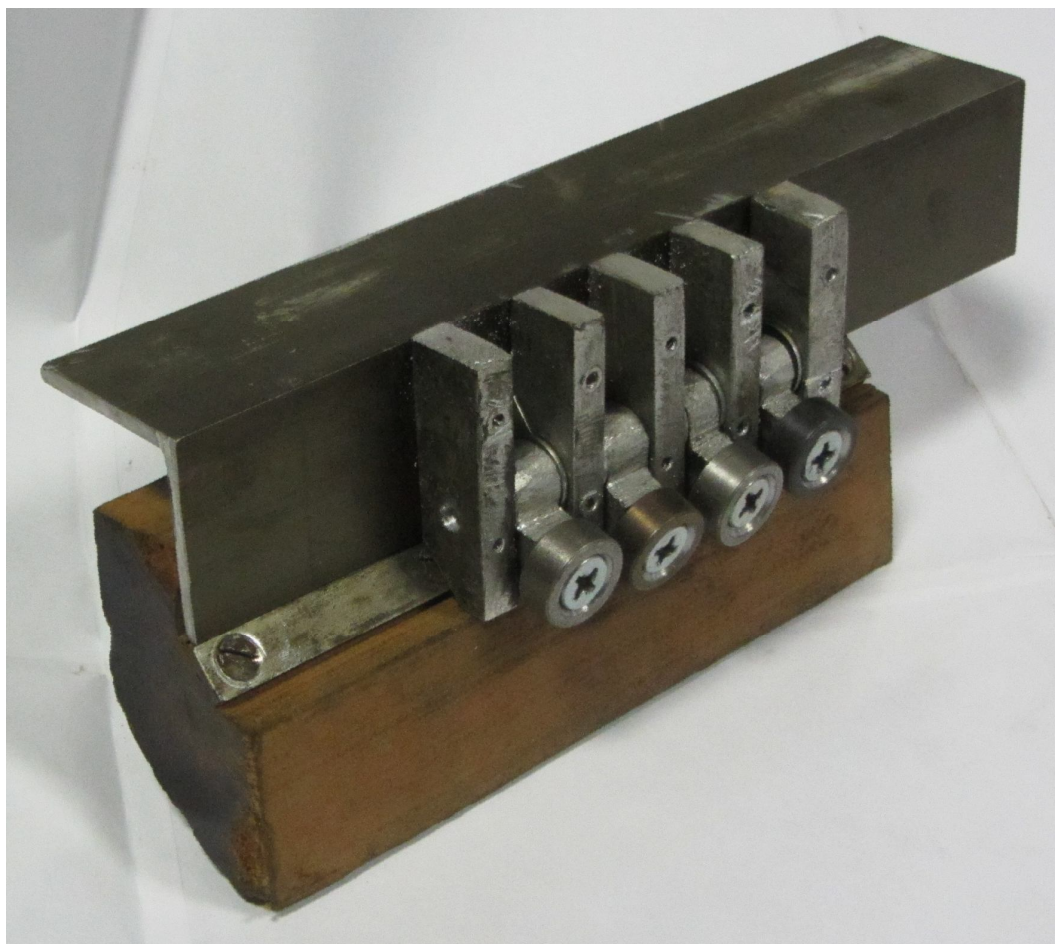


Рисунок 4 – Секция корпуса разливочного устройства с установленными в ней поворотными прижимными элементами, снабженными роликами

Принцип работы предлагаемой системы быстрой замены погружных стаканов поясняет рис. 5.

Во время серийной разливки стали манипулятор расположен в исходной позиции на рабочей площадке 19 перед промежуточным ковшом 20, оборудованным разливочным устройством 21, снабженным защитным стаканом 22, нижняя часть которого погружена в расплав, находящийся в кристаллизаторе 23. В этой позиции поворотная колонна 15, консоль 2 и несущая скоба 8 с установленным в ней сменным погружным стаканом 5 занимают относительное положение, показанное на рисунке 2а. При этом разогретый до нужной температуры сменный стакан 5 расположен горизонтально и удерживается зажимами несущей скобы 8, развернутой в вырезе платформы 9. Фиксация скобы со стаканом относительно платформы обеспечена трансмиссионным валом, рычаг 12 которого своим роликом 13, находящимся в профилированном направляющем пазу, удерживает указанные элементы механизма в заданном положении. Для замены погружного стакана запускают привод 18, который через зубчатые передачи и венец 1 осуществляет поворот колонны 15 в нижней и верхней 14 неподвижных подшипниковых опорах. Вместе с колонной поворачивается пустотелая консоль 2 и установленный внутри нее в подшипниковых опорах 10 и 11 трансмиссионный вал 3 с прикрепленным рычагом 12. Ролик 13, перекатываясь в направляющем пазу, выполненном на наружной цилиндрической поверхности верхней неподвижной опоры 14, воздействует на конец рычага 12, поворачивающего трансмиссионный вал в опорах 10 и 11 относительно консоли 2. Вращение вала 3 через цапфу 4 и передается скобе 8, которая осуществляет поворот относительно платформы 9 сменного погружного стакана 5 до полного его перевода в вертикальное положение. Этот перевод завершится при подходе стакана к

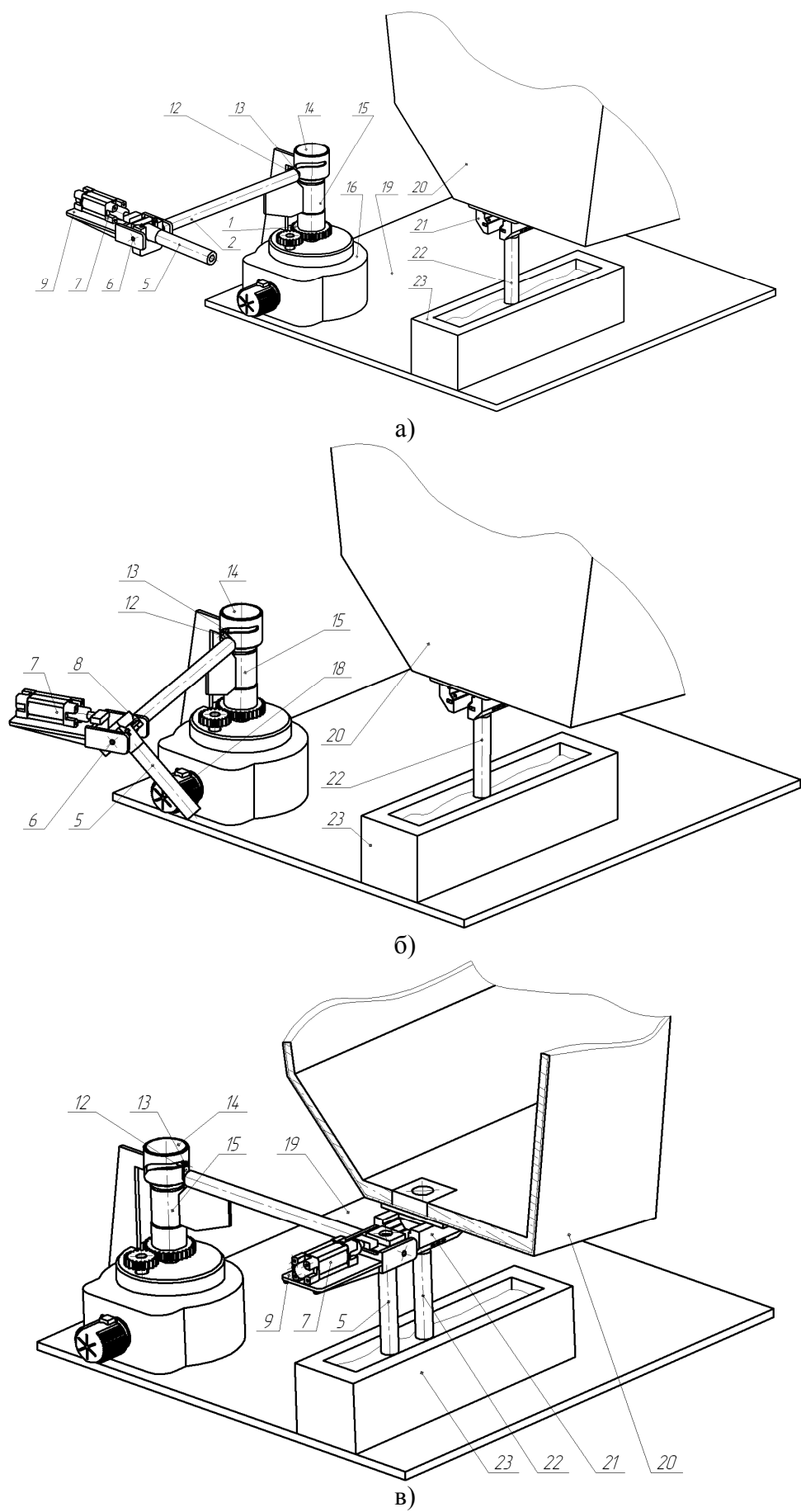


Рисунок 5 – Последовательность выполнения операции быстрой смены погружных стаканов

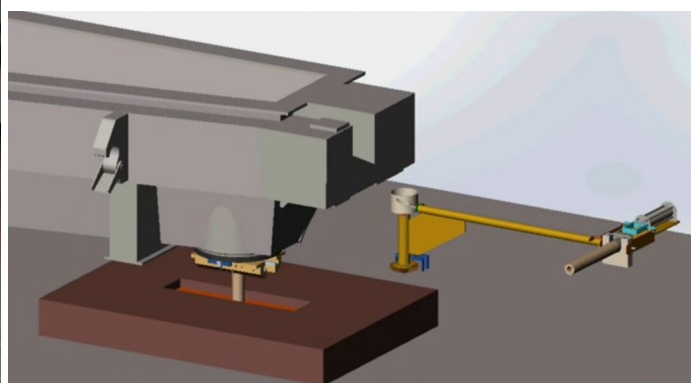
торцу разливочного устройства 21 и расположении его соосно с направляющими. После этого силовым гидроцилиндром 7, расположенным на платформе 9, сменный стакан 5 перемещается по направляющим разливочного устройства 21 до тех пор, пока он не займет место вышедшего из строя погружного стакана 22, экранирующего струю стали, истекающей из промежуточного ковша 20 в кристаллизатор 23 (рис. 2, в). Скорость перемещения стаканов такова, что процесс их замены длится 0,2...0,3 с, т.е. практически без прерывания струи жидкой стали. Замененный погружной стакан удаляют из направляющих пазов разливочного устройства с помощью специального приспособления, а консоль манипулятора возвращается в исходную позицию при повороте колонны в обратном направлении. В исходной позиции элементы конструкции манипулятора не препятствуют перемещению тележки с промежуточным ковшом при аварийном съезде или в случае передачи ковша на ремонтную площадку для замены его футеровки.

### Ход выполнения задания и полученные результаты

После сборки модели аналога манипулятора и размещения его возле объемной модели промежуточного ковша осуществили тестирование функционирования механизмов при имитации быстрой замены вышедшего из строя погружного стакана. Аналогичные испытания были проведены и на 3D модели предлагаемой системы, которая предварительно была построена с помощью систем автоматического проектирования (САПР) КОМПАС-3D и SolidWorks. Последовательность выполняемых операций показана на рис. 6 - 9.



а)

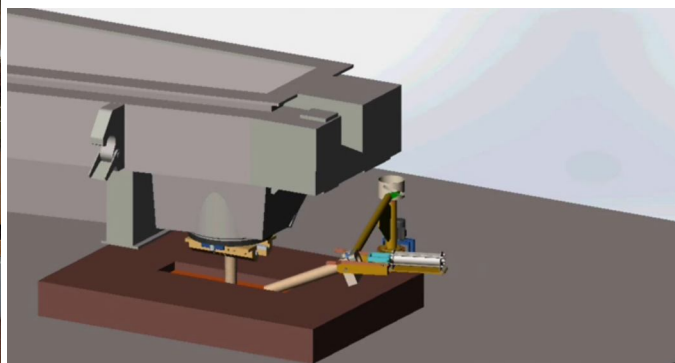


б)

Рисунок 6 – Манипулятор в исходной позиции на рабочей площадке перед промежуточным ковшом: а) физический аналог; б) 3D модель



а)



б)

Рисунок 7 – Относительное положение звеньев лабораторного образца манипулятора (а) и 3D модели (б) при имитации смены погружного стакана в промежуточном положении



Рисунок 8 – Относительное положение звеньев лабораторного образца манипулятора (а) и 3D модели (б) при имитации быстрой смены погружного стакана в конечном положении до момента срабатывания силового гидроцилиндра

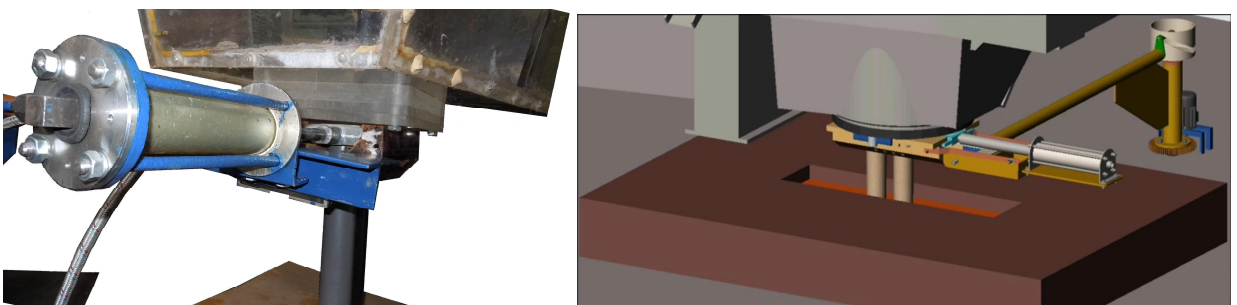


Рисунок 9 – Относительное положение звеньев лабораторного образца манипулятора (а) и 3D модели (б) при имитации быстрой смены погружного стакана в конечном положении после срабатывания силового гидроцилиндра

Система из конечного положения возвращается в исходное путем предварительного обратного хода силового гидроцилиндра, а затем осуществлением реверсирования привода манипулятора.

### **Выводы**

Результаты тестирования физического аналога и 3D модели системы быстрой смены погружных стаканов для серийной разливки стали на слябовых МНЛЗ подтверждают работоспособность всех ее структурных элементов; манипулятор позволяет реализовать заданную траекторию движения в пространстве сменного огнеупорного стакана из исходной позиции в рабочую и осуществить механизированное выполнение операции по его быстрой смене.

Полученная в ходе физического моделирования информация позволит правильно выполнить расчеты энергосиловых параметров новой разливочной системы промежуточного ковша МНЛЗ.

**Рекомендованная литература:** [36, 70, 74–77].

## Лабораторная работа № 15

### Модельные исследования системы дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор слябовой МНЛЗ

#### Постановка задачи

Современная технология непрерывной разливки качественной стали на высокопроизводительных МНЛЗ предполагает ввод в кристаллизатор шлакообразующих смесей (ШОС) с целью стабилизации работы его механизма качания и улучшения условий формирования корочки отливаемой заготовки. При этом главным условием эффективного применения порошкообразных или гранулированных материалов является равномерное их распределение на зеркале расплава. Широко практикуемая на отечественных и зарубежных металлургических предприятиях ручная подача ШОС в дискретном режиме не позволяет добиться постоянства толщины ее слоя по всему поперечному сечению кристаллизатора, а также интенсифицирует труд разливщиков, вынужденных в течение всей серийной разливки выполнять монотонную (рутинную) работу по сталкиванию с помощью деревянных гребков на поверхность жидкой стали смеси, рассыпанной на площадке вдоль широкой стенки металлоприемника.

В связи с этим на протяжении последних десяти лет в стране и за рубежом ведутся исследования по созданию систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы различных типов МНЛЗ. Главным фактором, сдерживающим промышленное применение устройств дозированного ввода шлакообразующих смесей в условиях серийной разливки на слябовых машинах непрерывного литья заготовок, является отсутствие свободного места на рабочей площадке у промежуточного ковша для размещения бункера с гранулированной или порошкообразной ШОС и соответствующих устройств для ее устойчивой транспортировки в полость кристаллизатора на зеркало металла. Поэтому для устранения отмеченной проблемы необходимы новые технические решения, которые позволили бы обеспечить эффективное функционирование дозирующих систем на слябовых МНЛЗ различных фирм-производителей.

В настоящее время существует несколько конструктивных вариантов дозирующих систем, отличающихся типом и местом расположения бункера-накопителя, способами дозированной выдачи из него шлакообразующей смеси, перемещения ее по трубопроводу к кристаллизатору и равномерного распределения в нем на поверхности жидкой стали. Каждая из известных систем имеет свои достоинства и недостатки, проявляющиеся в большей или меньшей мере в зависимости от конкретных производственных условий применения. Так, пневматические и пневмомеханические системы предполагают подачу смеси с помощью аэрационного или механического питателей в струе транспортирующего газа по гибкому трубопроводу из стационарно размещенного на некотором удалении (до 30 м) от кристаллизатора бункера, поэтому его вместимость практически не имеет ограничений, связанных с дефицитом свободного места на площадке в непосредственной близости с тележкой промежуточного ковша. Вместе с этим пневматическая подача вызывает запыление в зоне расположения кристаллизатора в случае использования порошкообразных шлакообразующих смесей, а также требует наличия разветвления подающего трубопровода для ввода материала через несколько сопел с целью равномерного его распределения по всему поперечному сечению металлоприемника.

Системы, включающие подачу ШОС с помощью шнековых устройств, требуют их размещения совместно с бункером на тележке, совершающей возвратно-поступательное перемещение вдоль длинной стенки кристаллизатора по направляющим балкам, закрепленным на раме тележки промежуточного ковша. Причем, на МНЛЗ для отливки слябов сверхкрупного сечения предусмотрена установка двух таких тележек, каждую из

которых перемещается на участке между узкой стенкой кристаллизатора и погружным стаканом. В этом случае питающий бункер имеет ограниченный объем из-за необходимости беспрепятственного перемещения в узком проеме между стенкой промежуточного ковша и металлоконструкциями его тележки. Кроме того, возникают определенные проблемы, связанные с настройкой дозирующей системы при изменении толщины отливаемой заготовки, а также с необходимостью полного опорожнения бункера и шнекового дозатора по окончании разливки стали, поскольку некоторые шлакообразующие смеси при контакте с атмосферой поглощают влагу и твердеют, в результате чего происходит заклинивание (стопорение) шнека, требующее в итоге полную разборку узла дозирования для удаления образовавшегося массива материала. Таким образом, известные системы дозированной подачи ШОС в кристаллизаторы слябовых МНЛЗ не отвечают в полной мере предъявляемым требованиям (универсальность в применении, надежность в работе, простота в эксплуатации и обслуживании).

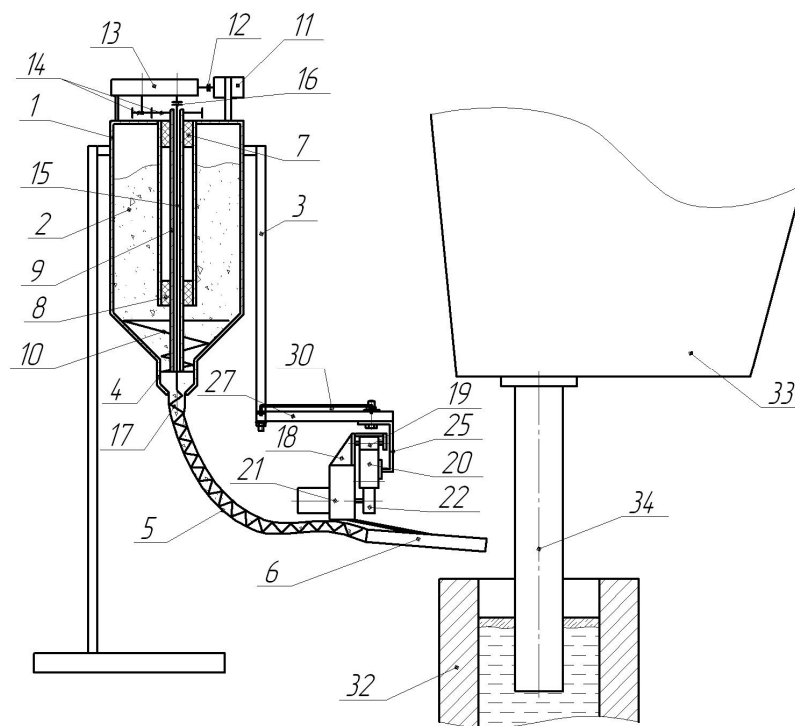
### **Цель исследования**

Целью исследования является проверка работоспособности усовершенствованной системы дозированного ввода в непрерывном режиме шлакообразующих смесей различного химического и гранулометрического составов в кристаллизаторы слябовых МНЛЗ, отличающейся от известных аналогов улучшенными эксплуатационными характеристиками.

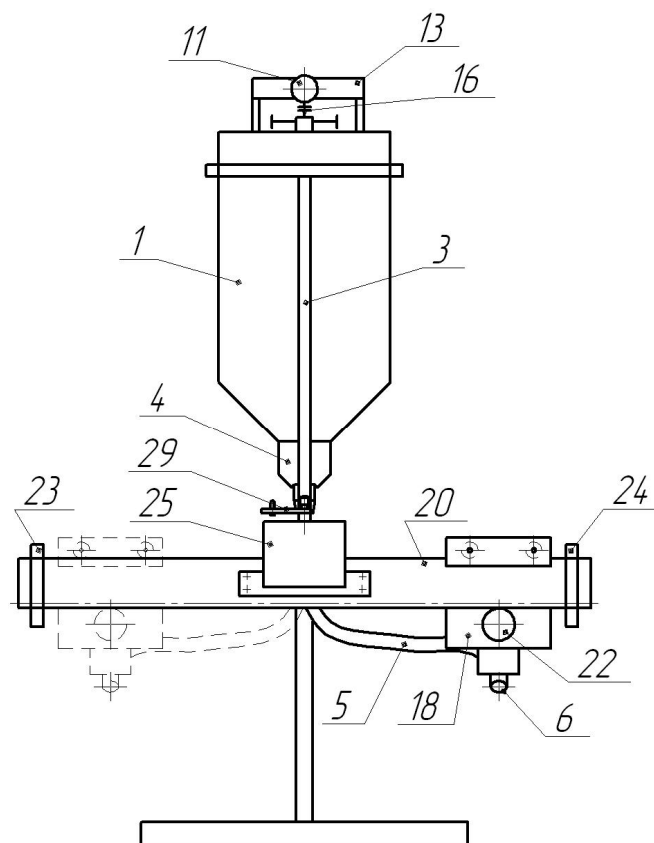
### **Материальное обеспечение**

Исследования проводятся с использованием лабораторного образца системы дозированного ввода ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ, имеющая в сравнении с отечественными и зарубежными аналогами несколько преимуществ, позволяющих повысить ее гибкость и универсальность как в отношении облегчения встраивания в существующий комплекс оборудования эксплуатирующихся машин непрерывного литья заготовок, так и в снятии ограничений по применяемым материалам, имеющим разные механические свойства. Конструктивные особенности разработанной системы поясняют схемы, приведенные на рис. 1 и 2. Предлагаемое устройство включает бункер 1 с расходуемой смесью 2, жестко закрепленный на металлической конструкции 3 и снабженный в нижней части камерой 4, связанной гибким трубопроводом 5 с наклонным подающим носком 6. Внутри бункера 1 в подшипниковых опорах 7 и 8 установлен вертикальный трансмиссионный вал 9 со шнеком 10, нижняя цилиндрическая часть которого соосно размещена в камере 4, а верхняя коническая часть расположена в полости бункера.

На бункере 1 сверху установлен электродвигатель 11, который с помощью муфты 12 связан с быстроходным валом редуктора 13, тихоходный вал которого посредством зубчатой пары 14 связан с вертикальным трансмиссионным валом 9. В продольном канале этого вала коаксиально размещен второй вал 15, верхним своим хвостовиком соединенный с помощью муфты 16 с промежуточным валом редуктора 13. К нижнему хвостовику вала 15 жестко прикреплена стальная витая пружина 17, размещенная с возможностью относительного вращения внутри гибкого трубопровода 5 по всей его длине. Нижний конец этого трубопровода снабжен наклонным подающим носком 6, закрепленным на каретке 18, имеющей возможность возвратно-поступательного перемещения на роликах 19 по горизонтально расположенной балке 20, представляющей собой зубчатую рейку. Перемещение каретки 18 обеспечивает закрепленный на ней мотор-редуктор 21 с зубчатой шестерней 22 на выходном валу, находящейся в зацеплении с зубьями рейки, на концах которой размещены раздвижные фиксаторы 23 и 24 для



а



б

Рисунок 1 – Расположение системы дозированной подачи ШОС на рабочей площадке (а) и ее фронтальный вид (б)

Technical drawing of a mechanical device, likely a pump or valve assembly, showing a side view and a cross-sectional view. The drawing includes the following numbered components and labels:

- 13, 12, 11:** Labels for the main body or housing.
- 5:** A curved pipe or duct.
- 18, 21:** Labels for a vertical assembly, possibly a valve or actuator.
- 24:** A vertical rod or shaft.
- 6:** A large rectangular frame or support structure.
- 34:** A circular component, possibly a flange or seal.
- 31, 30:** Labels for a horizontal assembly, possibly a valve or actuator.
- 29:** A horizontal rod or shaft.
- 20, 23:** Labels for a vertical assembly, possibly a valve or actuator.
- 32:** A vertical rod or shaft.
- A, Б:** Labels for specific points or sections of the device.



Устройство работает следующим образом. Перед началом разливки бункер 1 заполняют шлакообразующей смесью 2 и осуществляют настройку положения наклонного подающего носка 6 относительно передней широкой стенки кристаллизатора 32 с таким расчетом, чтобы носок не задевал находящийся в кристаллизаторе погружной стакан 34 промежуточного ковша 33. Указанная настройка выполняется за счет поворота консоли 27 на вертикальной оси 28 относительно элемента 31 металлоконструкции 3. Благодаря тому, что жестко связанный с металлоконструкцией 3 элемент 31, тяга 30, поворотная консоль 27 и рычаг 29 (рис. 2) образуют параллелограммный механизм, при повороте несущей консоли 27 рычаг 29 и жестко связанный с ним посредством вертикального вала 26 кронштейн 25 вместе с балкой 20 совершают плоско-параллельное перемещение в горизонтальной плоскости относительно широкой стенки кристаллизатора 32 и тем самым обеспечивают возможность расположения параллельно ей на требуемом удалении балки 20 в зависимости от заданной толщины слябовой заготовки, которую предполагается отливать. Затем раздвижные фиксаторы 23 и 24 устанавливают на балке 20 напротив узких стенок кристаллизатора 32.

После запуска ручья машины непрерывного литья заготовок, когда уровень жидкой стали в кристаллизаторе 32 поднимется до установленной отметки, осуществляют пуск электродвигателя 11, передающего вращение через муфту 12 быстроходному валу редуктора 13. При этом одновременно, но с различными скоростями начнут вращаться установленный в подшипниковых опорах 7 и 8 и посредством зубчатой пары 14 связанный с тихоходным валом редуктора 13 вертикальный трансмиссионный вал 9 и коаксиально размещенный в его продольном канале вал 15, с помощью муфты 16 соединенный с промежуточным валом редуктора. Вместе с валами 9 и 15 будут вращаться жестко связанные с ними соответственно шнек 10 и стальная витая пружина 17. Вращающийся шнек 10, витками конической части находящийся в полости бункера 1, осуществляет забор шлакообразующей смеси и передает её витками нижней цилиндрической части в камеру 4, из которой она по каналу гибкого трубопровода 5 вращающиеся внутри него стальной витой пружиной 17 транспортируется к наклонному подающему носку 6. В момент начала поступления шлакообразующей смеси из носка 6 на зеркало металла в кристаллизаторе 32 запускают мотор редуктор 21. При этом начинает вращаться закрепленная на его выходном валу зубчатая шестерня 22, которая, обкатываясь по зубьям рейки, заставит перемещаться на роликах 19 вдоль горизонтально расположенной балки 20 каретку 18 и закрепленный на ней наклонный подающий носок 6.

С помощью установленных на концах балки 20 раздвижных фиксаторов 23 и 24, расстояние между которыми соответствует ширине отливаемой слябовой заготовки, и концевого переключателя, закрепленного на каретке 18 (условно не показано), мотор-редуктор 21 реверсируется в момент нахождения каретки в крайних положениях, в результате чего она совершает возвратно-поступательное перемещение вдоль широкой стенки кристаллизатора, обеспечивая подачу в его полость шлакообразующей смеси в непрерывном режиме с заданным расходом.

Таким образом, благодаря наличию в заявляемом устройстве шнека с конической верхней частью и стальной витой пружиной в гибком трубопроводе, одновременно вращающихся с различными угловыми скоростями в заданном соотношении от одного привода, предотвращается подвисание в нижней части бункера порошкообразной шлакообразующей смеси, интенсивное пылеобразование и тем самым стабилизируется процесс её подачи на зеркало металла в кристаллизатор.

Кроме того, наличие параллелограммного механизма в кинематической цепи устройства, обеспечивающего плоско-параллельное перемещение относительно кристаллизатора балки, несущей каретку с наклонным подающим носком, облегчает и упрощает настройку устройства при его подготовке к работе и в случае необходимости изменения размеров поперечного сечения отливаемой слябовой заготовки, а также

позволяет переводить подвижную часть дозирующей системы из рабочей позиции в положение парковки, освобождая пространство для беспрепятственного выполнения операций по обслуживанию разливочного устройства промежуточного ковша и быстрой замене погружного стакана.

Отсутствие в технической литературе сведений о методиках расчета дозирующих систем с гибким рабочим органом, а также стремление выполнить с минимальными временными и материальными затратами предварительную проверку правильности принятых технических решений и осуществить при необходимости их корректировку еще на стадии проектирования опытно-промышленного образца усовершенствованной системы, послужили основными побудительными мотивами к проведению соответствующих исследований на ее физической модели, изготовленной в масштабе 1: 2,5 (фото на рис. 3).



Рисунок 3 – Физическая модель усовершенствованной системы дозированной подачи ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ

Визуальный контроль функционирования узлов физической модели дозирующей системы и тестовые замеры ее производительности полностью подтвердили не только работоспособность приводов механизмов перемещения каретки и отдельного вращения шнека и витой пружины, а и возможность плавного регулирования в требуемых пределах соответствующих их скоростных характеристик. Наряду с этим была выявлена необходимость применения в промышленном образце дозирующей системы дополнительного привода для механизированного ее перевода из положения парковки в рабочую позицию и обратно. Наличие такого привода упростит и облегчит работу разливщиков в случае возникновения нештатной ситуации и аварийного прекращения разливки (закрытии ручья МНЛЗ).

Полученная в ходе физического моделирования информация была в полном объеме учтена при расчете, конструировании и изготовлении опытно-промышленного образца разработанной дозирующей системы, общий вид и технические характеристики которой соответственно представлены на рис. 4 и в таблице.

Проведенные комплексные испытания в лабораторных условиях в полной мере подтвердили правильность принятых технических решений. Их результаты

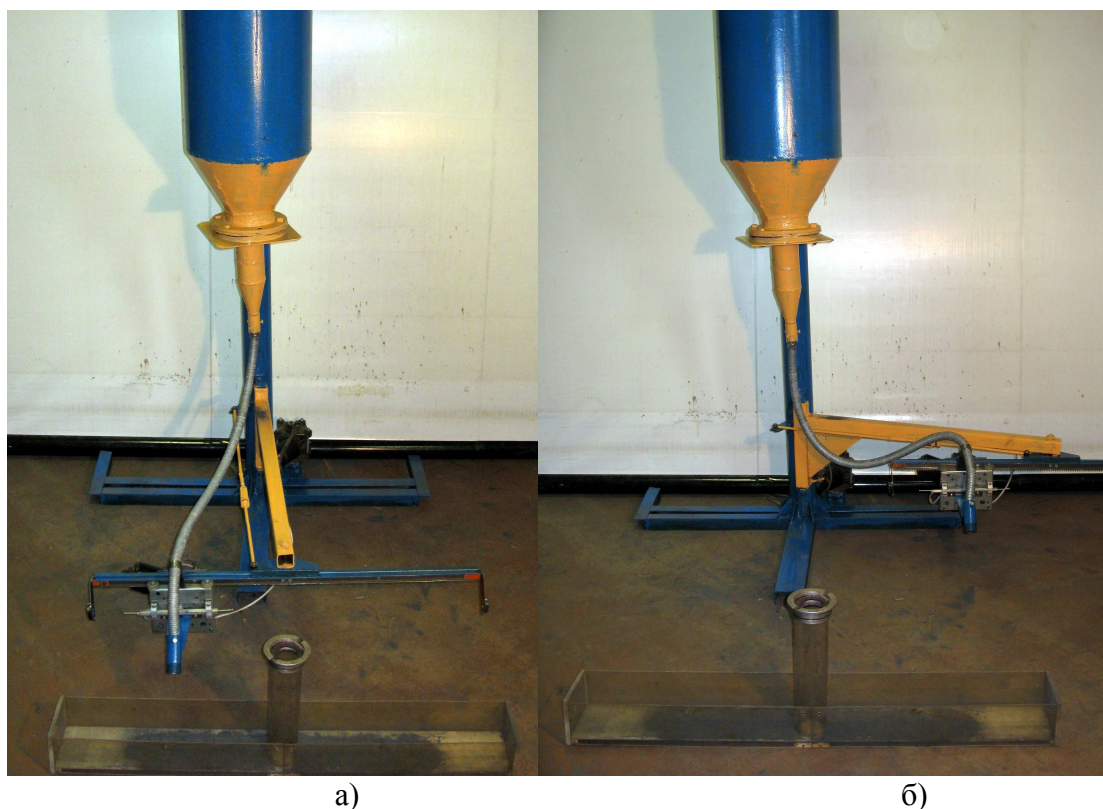


Рисунок 4 – Общий вид опытно-промышленного образца усовершенствованной системы дозированной подачи ШОС в рабочей позиции (а) и в положении парковки (б)

#### Таблица

Технические характеристики механизмов усовершенствованной системы дозированной подачи ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ

Механизмы системы	Значение параметров
Механизм раздельного вращения шнека и витой пружины	
<i>Мощность приводного двигателя, кВт</i>	0,3
<i>Номинальная частота вращения вала двигателя, об/мин</i>	950
<i>Передаточное число редуктора</i>	9
<i>Передаточное число зубчатой передачи</i>	3
Механизм перемещения каретки	
<i>Мощность приводного двигателя, кВт</i>	0,05
<i>Номинальная частота вращения вала двигателя, об/мин</i>	1500
<i>Передаточное число редуктора</i>	25
<i>Скорость перемещения каретки, м/с</i>	0,05 – 0,15
Механизм поворота консоли	
<i>Мощность приводного двигателя, кВт</i>	0,09
<i>Частота вращения вала двигателя, об/мин</i>	950
<i>Передаточное число редуктора</i>	50
<i>Угловая скорость поворота консоли, с<sup>-1</sup></i>	2

свидетельствуют о том, что механизм дозирования, снабженный гибким рабочим органом, обеспечивает высокую степень равномерности ввода как порошкообразных, так и гранулированных материалов, обеспечивая при этом возможность плавного изменения их объемного расхода в широких пределах (от 0,5 до 3 кг/мин).

В соответствии с уже имеющейся договоренностью усовершенствованная система дозированной подачи ШОС в ближайшее время будет передана для промышленного опробования одному из металлургических предприятий Донецкого региона.

## **Выводы**

Разработанная система дозированного ввода ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ имеет следующие преимущества в сравнении с известными зарубежными и отечественными аналогами:

1. Устойчивая работа при дозированной подаче ШОС любого химического и гранулометрического составов.
2. Минимизация требуемой мощности приводов механизмов благодаря значительному уменьшению масс подвижных элементов.
3. Универсальность относительно возможности встраивания в существующий комплекс оборудования слябовых МНЛЗ, находящихся в эксплуатации.
4. Простота в эксплуатации за счет быстрой и легкой настройки механизмов при необходимости перехода на отливку слябов другого поперечного сечения.
5. Обеспечение беспрепятственного обслуживания разливочного устройства промежуточного ковша и быстрой смены погружного стакана благодаря механизированному переводу дозирующей системы из рабочей позиции в положение парковки

**Рекомендуемая литература:** [40, 93, 12, 1, 52, 23, 18, 70, 69, 45].

## **Лабораторная работа № 16**

### **Исследование на физической модели функционирования механизмов системы кислородного конвертера для переработки некачественной шихты**

#### **Постановка задачи**

Неуклонный рост цен на качественные шихтовые материалы вынуждает увеличивать долю фосфористой руды, переплавляемой в доменных печах, что приводит к заметному повышению концентрации фосфора в передельном чугуна. При использовании такого чугуна в кислородно-конвертерном производстве растет количество плавов, осуществляемых по двухшлаковой технологии, что приводит к снижению производительности цеха на 15 – 22 %.

В связи с этим в последние годы активизированы работы по поиску эффективных решений, направленных на выбор рационального варианта технологического процесса получения качественной стали, в наибольшей мере отвечающего экономической целесообразности использования различных комплексов оборудования, позволяющих снизить до требуемого значения концентрацию вредных примесей в готовой продукции (внедоменная обработка чугуна, рафинирование металла в плавильном агрегате или на установках «ковш-печь»).

Для максимального удаления нежелательных примесей при высоком содержании в жидком чугуна фосфора, серы и кремния необходимо обеспечить оптимальные условия проведения кислородно-конвертерной плавки. Различные варианты процесса переработки высокофосфористых чугунов были предложены в Западной Европе еще в 50-х годах минувшего столетия. Особое место среди них занимал Калдо-процесс, в котором высокую степень дефосфорации достигали ускоренным шлакообразованием за счет интенсификации перемешивания ванны путем вращения корпуса конвертера с

частотой  $30 \text{ мин}^{-1}$  относительно его продольной оси симметрии, составляющей с горизонтальной плоскостью угол  $16 - 20^\circ$ , и одновременной подачи в струе кислорода измельченной извести через фурму, введенную в полость агрегата и совершающую колебательное движение. Всего в мире было пущено в строй около двух десятков Кал-До конвертеров вместимостью 30 - 60 т с общей годовой производительностью 5 млн. т стали. К достоинствам выплавки стали в Кал-До конвертере следует отнести: возможности дожигания монооксида углерода, повышения расхода лома до 40 – 50% и переработки чугунов любого состава, а также получения стали с низким содержанием вредных примесей.

К основным недостаткам, не позволившим получить Калдо-процессу широкого распространения, следует отнести большую продолжительность плавки, а также сложность и громоздкость механического оборудования вращающегося конвертера. Из-за размещения привода механизма вращения на корпусе сталеплавильного агрегата (схема на рис.1) возникли значительные трудности при выполнении ремонтных работ, увеличилась общая масса подвижной системы, что потребовало применения более мощного привода механизма наклона конвертера. Существовала также необходимость усовершенствования системы подачи порошкообразной извести с целью повышения равномерности ее ввода в ванну агрегата.

Вместе с этим, по мнению украинских ученых, Калдо-процесс нельзя считать бесперспективным, поскольку присущие ему недостатки можно устранить за счет принятия новых технических и технологических решений. В связи с этим предложена усовершенствованная конструкция кислородного конвертера, лишенная части отмеченных выше недостатков и позволяющего осуществить переработку некачественной шихты (жидкого чугуна и металлического лома) по технологической схеме Калдо-процесса.

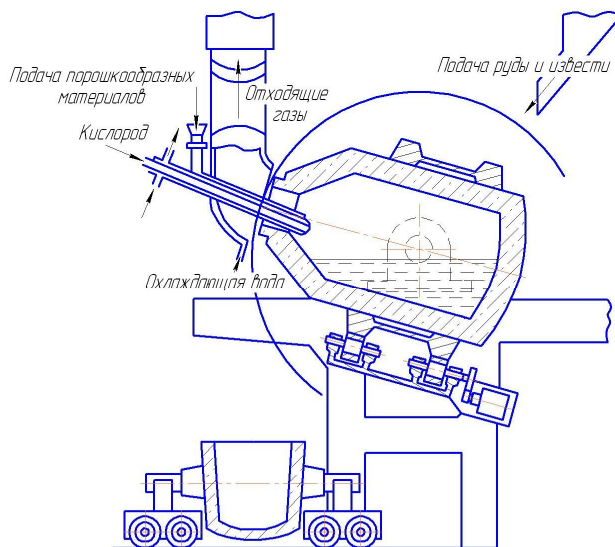


Рисунок 1 – Схема конструкции конвертера для реализации Калдо-процесса

В его конструкцию внесены изменения, касающиеся кинематической схемы механизма вращения корпуса плавильного агрегата и устройства дозированной подачи порошкообразной извести. Сущность внесенных изменений состоит в том, что привод механизма вращения корпуса конвертера выполнен полунавесным, причем двигатель и редуктор смонтированы на металлоконструкции со стороны свободной цапфы. В системе аэрационной подачи порошкообразной извести применен пневмомеханический дозатор с вертикально расположенным шнеком. При такой схеме привода механизма вращения корпуса конвертера значительно упрощается его ремонт и обслуживание, а также снижается нагрузка на привод механизма поворота благодаря уменьшению массы

подвижной системы сталеплавильного агрегата. Общая схема компоновки комплекса оборудования, входящего в состав конвертера, приведена на рис. 2.

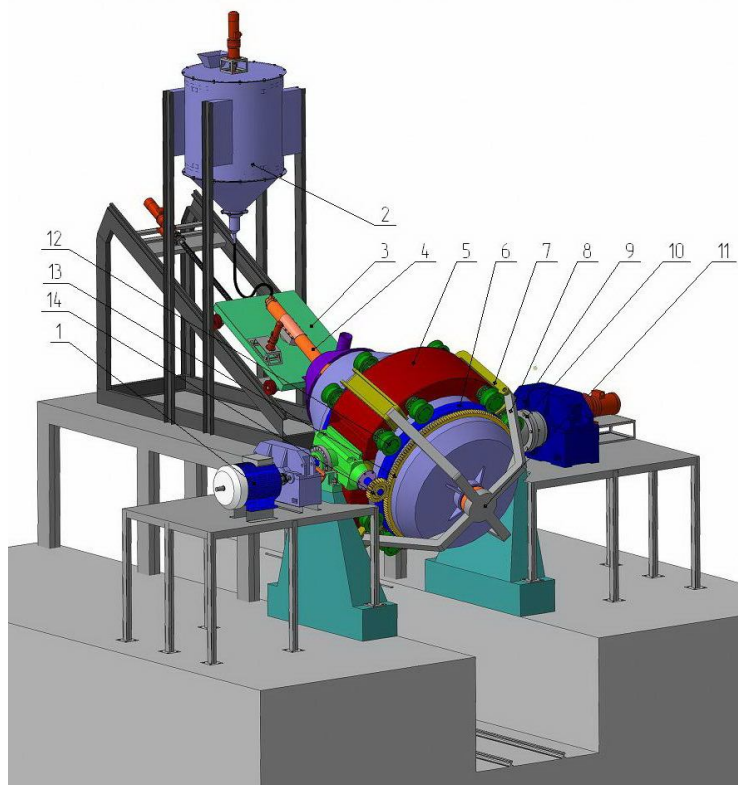


Рисунок 2 – Схема компоновки механизмов разработанного Кал-До конвертера

В конвертере применен классический вариант стационарного одностороннего привода 9 механизма поворота корпуса, включающего электродвигатель, быстроходный и тихоходный редукторы. Связь вала тихоходного редуктора с приводной цапфой осуществляется посредством зубчатой муфты 10, обеспечивающей передачу больших крутящих моментов и компенсацию перекосов соединяемых хвостовиков.

Корпус конвертера выполнен глухондным, сварной конструкции. Его фиксация относительно опорного кольца 5 осуществлена шестнадцатью центрирующими роликами 12, имеющими две реборды. Ролики разбиты на две группы и попарно на осях установлены на нижней и верхней торцевых поверхностях опорного кольца. На наружной цилиндрической поверхности кольца жестко закреплены усиленные ребрами жесткости четыре накладки 7, нижние части которых посредством шарниров связаны с изогнутыми профильными балками 8, удерживающими подшипниковую опору 11 цапфы днища конвертера. Данная опора является центрирующей и воспринимает одновременно радиальную и осевую нагрузку, поэтому она включает два подшипника, один из них радиальный, а другой упорный.

Наружную цилиндрическую поверхность корпуса конвертера охватывают два банджа 6, которыми он опирается на ролики и благодаря их ребордам фиксируется в осевом направлении относительно опорного кольца. Непосредственно под нижним банджом на корпусе конвертера размещен зубчатый венец 13, находящийся в зацеплении с шестерней 14.

### Цель исследования

Целью модельных исследований была проверка правильности предложенного технического решения еще на стадии проектирования опытно-промышленного образца конвертера.

## Материальное обеспечение

Модельные исследования усовершенствованного конвертера проводятся на изготовленной в масштабе 1:10 его действующей физической модели (фото на рис. 3).

## Ход выполнения задания и полученные результаты

В ходе моделирования выполнили качественную оценку работоспособности механизмов поворота и вращения корпуса агрегата, а также системы вдувания порошкообразной извести в его ванну. В частности, было установлено, что привод механизма вращения корпуса конвертера устойчиво функционирует как при любом фиксированном значении угла его наклона относительно горизонтальной плоскости, менявшемся в пределах  $\pm 0 - 90^\circ$ , так и во время поворота относительно оси цапф.

Симуляция процесса вдувания порошкообразной извести с помощью предложенной пневмомеханической системы через фурму, совершающую колебания и подаваемую в полость модели сталеплавильного агрегата с использованием самоходной тележки, оборудованной винтовым механизмом передвижения, подтвердили возможность плавного и четко фиксированного положения фурменного сопла относительно поверхности жидкости, имитирующей расплав. Применение в приводах механизмов передвижения тележки и качания фурмы двигателей постоянного тока позволило обеспечить ускоренное перемещение фурмы во время перевода в крайнее верхнее положение, а также варьировать в заданных пределах ее угловую скорость качания, что крайне важно для регулирования технологического процесса выплавки стали с целью гибкого изменения основных его параметров (время обезуглероживания расплава и шлакообразования).



Рисунок 2 – Физическая модель Кал-До конвертера

## Выводы

1. Предлагаемый сталеплавильный агрегат, как отмечалось ранее, целесообразно эксплуатировать в условиях металлургических мини-заводов, однако сфера его использования может быть расширена. Выбранная его вместимость (10 т) и расчетная

продолжительность выплавки в нем стали (40 – 45 мин) находятся в хорошем соответствии с технологическими параметрами процесса выплавки чугуна в вагранках с производительностью 10 – 12 т/ч, применяемых в литейных цехах заводов индивидуального и мелкосерийного производств [7].

2. Экономический эффект от использования предлагаемой разработки обусловлен возможностью переработки высокофосфористой руды, и некачественного металлического лома, имеющих меньшую стоимость.

**Рекомендуемая литература: [3, 6, 22, 38, 39, 47, 60, 62, 66].**

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Автономная пневмомеханическая система дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ** / С. П. Еронько [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2011. – № 2. – С. 10–18.
2. **Баловнев, В. И.** Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин : учеб. пособие / В. И. Баловнев. – Москва : МАДИ, 2014. – 148 с.
3. **Баптизманский, В. И.** Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов : учебник / В. И. Баптизманский, М. Я. Меджибожский, В. Б. Охотский. – Киев ; Донецк : Вища шк., Головное изд-во, 1984. – 343 с.
4. **Бережний, М. М.** Збагачення та окускування сировини : монографія / М. М. Бережний, В. П. Мовчан. – Дніпропетровськ : Пороги, 2002. – 365 с.
5. **Бесшлаковый выпуск плавки с помощью затвора выпускного отверстия ТАР 120 при производстве чистой стали** / У. Греф [и др.] // *Сталь*. – 2005. – № 7. – С. 51–54.
6. **Ващенко, К. И.** Плавка и внепечная обработка чугуна для отливок : учеб. пособие / К. И. Ващенко, В. С. Шумихин. – Киев : Вища шк., 1992. – 246 с.
7. **Влияние переходных режимов непрерывной разливки на качество заготовки** / Д. А. Дюдкин [и др.] // *Сталь*. – 2008. – № 9. – С. 20–22.
8. **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.
9. **Гидродинамические условия для удаления неметаллических включений в промежуточных ковшах МНЛЗ** / Г. В. Ефимов [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 10. – С. 56–58.
10. **Гичев, Ю. А.** Исследование газодинамической отсечки шлака при выпуске стали из конвертера / Ю. А. Гичев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 7. – С. 170–173.
11. **Гичев, Ю. А.** Результаты экспериментального исследования запирающих свойств газовой струи при газодинамической отсечке шлака / Ю. А. Гичев, В. А. Перцевой // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 7. – С. 208–211.
12. **Горосткин, С. В.** Внедрение системы автоматической подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок / С. В. Горосткин, В. Гартен // *Новые огнеупоры*. – 2013. – № 4. – С. 39–42.
13. **Дьячков, Ю. А.** Моделирование технических систем : учеб. пособие / Ю. А. Дьячков, И. П. Торопцев, М. А. Черемшанов. – Пенза : Транспортные машины, 2011. – 239 с.

14. **Дюдкин, Д. А.** Качество непрерывнолитой стальной заготовки / Д. А. Дюдкин. – Киев : Техніка, 1988. – 253 с.
15. **Еронько, С. П.** Исследование и разработка устройства для непрерывной разливки стали в разреженной атмосфере / С. П. Еронько // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 5. – С. 20–23.
16. **Еронько, С. П.** Исследование на физических моделях процесса отсечки шлака при выпуске стали из кислородного конвертера / С. П. Еронько, С. А. Бедарев, С. В. Мечик // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 7. – С. 7–12.
17. **Еронько, С. П.** Математическое моделирование термических напряжений в огнеупорных элементах устройства для быстрой замены стаканов-дозаторов промковшей МНЛЗ / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, Д. А. Яковлев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2007. – Вип. 9 (122). – С. 130–136. – (Серія «Металургія»).
18. **Еронько, С. П.** Опыт конструирования систем дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок / С. П. Еронько // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». – 2011. – № 11. – С. 35–40.
19. **Еронько, С. П.** Разливка стали: оборудование, технология / С. П. Еронько, С. В. Быковских. – Киев : Техніка, 2003. – 216 с.
20. **Еронько, С. П.** Разработка отечественного конкурентноспособного оборудования для дозированного перелива стали / С. П. Еронько // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 2. – С. 180–185.
21. **Еронько, С. П.** Разработка эффективных схем отсечки шлака при сливе металла из конвертера / С. П. Еронько, А. Н. Смирнов, Д. П. Кукуй // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – № 8. – С. 33–37.
22. **Еронько, С. П.** Расчет и конструирование оборудования для внепечной обработки и разливки стали / С. П. Еронько, С. В. Быковских, Е. В. Ошовская. – Киев : Техніка, 2007. – 344 с.
23. **Еронько, С. П.** Расчет и конструирование системы дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ при производстве слабов сверхкрупного сечения / С. П. Еронько, М. В. Ющенко, С. В. Шлемко // Металлургические процессы и оборудование. – 2011. – № 1. – С. 10–17.
24. **Еронько, С. П.** Расчет энергосиловых параметров ковшовых затворов / С. П. Еронько // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 3. – С. 104–108.
25. **Еронько, С. П.** Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разливки стали / С. П. Еронько, С. В. Быковских. – Киев : Техника, 1998. – 136 с.
26. **Есипенко, В. Г.** Погрешности в определении усилия и скорости смешения при неучете волновых процессов в бояках ударных механизмов / В. Г. Есипенко // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – № 3. – С. 32–33.

27. **Ефимов, Г. В.** Управление процессом рафинирования стали в промежуточном ковше / Г. В. Ефимов // Сталь. – 2001. – № 4. – С. 24–27.
28. **Захарьяс, Д. Р.** Усовершенствование системы контроля потока в промежуточном ковше / Д. Р. Захарьяс, М. Р. Кларк // Сталь. – 2006. – № 5. – С. 72–73.
29. **Инженерные методы исследования ударных процессов** : монография / Г. С. Батуев [и др.] – Москва : Машиностроение, 1977. – 240 с.
30. **Исследование гидродинамики металла в промежуточном ковше слабовой МНЛЗ** / Е. В. Протопопов [и др.] // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». – 2009. – № 2. – С. 24–26.
31. **Исследование и разработка системы быстрой замены погружных стаканов при непрерывной разливке стали** / С. П. Еронько [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 4. – С. 105–108.
32. **Исследование характера передачи ударной нагрузки между подвижно сопряженными элементами механической системы** / С. П. Еронько [и др.] // Металл и литье Украины. – 2008. – № 6. – С. 25–32.
33. **Исследование энергосиловых параметров системы быстрой замены стаканов-дозаторов промежуточного ковша сортовой МНЛЗ** / С. П. Еронько [и др.] // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2008. – Вип. 10. – С. 56–72. – (Серія “Металургія”).
34. **Іванченко, Ф. К.** Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів : монографія / Ф. К. Іванченко, В. М. Гребеник, В. І. Ширяєв. – Київ : Вища шк., 1995. – 454 с.
35. **Кильчевский, Н. А.** Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар : монография / Н. А. Кильчевский. – Киев : Наукова думка, 1976. – 320 с.
36. **Кильчевский, Н. А.** Теория соударения твердых тел : монография / Н. А. Кильчевский. – Киев : Наукова думка, 1969. – 246 с.
37. **Коршиков, В. Д.** Моделирование процессов тепло- и массопереноса : учеб. пособие / В. Д. Коршиков, И. Г. Бянкин. – Липецк : Изд-во Липецкого гос. техн. ун-та, 2014. – 85 с.
38. **Костарев, С. Н.** Физико-химические процессы в техносфере : учеб. пособие / С. Н. Костарев. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 142 с.
39. **Кудрин, В. А.** Металлургия стали : учебник / В. А. Кудрин. – Москва : Металлургия, 1989. – 560 с.
40. **Куклев, А. В.** Практика непрерывной разливки стали : монография / А. В. Куклев, А. В. Лейтес. – Москва : Металлургиздат, 2011. – 432 с.
41. **Левченко, О. А.** Состояние и основные направления развития технического уровня конструкций одновалковых зубчатых дробилок / О. А. Левченко, Э. П. Левченко, А. М. Зинченко // Металлургические процессы и оборудование. – 2011. – № 1. – С. 24–29.
42. **Лейтес, А. В.** Защита стали в процессе непрерывной разливки : монография / А. В. Лейтес. – Москва : Металлургия, 1984. – 200 с.

43. **Маврин, А. И.** К теории ударного погружения свай / А. И. Маврин // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1967. – № 8. – С. 24–28.
44. **Макаров, К. К.** Аглодробилки с консольно расположенными колосниками / К. К. Макаров // Вестник машиностроения. – 2000. – № 7. – С. 69–70.
45. **Математическое и физическое моделирование тепловой защиты** : монография / А. М. Гришин [и др.] – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2011. – 358 с.
46. **Машины и агрегаты металлургических заводов.** В 3 т. Т. 2. Машины и агрегаты доменных цехов : учебник / А. И. Целиков [и др.] – Москва : Металлургия, 1988. – 432 с.
47. **Металлургические мини-заводы** : монография / А. Н. Смирнов [и др.] – Донецк: НОРД-ПРЕСС, 2005. – 469 с.
48. **Михайлов, И. Ф.** Новый способ герметизации сопряжения огнеупорных деталей устройства защиты от вторичного окисления в МНЛЗ / И. Ф. Михайлов // Сталь. – 2007. – С. 6–68.
49. **Михалев, М. А.** Физическое моделирование гидравлических явлений : учеб. пособие / М. А. Михалев. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. – 443 с.
50. **Мищенко, И. М.** Состояние и основные направления повышения технического уровня агломерационного производства предприятий черной металлургии / И. М. Мищенко // Металлургические процессы и оборудование. – 2005. – № 1. – С. 23–26.
51. **Новое оборудование для отсечки шлака при выпуске стали из плавильных агрегатов** / С. П. Еронько [и др.] // Металл и литье Украины. – 2002. – № 11/12. – С. 35–38.
52. **Новые системы дозированной подачи порошкообразных и гранулированных шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ** / С. П. Еронько [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – № 2. – С. 34–38.
53. **Носков, В. А.** Валковый пресс для брикетирования мелкофракционных отходов производства и сырья / В. А. Носков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 2/3. – С. 100–102.
54. **Опыт разработки систем отсечки шлака для сталеплавильных агрегатов** / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия: бюл. ин-та «Черметинформация». – 2007. – № 9. – С. 81–87.
55. **Опыт разработки шибберных устройств для технологических переливов стали** / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». – 2008. – С. 28–35.
56. **Опытно-промышленное опробование брикетов из отсеков силикомарганца при выплавке среднеуглеродистого ферромарганца** / В. А. Носков [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – № 1. – С. 144–146.
57. **Опытно-промышленное производство брикетов из отсеков ферросплавов на ОАО «НЗФ»** / В. А. Носков [и др.] //

- Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 3. – С. 124–126.
58. **Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента** : учеб. пособие / Н. Ц. Гатапова [и др.]. – Тамбов : ТГТУ, 2014. – 77 с.
59. **Пановко, Я. Г.** Введение в теорию механического удара : монография / Я. Г. Пановко. – Москва : Наука, 1977. – 220 с.
60. **Переработка высокофосфористого чугуна в конвертере для разливки на МНЛЗ** / В. Е. Лаукарт [и др.] // Сталь. – 2007. – № 8. – С. 22–23.
61. **Повышение добавочной стоимости за счет системных решений, ориентированных на производственный процесс** / А. Кронтхалер [и др.] // Новые огнеупоры. – 2008. – № 3. – С. 109–117.
62. **Поляков, В. Ф.** Применение агрегата «ковш – печь» в конвертерных цехах / В. Ф. Поляков // Metallurgical and Mining Industry. – 2007. – № 4. – С. 20–22.
63. **Пономарев, В. Б.** Математическая обработка результатов инженерного эксперимента : учеб. пособие / В. Б. Пономарев, А. Б. Лошкарёв. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – 100 с.
64. **Приходько, Т. И.** Свойства кварцитоугольных брикетов на сульфитном щелоке с различным основанием / Т. И. Приходько, В. Е. Потапенко // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». – 1981. – Вып. 16. – С. 54–55.
65. **Процессы непрерывной разливки** : монография / А. Н. Смирнов [и др.] – Донецк : ДонНТУ, 2002. – 536 с.
66. **Развитие дефектов при конечных деформациях. Компьютерное и физическое моделирование** : монография / В. А. Левин [и др.]. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 392 с.
67. **Разработка математической модели и численные расчеты гидродинамических потоков стали в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок** / С. В. Фейлер [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 12. – С. 15–21.
68. **Разработка оборудования системы распределения потоков стали для промежуточного ковша** / С. Н. Ушаков [и др.] // Сталь. – 2009. – № 3. – С. 13–17.
69. **Разработка устройств для дозированной подачи порошкообразных и гранулированных материалов в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок** / С. П. Еронько [и др.] // Металл и литье Украины. – 2009. – № 3. – С. 16–19.
70. **Разработка устройства для непрерывной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизаторы слябовой МНЛЗ** / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». – 2009. – № 4. – С. 36–38.
71. **Раскатов, Е. Ю.** Основы научных исследований и моделирования металлургических машин : учеб. пособие / Е. Ю. Раскатов, В. А. Спиридонов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 468 с.

72. **Расчет энергосиловых параметров системы быстрой замены погружных стаканов при непрерывной разливке стали** / С. П. Еронько [и др.] // *Черная металлургия* : бюл. ин-та «Черметинформация». – 2010. – № 8. – С. 30–35.
73. **Рафинирование металла в промежуточном ковше** / А. Ф. Сарычев [и др.] // *Металлург*. – 2007. – № 7. – С. 36–37.
74. **Севриков, В. В.** Методология и организация научных исследований : учеб. пособие / В. В. Севриков. – Минск : Мисанта, 2011. – 371 с.
75. **Сидоров, В. А.** Моделирование процесса подачи агломерационного пирога в одновалковую зубчатую дробилку / В. А. Сидоров, О. А. Левченко // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. – Алчевск, 2008. – Вып. 27. – С. 255–262.
76. **Снижение количества шлака в ковше при выпуске плавки из конвертера** / Л. М. Учитель [и др.] // *Сталь*. – 1991. – № 4. – С. 27–28.
77. **Совершенствование конструкции устройства для быстрой смены стаканов-дозаторов промковша МНЛЗ** / С. П. Еронько [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 8. – С. 107–109.
78. **Совершенствование разливочных систем промежуточных ковшей МНЛЗ** / С. П. Еронько [и др.] // *Электрометаллургия*. – 2009. – № 7. – С. 37–43.
79. **Совершенствования способа отсечки конвертерного шлака с помощью плавающих шаровых стопоров** / А. Т. Бондаренко [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1992. – № 2. – С. 8–9.
80. **Теория и практика непрерывного литья заготовок** / А. Н. Смирнов [и др.] – Донецк : ДонГТУ : Лебедь, 2000. – 371 с.
81. **Тимохин, О. А.** Исследование движения металла в промежуточном ковше МНЛЗ / О. А. Тимохин // *Черные металлы*. – 2002. – № 2. – С. 18–21.
82. **Устройство для быстрой замены стаканов-дозаторов промежуточного ковша сортовой МНЛЗ** / С. П. Еронько [и др.] // *Черная металлургия* : бюл. ин-та «Черметинформация». – 2007. – № 2. – С. 70–73.
83. **Федоровский, Н. В.** Агломерация железных руд : монография / Н. В. Федоровский, Д. И. Шанидзе. – Киев : Техніка, 1991. – 141 с.
84. **Хедл, Х.** VAINOX – последние разработки VAI в технологии непрерывного литья коррозионностойкой стали / Х. Хедл, К. Фрауэнхубер // *Черные металлы*. – 2001. – № 5. – С. 74–79.
85. **Холмогоров, Н. Н.** Об ударном взаимодействии двух несвободных тел / Н.Н. Холмогоров // *Изв. вузов. Строительство и архитектура*. – 1961. – № 4. – С. 50–61.
86. **Чемодуров, В. Т.** Моделирование систем : монография / В. Т. Чемодуров, Э. В. Литвинова. – Симферополь : АРИАЛ, 2016. – 236 с.

87. **Чернышев, Ю. Г.** О коэффициенте восстановления при забивке свай / Ю. Г. Чернышев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1972. – № 7. – С. 148–151.
88. **Шелковников, И. Г.** Использование энергии удара в процессах бурения : монография / И. Г. Шелковников. – Москва : Недра, 1977. – 160 с.
89. **Штилькеринг, Б.** Эффективность методов отсечки шлака при сливе металла из конвертера // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 10. – С. 38–41.
90. **Эйдельман, Л. П.** Оборудование и технология брикетирования в отечественной и зарубежной черной металлургии / Л. П. Эйдельман. // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». – 1988. – Вып. 8. – С. 2–12.
91. **Энкер, Б.** Новая стопорная система для шлака кислородно-конвертерного производства стали / Б. Энкер, А. Пастер, И. Швельбергер // Metallургическое производство и технологии metallургических процессов. – 2002. – № 5. – С. 12–20.
92. **Howanski, W. S.** Optimizing B.O.F. slag control through the application of refractory darts / W. S. Howanski, T. Kalep, T. Swift // AISTech Proceedings. – 2006. – № 1. – P. 601–609.
93. **Measurement and prediction of lubrication, powder consumption, and oscillation mark profiles in ultra-low carbon steel slabs** / Ho-Jung Shin [et al.] // ISIJ international. – 2006. – Vol. 46, № 11. – P. 1635–1644.
94. **Swirling Flow Submerged Entry Nozzle for Round Billet Casting** / Y. Tsukaguchi [et al.] // Tetsu-to-Hagane. – 2007. – № 9. – P. 575–582.
95. **Vaughan, J.** Anwendung von B2B-Geräten für Dehnungsmessungen / J. Vaughan. – Danemark, 1978. – 126 s.