

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки: 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машино-  
 строительных производств  
 Отделение материаловедения

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Исследование влияния жесткости конструкции на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки</b>

УДК 621.924.93

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ81	Нозирзода Шодмон Салохидин		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко С.Е	К.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кашук И.В.	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООТД	Романцов И. И.	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машино-строительных производств	Крауиньш П. Я.	д.т.н., профессор ОМ		

*Планируемые результаты обучения по ООП 15.04.05*

Код результата	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<b>Профессиональные компетенции</b>		
P1	Применять глубокие естественнонаучные и математические знания для создания нового технологического оборудования и машин.	Требования ФГОС ВО (ОПК 1, ПК2, 3). Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P2	Применять глубокие знания в области современного машиностроительного производства для решения междисциплинарных инженерных задач	Требования ФГОС ВО (ПК-1-4). Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с созданием и обработкой новых изделий с использованием системного анализа и моделирования объектов машиностроительного производства	Требования ФГОС ВО (ПК-5-9). Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P4	Разрабатывать и использовать новое оборудование и инструменты для обработки материалов и изделий, конкурентоспособных на мировом рынке машиностроительного производства	Требования ФГОС ВО (ПК-15-17). Критерий 5 АИОР (п. 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P5	Проводить теоретические и модельные исследования в области машиностроительного производства	Требования ФГОС ВО (ОПК 1, ПК16). Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P6	Внедрять и обслуживать современные высокотехнологические линии автоматизированного производства, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на машиностроительном производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС ВО (ОК-2, ПК-9, ПК11, 12, 13, 14). Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<b>Универсальные компетенции</b>		
P7	Использовать глубокие знания для инновационной инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности	Требования ФГОС ВО (ОПК-4, ПК2, ПК3, ПК-13, ПК-14, ПК-18). Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P8	Активно владеть иностранным языком	Требования ФГОС ВО (ОПК-3, ОПК-4, ПК-13, ПК-18). Критерий 5 АИОР

Код результата	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<b>Профессиональные компетенции</b>		
	ком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности	(п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации Требования	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ПК18). Критерий 5 АИОР (п. 2.13), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P10	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов, компетентность в вопросах устойчивого развития	Требования ФГОС ВО (ОК-2). Критерий 5 АИОР (п. 2.14), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P11	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-3). Критерий 5 АИОР (п. 2.14), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление подготовки: 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ П.Я. Крауиньш  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ81	Нозирзода Шодмон Салохидин

Тема работы:

Исследование влияния жесткости конструкции на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ №59-70/с от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	8.06.2020
--	-----------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Установка гидроабразивной резки модели Tescocut Idro Line 1740.</li><li>2. Рабочий чертеж деталей.</li><li>3. Абразив – гранатовый песок марки MESH 80.</li><li>4. Рабочая среда: вода с водородными показателями рН – нейтральная, под давлением 3-4 кг/см<sup>2</sup>.</li><li>5. Расход воды 5 л/мин.</li><li>6. Расход абразива 400 г/мин.</li></ol>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аналитический обзор данных по гидроабразивной обработке: перспективы развития.</li> <li>2. Постановка цели и задач исследования.</li> <li>3. Методы исследования.</li> <li>4. Моделирование установки гидроабразивной обработки.</li> <li>5. Экспериментальные исследования и определение точности и качества обработанных поверхностей.</li> <li>6. Оптимизация параметров системы СПИД с целью повышение точности и качество гидроабразивной обработки.</li> <li>7. Выводы о проделанной работе..</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Демонстрационный материал (презентация в MS Power Point)</p>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
<i>Литературный обзор и исследовательская часть</i>	Буханченко С.Е., к.т.н., доцент ОМ
<i>Технологическая часть</i>	Буханченко С.Е., к.т.н., доцент ОМ
<i>Финансовый менеджмент</i>	<i>Кацук И.В., к.т.н., доцент ОСГН</i>
<i>Социальная ответственность</i>	<i>Романцов И. И., к.т.н., доцент</i>
<i>Иностранный язык</i>	<i>Диденко А.В., к.ф.н., доцент ОИЯ</i>

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

**Аналитическая часть (обзор)**

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	10.09.2018
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко С.Е.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ81	Нозирзода Шодмон Салохидин		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕ-  
РЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4НМ81	Нозирзода Шодмон Салохидин

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30 %</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	<i>Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования.</i>
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	<i>Расчет бюджетной стоимости НИ по разработке стенда</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	<i>Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.</i>

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4НМ81	Нозирзода Шодмон Салохидин		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b> 4НМ81		<b>ФИО</b> Нозирзода Шодмон Салохидин	
<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа новых производственных технологий</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Отделение материаловедения</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение

Тема ВКР:

<b>Исследование влияния системы СПИД на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	На гидроабразивной установке происходит обработка различных марок материалов. Гидроабразивная резка – вид обработки материалов резанием, где в качестве режущего инструмента вместо резца используется, струя воды или смеси воды и абразивного материала, выпускаемая с высокой скоростью и под высоким давлением. В данной работе рассматривается влияния системы СПИД на точность и качества деталей, полученных при гидроабразивной резке. Гидроабразивные станки устанавливаются в производственных помещениях, где происходит обработка материалов. Помимо гидроабразивных станков в помещении может быть другие металлообрабатывающие станки. Рабочие температуры: +16°С...+26°С. Относительная влажность воздуха: (60-40) %. Область применения: металлообрабатывающая промышленность.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ;</li> <li>- Федеральный закон «Об основах охраны труда в РФ»;</li> <li>- Федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве»;</li> <li>- Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»;</li> <li>- Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»;</li> <li>- Федеральный закон «О пожарной безопасности».</li> <li>- гигиенические требования по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03;</li> <li>- размещение рабочего места по ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ;</li> <li>- ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.</li> <li>- СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.</li> <li>- СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение</li> <li>- ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.</li> <li>- ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам.</li> <li>- Федеральным классификационным каталогом отходов (2017)</li> </ul>

	- ГН 2.2.5.3532-18 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: -повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; -повышенный уровень шума; - недостаточное освещение; - повышенный уровень вибрации; -острые кромки, заусенцы и шероховатости на поверхностях заготовок, инструментов и оборудования; - психофизиологические производственные факторы в том числе: физические перегрузки, связанные с тяжестью трудового процесса и нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса; - вредные вещества. Опасные факторы: -движущиеся машины и механизмы, подвижные части производственного оборудования и т.п.; - электрический ток. Обоснование мероприятий по снижению воздействия.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Атмосфера: взвешенные в воздухе частицы твердых веществ. Гидросфера: загрязнение сточных вод. утилизация люминесцентных ламп, микросхем оборудования.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: наводнения, ураганы, пожары, Наиболее типичная ЧС: возникновение пожара на рабочем месте, электрическое поражение током человека.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Романцов И. И.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ81	Нозирзода Шодмон Салохидин		



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 133 с., 54 рис., 37 табл., 38 источников, 5 прил.

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, точность, резка, качество, режимы резки, рабочая среда, абразив, жесткость системы, позиционирование инструмента, гидроабразивная установка, сила резки, математическая модель, динамические процессы, повышение точности.

Объектом исследования являются конструктивные особенности гидроабразивной установки и технологические параметры гидроабразивной резки.

Цель работы – исследование влияния жесткости конструкции на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки.

В процессе исследования проводился ряд экспериментальных исследований по определению точности обработки в разных зонах резания при разных режимах, определена статистическая жесткость системы гидроабразивной обработки.

В результате исследования установлен характер погрешностей обработанных поверхностей деталей, получаемых при использовании технологии гидроабразивной резки, выявлены причины появления погрешностей обработки поверхностей деталей, оптимизированы параметры, влияющие на качество и точность обработки, получена математическая модель установки гидроабразивной обработки.

Основные конструктивные, технологические и технико – эксплуатационные характеристики: на установке гидроабразивной резки производится резка стали, нержавеющей стали, титана, меди, алюминия, латуни, камня, керамической плитки, мрамора, кварцита, гранита, мозаичных панно, декоративных розеток, декоративных решеток. Обработка производится за один проход, после которого не требуется дополнительная обработка. Составные элементы установки гидроабразивной резки модели Tecnocut Idro Line 1740: 3 интерполированные оси (X, Y, Z) управляются ЧПУ; щуп для контроля хода по оси Z; одна гидроабразивная голова; си-

стема подачи абразива под давлением с бункером на 330 кг, конвейер для удаления отработанного абразива, стандартная решетка, автоматические заслонки рабочей зоны, смотчик для труб воздушно водяного брандспойта, внутренний танк из нержавеющей стали.

Степень внедрения: результаты исследования применены в ООО «НПФ» TRIBOSS» при изготовлении деталей установки рентгеновского сканирования созданной в рамках ФЦП на тему «Разработка технологии интеллектуального производства ответственных пространственно – сложных фасонных деталей».

Область применения: технология гидроабразивной резки благодаря своим уникальным свойствам и универсальности, находит свое применение в различных отраслях промышленности, в изготовлении художественных изделий, строительстве, производстве рекламной продукции. Технология гидроабразивной резки активно используется в следующих отраслях: машиностроение, авиационная и аэрокосмическая промышленность, жилищное и промышленное строительство, электротехническая промышленность, инструментальное производство, резинотехническая промышленность, производство пищевого и торгового оборудования, стекольная промышленность, оборонная промышленность, обувное производство, бумажная промышленность, пищевая промышленность.

Экономическая эффективность работы: оптимизация параметров и модернизации гидроабразивной установки на основе математического моделирования может привести к повышению производительности и снижению себестоимости деталей, полученных на данной установке.

В будущем планируется провести модернизацию установки гидроабразивной резки, как в механической части, так и в части управлением. В механической части установки предусматривается обеспечение жёсткости системы перемещения. В системе управления установки будет введен контроль деформации направляющих в зависимости от зоны обработки.

## Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В работе используются следующие термины с соответствующими определениями:

Технологическая система – совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций.

Жесткость системы – способность системы оказывать сопротивление действию сил, стремящихся ее деформировать.

Точность обработки — это соответствие формы и размеров обработанной детали требованиям чертежа и технических условий.

Заготовка – предмет труда, из которого изменением формы, размеров, свойств поверхности и (или) материала изготавливают деталь.

Деталь – изготовленное, изготавливаемое или же подлежащее изготовлению изделие, являющееся частью изделия, машины или же какой-либо технической конструкции.

Гидроабразивная обработка – гидроабразивная резка – процесс ударного воздействия на обрабатываемую поверхность высокоскоростной гидроабразивной струи.

Абразивные материалы – это материалы, обладающие высокой твердостью, и используемые для обработки поверхности различных материалов.

SWOT-анализ — метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности), Threats (угрозы).

В представленной работе используются следующие обозначения и сокращения:

ГАР: гидроабразивная резка;

СПИД: станок, приспособление, инструмент, деталь;

ПДУ: предельно допустимый уровень;

КПД: коэффициент полезного действия;

ПК: персональный компьютер;

ПО: программное обеспечение;

ПЧ: частотный преобразователь;

ЭВМ: электронно-вычислительная машина.

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 3.1109-82 Единая система технологической документации (ЕСТД). Термины и определения основных понятий (с Изменением N 1).
2. ГОСТ 27.004-85 Надежность в технике (ССНТ). Системы технологические. Термины и определения.
4. ГОСТ ИСО 10816-1-97 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования.
5. ГОСТ Р 52381-2005. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернистого состава.
6. ГОСТ 17.1.1.04-80 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Классификация подземных вод по целям водопользования.
7. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. – Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1).
8. ГОСТ 12.1.004 ССБТ. – Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 11).
9. ГОСТ 12.1.010–76 – Система стандартов безопасности труда. Взрывобезопасность. Общие требования.
10. ПОТ РМ-016-2001 РД 153-34.0-03.150-00 – Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок.
12. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 – Гигиенические требования.
13. СН 2.2.4/2.1.8.562–96 – Шум на рабочих местах, в помещениях жилых

и общественных зданий и на территории жилой застройки.

14. СН 2.2.4/2.1.8.556–96 – Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.

## Оглавление

Введение	17
1 Обзор литературы	20
1.1 Анализ существующих способов обработки материалов	22
1.2 История возникновения гидроабразивной обработки	22
1.3 Анализ особенностей гидроабразивной технологии	23
1.4 Анализ особенности ресурсов используемые при гидроабразивной технологии	25
2 Объект и методы исследований	32
2.1 Объект исследований	32
2.2 Методы исследований	35
3 Расчет и аналитика	37
3.1 Моделирование установки гидроабразивной резки	37
3.1.1 Расчетная часть	38
3.1.2 Составление системы уравнений	48
3.1.3 Составление структурной схемы	53
3.2. Исследование точности и качество изготовления детали «подвес» при гидроабразивной обработке из нержавеющей стали	60
3.3 Исследование точности изготовления детали «стенка передняя» при гидроабразивной обработке из нержавеющей стали	71
3.4 Экспериментальное исследование статической жесткости устройства перемещения режущей головки гидроабразивной установки	80
4 Результаты проведенного исследования	84
4.1 Результаты математического моделирования	84
4.2 Результаты исследования точность и качество деталей, полученных на гидроабразивной установке	88
4.3 Повышение точности и качества деталей, полученных на установке гидроабразивной резки	89
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	91

5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований	91
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	91
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений	92
5.1.3 Swot – анализ	94
5.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	97
5.2 Планирование научно-исследовательских работ	99
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	99
5.2.2 Спределение трудоемкости выполнения работ	100
5.3 Бюджет научного исследования	104
5.3.1 Расчет материальных затрат	104
5.3.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	104
5.3.3 Расчет амортизации специального оборудования	105
5.3.4 Расчет основной заработной платы	106
5.3.5 Дополнительная заработная плата	108
5.3.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	108
5.3.7 Накладные расходы	109
5.4 Определение ресурсоэффективности научного исследования	109
6 Социальная ответственность	112
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	112
6.2 Производственная безопасность	114
6.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов	115
6.3.1 Микроклимат	115
6.3.2 Уровень шума на рабочем месте	116
6.3.3 Уровень вибрации на рабочем месте	117
6.3.4 Освещенность на рабочем месте	119
6.3.5 Электробезопасность	120
6.4 Требования во время работы гидроабразивного станка	121

6.5 Экологическая безопасность	122
6.5.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	122
6.5.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	123
6.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	124
6.6.1 Анализ чс, которые может инициировать объект исследования	124
6.6.2 Анализ чс, которые могут произойти во работы гидроабразивной установки	125
6.6.3 Обоснование мероприятий по предотвращению чс и разработка порядка действия в случае возникновения чс	125
Заключение	127
Список публикаций студента	129
Список использованных источников	130
Приложения	135



## Введение

Модернизация отечественной экономики в стратегии развития Российской Федерации до 2020 года является приоритетной актуальной проблемой [1]. Одним из основных отраслей экономики это – машиностроительное производство. Машиностроительное производство считается главной отраслью металлообрабатывающей промышленности и также занимает центральное место в экономики всех развитых стран мира.

Современная технологическая система – это совокупность потоков энергии, используемых материалов и информации, которые функционирует как единое целое, в котором выполняется определенная последовательность технологических процессов и они между собой связаны [2].

Технологическая система в производстве – это ключевой фактор для получения качественных изделия. Все технологические машины можно представить в виде технологической системы. Именно производительность технологические оборудования в машиностроительных производствах оказывают влияния на качество получаемых изделий. Все технологические оборудования можно рассмотреть, как целые динамические системы. Поэтому необходимо при проектировании технологического оборудования исследовать динамические характеристики, которые влияют на принцип работы оборудования. Динамические системы можно представить в виде дифференциальными моделями, т.е. дифференциальными уравнениями.

В настоящее время необходимо постоянно обновлять ассортименты изделий с целью повышения конкурентоспособности отечественной машиностроительной продукции.

Минимизация времени подготовки производства дает возможность получить наибольшую прибыль в рыночной экономике, это показывает опыт производства ведущих промышленно развитых стран мира.

Повышение конкурентоспособности отечественной машиностроительной

продукции прежде всего зависит от точности и производительности обработки материалов. Повышение точности и производительности обработки на металлообрабатывающем оборудовании является комплексной проблемой, решение которой связано с улучшением качества изготовления металлорежущего оборудования, приспособления и инструментов, поддержанием их точностных характеристик при эксплуатации, а также автоматизацией, комплексной механизацией и роботизацией производства [3]. Повышение качества оборудования на стадиях проектирования и изготовления достигается за счет совершенствования методов расчета конструкций, применения современных материалов, прогрессивной технологии обработки и сборки деталей и узлов. Поэтому управление точности при применении прогрессивных технологий является актуальной задачей.

Цель магистерской диссертации является исследование влияния жесткости конструкции на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки.

Объектом исследования являются конструктивные особенности гидроабразивной установки и технологические параметры гидроабразивной резки.

Предметом исследования является влияние жесткости конструкции на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки.

При выполнении данной работы были применены следующие методы исследования: сравнительный анализ, моделирование, синтез, эксперимент, наблюдение, измерение, сравнение, описание.

В результате выполнения работы решались следующие задачи:

1. На основе доступных литературных источников оценить развитие гидроабразивной технологий на российском и зарубежном производстве.
2. Теоретическое исследование и разработка математической модели гидроабразивной установки.
3. Определение жесткости системы позиционирования инструмента установки гидроабразивной резки.
5. Экспериментальные исследования точности и качества обработки при

ГАР.

6. Определение влияния жесткости системы позиционирования инструмента установки гидроабразивной резки на точность и качество поверхностей получаемого изделия и определение пути повышения точности.

## 1 Обзор литературы

### 1.1 Анализ существующих способов обработки материалов

Под технологическим процессом (технологией изготовления) понимают последовательное изменение формы, размеров, свойств материала или полуфабриката в целях получения детали или изделия в соответствии с заданными техническими требованиями. Каждый технологический процесс целесообразно использовать в определенном диапазоне показателей, обусловленном свойствами материала заготовки и инструмента и технологическими особенностями. При достижении критического уровня его дальнейшее использование становится невозможным по техническим причинам или нерентабельным по экономическим соображениям [20]. В машиностроении существует много видов технологии обработки материалов. Одним из групп способов технологии обработки материалов является электрофизические и электрохимические. Это способы, которые позволяют разделять (раскроя) материалов. В настоящее время существует разнообразие различных способов разделения (раскроя) металлов. Однако, все эти разновидности можно разделить на две большие группы (рис. 1).



Рисунок 1 – Технологии раскроя материалов

Для осуществления процесса механической резки материалов в производ-

стве находят применение разнообразные станки общего и специального назначения для раскроя листовых, профильных и других заготовок из самых различных металлов и сплавов. Применение механических методов раскроя листового материала значительно увеличивает себестоимость изготавливаемой продукции, а, следовательно, снижает конкурентоспособность машиностроительного предприятия. Также механические методы обработки являются низкопроизводительными и энергозатратными. В связи с этим в последнее время все большее распространение на машиностроительных заводах получили физико-механические методы резки металлов. На рис.2 приведены основные методы физико-механические методы обработки материалов и их преимущества и недостатки.

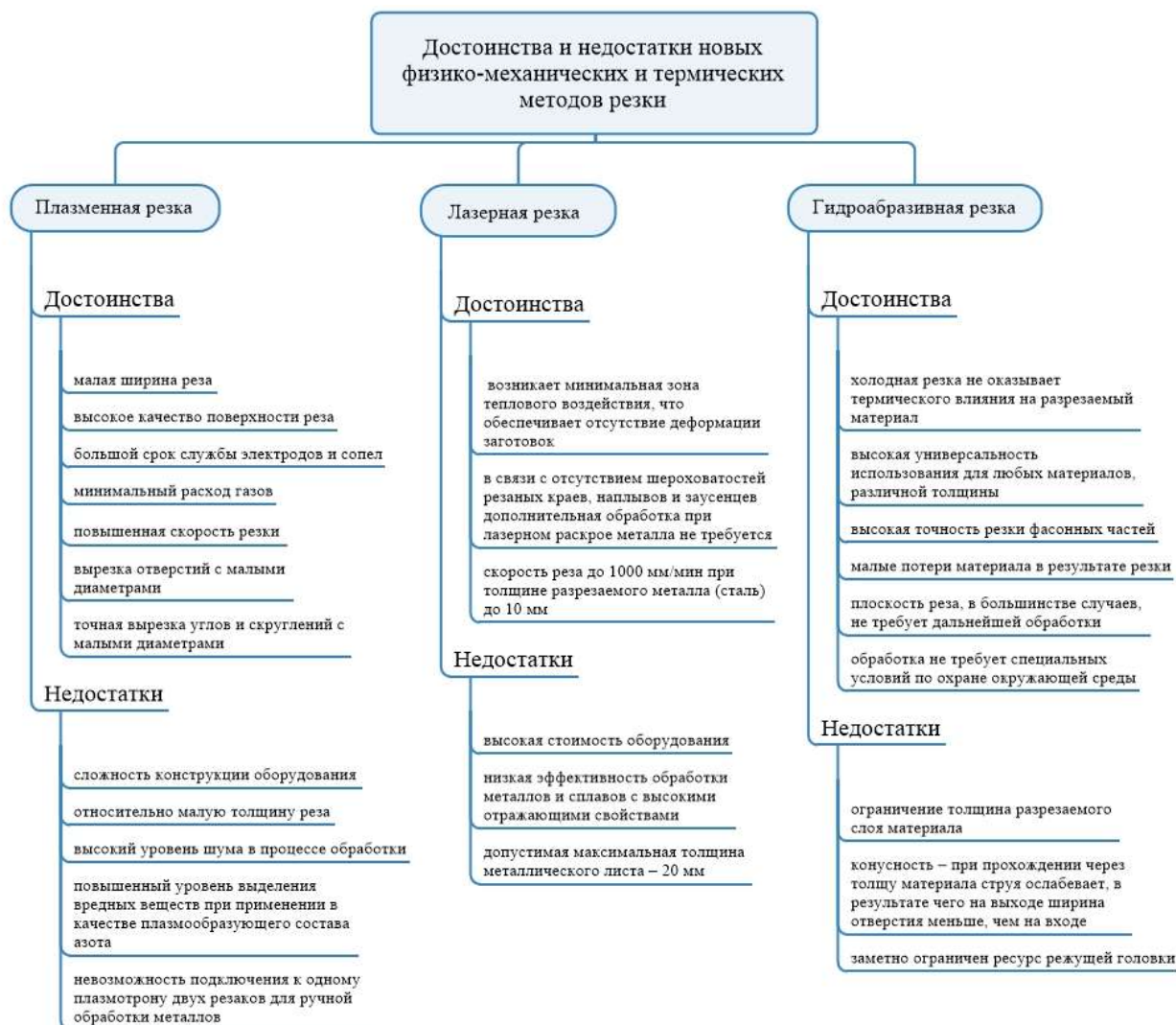


Рисунок 2 – Достоинства и недостатки новых физико-механических и термических методов резки материалов

Уникальность технологии гидроабразивной резки заключается в том, что с

ее помощью можно разрезать практически любые виды материалов. Важно отметить, что гидроабразивная резка является альтернативой не только механической, но и лазерной, плазменной, а также ультразвуковой резке, и в некоторых случаях является единственно возможной.

## 1.2 История возникновения гидроабразивной обработки

Впервые промышленное использование воды под давлением в качестве способа механической обработки твердых поверхностей стало появилось в 30-х годах XX века в Советском Союзе [4]. В начале 1930-х годов советские инженеры впервые использовали водную струю для выемки угля и камня из подземных пластов. В 1935 г. Владимир Мучник выпускник Днепропетровского горного института изобрел способ разрушения угольных пластов водяной струей, а через год в одной из Донбасских шахт был испытан первый гидромонитор. С 1939г. начали появляться промышленные гидрошахты.

Однако впервые подобный метод упоминается в еще 1850-х годах. Золотоискатели в Калифорнии вымывали породу из шурфов при помощи брандспойтов, чтобы не делать этого вручную. К концу XIX века в Южноафриканских шахтах использовались уже целые подземные гидропроводы.

В начале 50-х годов в поисках оптимального способа разрезания крупных стволов деревьев, инженер лесного хозяйства Норман Франц проводил эксперименты и обнаружил, что водой под высоким давлением можно резать древесину и полиматериалы.

Дальнейшее применение данная технология получила в США в 60-х годах двадцатого века при обработке оптоволоконных материалов, используемых в авиастроительной промышленности [4].

Знаменитая теперь компания «Flow International» в 1973 году выпустила шлифовальные пескоструйные машины, разработанные специалистом (а сегодня главой) компании доктором Моххаммедом Хашишем. Именно он в 1979 предложил для увеличения режущей способности добавлять в воду в качестве абразива

гранатовый песок, который обычно используют при изготовлении наждачной бумаги [5]. В восьмидесятом году спроектировали и запустили первый гидроабразивный станок, а в 1983 г. компанией «Flow» было организовано их серийное производство.

История компании «Flow» уходит корнями в начало 1970-х, когда несколько специалистов, оставив работу в научно-исследовательском и опытно-конструкторском отделе «Boeing», основали «Flow Research». Первой коммерчески успешной технологией «Flow Research» стало использование водяной струи сверхвысокого давления в качестве инструмента промышленной резки. После этого данная компания получила патент на изобретения гидроабразивной установки. Таким образом, «Flow Research» является первым производителем гидроабразивных установок в мире. Теперь технология гидроабразивной резки продолжает развиваться, существуют крупные предприятия по разработке и выпуску гидроабразивных станков.

### 1.3 Анализ особенностей гидроабразивной технологии

Гидроабразивная обработка является одним из новых и развивающихся методов обработки материалов. В основе технологии гидроабразивной резки лежит принцип эрозионного воздействия смеси высокоскоростной водяной струи и твердых абразивных частиц на обрабатываемый материал. Физическая суть механизма гидроабразивной резки состоит в отрыве и уносе из полости реза частиц материала скоростным потоком твердофазных частиц. Устойчивость истечения и эффективность воздействия двухфазной струи (вода и абразив) обеспечиваются оптимальным выбором целого ряда параметров резки, включая давление и расход воды, а также расход и размер частиц абразивного материала.

Суть метода гидроабразивной резки заключается в том, что песчинки, разогнанные до огромной скорости струей воды, отрывают фрагменты обрабатываемого материала как показано на рис.1. Затем разрушающая сила такого луча гасится водой, находящейся в ванне, расположенной на пути движения струи.

Благодаря энергии, которой обладает такая струя, появляется возможность резать материалы большой толщины [7].

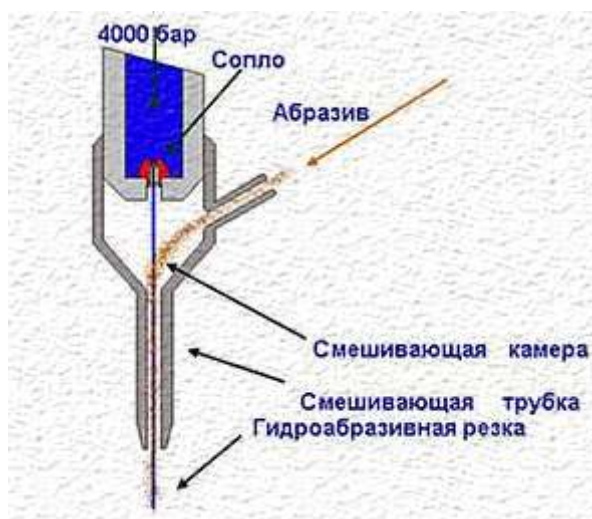


Рисунок 3 – Рабочая операция резки материала под большим давлением на гидроабразивной установке

Применение данного метода обработки дает возможность значительно уменьшить потери материала за счет малой ширины резания, т.е. сокращения припусков. С экологической точки зрения гидроабразивная обработка является чистой и безопасной. Максимально сокращаются вредные и опасные факторы, влияющие на работника при обработке материалов. Используемый абразив безвреден для здоровья операторов, поскольку не вызывает профессиональных заболеваний, и отходы его могут быть использованы как в строительных растворах, так и для других целей. При гидроабразивной обработке есть возможность регенерации отходов для повторного использования в качестве режущего материала.

Поскольку при гидроабразивной резке нет накапливаемого тепла и отсутствуют какие-либо газы, технология является взрыво- и пожаробезопасной. Это позволяет осуществлять рез даже взрывчатых веществ, например, при утилизации боеприпасов, а также нефте- и газосодержащие емкости, и трубопроводы и так далее.

Проанализировав технологический процесс гидроабразивной обработки, можно отметить, что при данном виде обработки, режущий инструмент не требует заточки. На изделие уменьшаются ударная нагрузка и влияние обратной силы на



режущей инструмент, так как между заготовкой и режущий инструментом отсутствует непосредственный контакт. Низкое тангенциальное усилие на деталь позволяет в ряде случаев обойтись без зажима этой детали. На гидроабразивном станке есть возможность выполнения различных операции (например, сверления и резки) одним и тем же инструментом. Это позволяет сконцентрировать несколько операции в одной. Так же есть возможность резки на одном столе одновременно несколькими режущими головками от одного насоса высокого давления.

Гидроабразивная обработка на промышленном предприятии выполняется на гидрообразные станки. На гидроабразивные станки возможно производить резку материалов до толщины 300 мм. Такие станки с использованием данной технологии оснащаются с ЧПУ. Это значительно повышает производительность труда и расширяет возможности применения и сложность выполняемых операций. Наиболее известными производителями гидроабразивных станков в мире приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Наиболее известными производителями гидроабразивных станков в мире

Страна	Компания	Модели станков
США	Flow	Flow WMC2 с ЧПУ
	Jet Edge	OMAX JetMaching Center 2626 с ЧПУ
Швеция		Water Jet Sweden NC 1000 с ЧПУ
Голландия	Resato	Resato R-LCM 1515-1 с ЧПУ
Чехия	PTV	Cobra WJxxyy-nZ-C; Uni Jet WJxxyy-nZ-UJ
Италия	Garetta Technology	Tecnocut Idro Line 1740
Швейцария	Bystronic	BYSTRONIC ByJet Smart 3015

#### 1.4 Анализ особенности ресурсов используемые при гидроабразивной технологии

Любая производственная организация стремится к использованию современного оборудования и технологий, повышению качества продукции, оптимизации расходов. Благодаря универсальности и экологической безвредности технология гидроабразивной резки нашла применение в промышленном производстве, строительстве, изготовлении художественных изделий и других сферах человеческой деятельности.

Технология гидроабразивной резки уникальна тем, что с её помощью возможен раскрой большинства видов материалов. Для алюминиевых сплавов, меди и латуни данная технология более эффективна, чем лазерная резка, т.к. эти металлы имеют низкую способность к поглощению энергии лазерного излучения и требуют увеличения мощности нагрева [7]. Наряду с гидроабразивной резкой широко применяется лазерная и плазменная резка. Раскрой материала в двух последних случаях происходит путём его расплавления в области реза. Это накладывает ограничения на область их применения в отличие от универсальной гидроабразивной резки.

Основные ресурсы для осуществления обработки на установке гидроабразивной резки являются вода и абразив. Для нормального эксплуатирования оборудования для гидроабразивной резки применяют расходные материалы как искусственного, так и природного происхождения. Необходимо отметить, что твёрдость абразива обычно определяется по шкале Мооса. Основные ресурсы для осуществления обработки на гидроабразивной установке приведены на рис. 4.

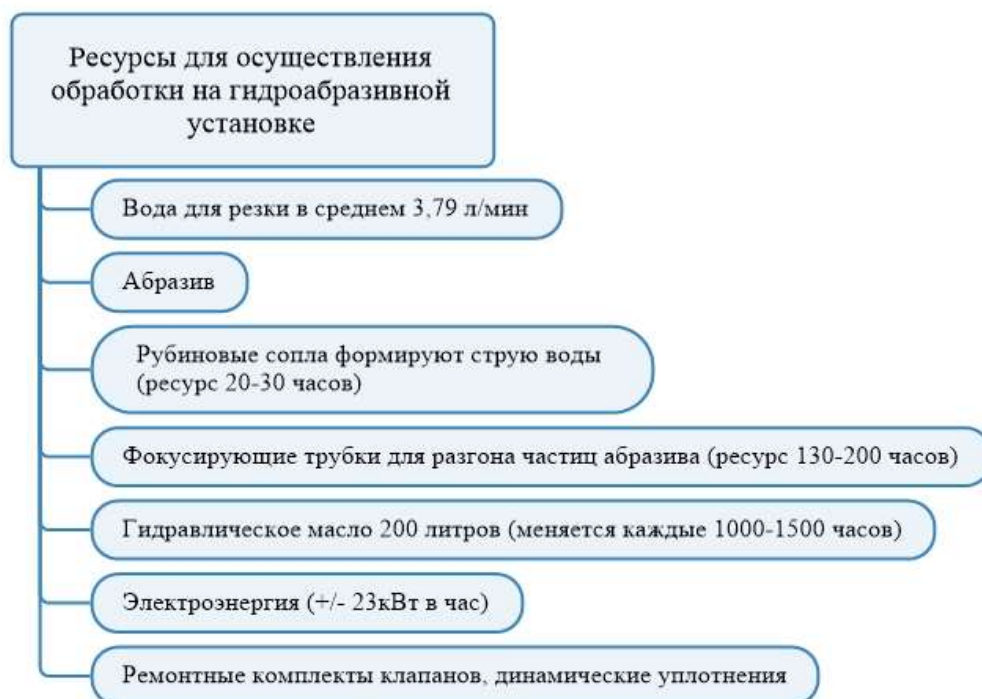


Рисунок 4 – Ресурсы для осуществления обработки на гидроабразивной установке

Подача воды для насоса высокого давления должна соответствовать следующим требованиям. Высокая концентрация растворенных твердых веществ, особенно кальция, диоксида кремния и хлоридов, будет влиять на срок службы компонентов НВД. При плохом анализе (графа минимум) воды требуется доукомплектовать станок системой умягчения воды, чтобы увеличить ресурс запчастей. В таблице 2 приведены основные требования к качеству воды для гидроабразивной резки.

Таблица 2 – Требования к качеству воды для гидроабразивной резки

Параметр	Минимум	Хорошее	Лучшее
Щелочность (мг/л)	50	25	10
Кальций (мг/л)	25	5	0.5
Диоксид углерода (мг/л)	0	0	0
Хлорид (мг/л)	15	1	0,1
Свободный хлор (мг/л)	0,2	0,1	0.05
Железо (мг/л)	0.2	0.1	0.01
Марганец (мг/л)	0.1	0.1	0.1
Магний (мг/л)	0.5	0.1	0.1
Нитраты (мг/л)	25	25	10
Кислород (мг/л)	2	1	0.1
РН Значение	6.5 — 8.5	6.5 — 8.5	6.5 — 8.5
Кремний (мг/л)	15	10	1
Натрий (мг/л)	50	10	1
Сульфат (мг/л)	25	25	1
Общее количество растворенных твердых веществ, TDS (mg/l)	200	100	25*
Электрическая проводимость [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	290	145	45*
Общая жесткость в пересчете на CaCO <sub>3</sub> (мг/л)	25	15	1
Замутненность (NTU)	5	5	1

В технологии ГАР применяются минеральные абразивы. Одним из важнейших параметров для абразива является его твёрдость, измеряющаяся согласно минералогической шкале Мооса. Для ГАР применяются абразивы с твёрдостью 6,5 и выше по Моосу. Выбор разновидности абразива зависит от физических свойств материала, подвергающегося раскрою. Твёрдость абразивного материала должна быть выше твёрдости обрабатываемой заготовки [8]. Виды абразивов при используемых при гидроабразивной обработке приведены на рис. 5.



Рисунок – 5 Виды абразивов и их основные характеристики

Гидроабразивная резка является безальтернативным способом обработки в виду отсутствия температурного воздействия и невысокий расход режущего материала. Кроме того, высокая функциональность гидроабразивных станков позволяет обрабатывать не только различные материалы, но и элементы, отличающиеся габаритами, сложными формами и фигурными контурами.

В настоящее время для гидроабразивной резки широко используется гранатовый песок, например, «Garnet» [9]. Этот материал является твердыми и тяжелым абразивом, его плотность приблизительно 4,1-4,3 г/см. Гранатовый песок имеет кристаллическое строение, которое имеет высокую твердость и прочность, обеспечивая ему высокую сопротивляемость к разрушению. Благодаря этим свойствам гранатовый песок в течение всего времени использования, является фактически устойчивым и обеспечивает высокое качество реза. Самая распространенная фракция гранатового песка - 80 Mesh.

Также в России создан отечественные порошки для гидроабразивной резки на основе медного и никелевого шлаков с физико-техническими показателями, обеспечивающими высокое качество реза при обработке поверхностей элементов, выполненных из разных материалов. Порошок для гидроабразивной резки создан из смеси медного шлака и электрокорунда и из смеси никелевого шлака и электрокорунда.

Никелевый и медный шлаки, используемые для производства порошка для струйной гидроабразивной резки, являются отходами металлургического производства при плавлении меди и рафинировании никеля. Электрокорунд искусственно созданный абразивный материал, получаемый плавкой в электрических печах боксита с восстановителем (антрацит, нефтяной кокс) и осадителем. Патентованные порошки для гидроабразивной резки, содержат шлаки и характеризуются следующими физико-механическими свойствами, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-механическими свойства отечественных порошков

Показатель	Никелевый шлак	Медный шлак
Внешний вид	Частицы темного-серого цвета	
Форма частиц	остроугольная	
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1400+1900	
Массовая доля влаги, %	Не более 1	
Абразивная способность	Не менее 4	
Твердость по Моосу	5,5-7,4	
Точка плавления, °С	917-1061	

Результаты исследования в ООО «Уралгрит» подтверждают, что обработка различных материалов резанием, инструментом, в котором вместо резца используется смесь воды и порошка произведенного из смеси никелевого шлака или медного шлака и электрокорунда, является эффективным способом резки в первую очередь за счет существенной экономии материальных затрат на порошок [19].

Таким образом, основными критериями для выбора абразива при ГАР:

- твердость исходного материала, гранатовый песок, например, имеет твердость от 7 по Моосу, что достаточно для резки стали, необходимо учитывать, что от твердости абразива зависит и износ деталей и узлов режущей головки;
- фракция, мелкое зерно более эффективно в некоторых случаях, хотя восстановить для повторного использования мелкое зерно фактически невозможно,

рациональным размером зёрен считается 10-30% от диаметра сопла режущей головки;

- при выборе водного абразива необходимо учитывать и требуемую шероховатость полученной линии реза, если технические условия позволяют большую шероховатость, то вполне можно использовать и более крупный абразив и наоборот.

## 2 Объект и методы исследований

### 2.1 Объект исследований

Объектом исследования является взаимосвязь конструктивных особенности технологического оборудования и технологических параметров, влияющие на точность и качество обработки деталей при гидроабразивной резки.

В качестве технологического оборудования применяется установка гидроабразивной резки модели Tecnocut Idro Line 1740. На рис. 6. Приведены расположения и идентификация компонентов системы гидроабразивной установки.

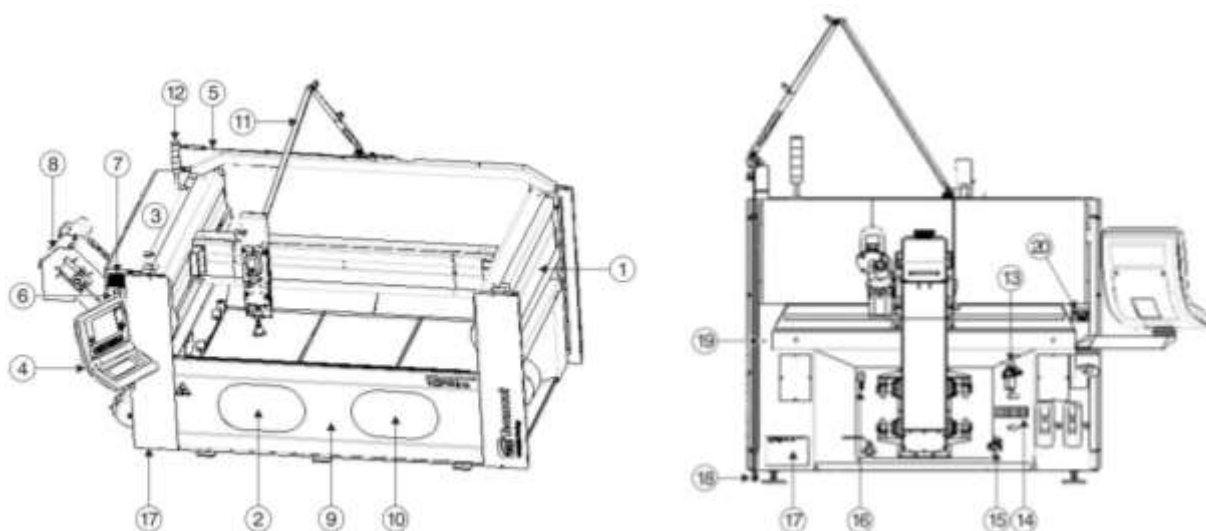


Рисунок 6 – Расположения и идентификация компонентов системы гидроабразивной установки:

1 – боковая защита картера; 2 – режущая голова; 3 – электрошкаф; 4 – панель управления; 5 – фильтр высокого давления; 6 – разъем USB; 7 – электрический шкаф воздушный фильтр; 8 – система для откачки отработанной абразивной суспензии (драга); 9 – передние двери предохранителя безопасности; 10 – прозрачные иллюминаторы; 11 – распыление воды штанги пантографа; 12 – многофункциональная легкая дорожка; 13 – FRL (смазчик регулятора фильтра); 14 – пневматический шкаф; 15 – абразивный регулятор давления; 16 – слив "слишком полный"; 17 – соединения для (слева): общая сеть, сигналы усилителя, сеть передачи данных, сигнал пропеллера, подача воздуха в стол ( 10 мм), подача пропеллера ( 6 мм); 18 – интерфейс высокого давления; 19 – сопло для смазки оси Y; 20 – идентификационная пластина.

Установки для струйно-абразивной обработки работают как при низком



(0,5...0,8 МПа), так и при высоком (4...10 МПа) давлениях. Высокое давление используется для интенсификации обработки грубых поверхностей заготовок. Увеличение давления сжатого воздуха приводит к повышению производительности. Так, увеличение давления от 3 до 6 МПа повышает скорость съема металла более, чем в 3 раза.

Скорость движения подачи на предварительных операциях составляет 0,5...2 м/мин, на окончательных операциях 0,15...0,20 м/мин. Скорость съема металла изменяется в пределах 10-30 мкм. Шероховатость обработанной поверхности составляет  $Ra=1,7...0,7$  мкм.

Рабочая среда в данном процессе является вода с водородными показателями pH – нейтральная, под давлением 3-4 кг/см<sup>2</sup>. Режущий инструмент на гидроабразивной установке является струи смеси рабочей среды с абразивом. В качестве абразива в данной работе применен – гранатовый песок марки MESH 80. Расход воды равен 5 л/мин, а расход абразива 400 г/мин.

Геометрическая точность формы обеспечивается при ГАР на весьма высоком уровне, однако при обработке углов могут возникать проблемы, которые решаются настройками скорости подачи. Как правило, в зоне, где струя меняет траекторию, образуя прямой или острый угол, скорость струи и скорость подачи уменьшают [3]. Все параметры технологической системы ГАР, которые так или иначе влияют на факторы качества можно разделить на три группы: производственные, технологические, частные (рис.7).



Рисунок 7 – Взаимосвязь параметров технологической системы ГАР и факторов качества реза

Удаление материала при воздействии на обрабатываемую поверхность струи абразивных частиц происходит в результате взаимодействия нескольких одновременно протекающих процессов: соударение частиц между собой внутри набегающего потока; дробление отдельных частиц; экранирование обрабатываемой поверхности, отскакивающими от нее частицами; повреждение поверхностного слоя материала вследствие многократных ударов абразивными частицами.

Движение струи сопровождается бомбардировкой обрабатываемой поверхности абразивными частицами. Количество ударов абразивных частиц колеблется в зависимости от условий обработки от  $2 \cdot 10^6$  до  $25 \cdot 10^6$  в секунду.

Рабочая среда выполняет следующие функции: обеспечивает транспортировку абразивных частиц от расходной емкости до обрабатываемой поверхности; непрерывно очищает обрабатываемую поверхность, удаляя отработанные абразивные частицы и частички снятого материала; предотвращает образования пыли; является носителем поверхностно-активных веществ, создающих адсорбирующие слои полярных молекул и уменьшающих межатомные связи в поверхностном слое обрабатываемого материала и снижает, таким образом, твердость и сопротивляемость материала разрушению; регулирует тепловой режим в зоне

обработки. Рабочая среда должна не только обеспечивать интенсивность обработки поверхности, но и предотвращать прилипание частиц снятого материала к обрабатываемой поверхности, а также проявлять антикоррозионные свойства. Объемное содержание абразивных частиц в суспензии подбирается опытным путем. Рекомендуется объемная концентрация абразивных частиц в суспензии 20...30 %.

Абразивные частицы в процессе ударного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью изнашиваются, их рабочие грани округляются, что приводит к снижению абразивной способности. При непрерывной обработке в зависимости от вида абразивного материала срок действия суспензии составляет 40...70 часов.

## 2.2 Методы исследований

Методы исследования делятся на две большие группы: теоретические и эмпирические. Это деление основано на используемом способе получения информации: эмпирические методы построены на основе наблюдений за объектом, а теоретические – на основе полученной информации [10].

Кроме того, методы исследования делятся на количественные и качественные. С помощью количественных методов исследования измеряют свойства или характеристики объекта в численных показателях, а с помощью качественных – получить развернутую аналитическую информацию.

В данной работе применены следующие виды теоретических методов:

- сравнительный анализ – метод сопоставления двух и более объектов исследования (явлений, предметов, идей, результатов и т.п.). В результате анализа рассматриваются достоинства и недостатки гидроабразивных установок и гидроабразивная обработка.

- моделирование – схематичное воссоздание изучаемого явления в доступ-

ном материале для изучения его гипотетических свойств; в данной работе применяется математическое моделирование в программном пакете «MatLab».

- синтез – создание единой концепции из разрозненных данных, собранных воедино.

В данной работе применены следующие виды эмпирические методов:

- эксперимент – материальное воплощение гипотез и концепций, используемое для подтверждения или опровержения их. Проведение экспериментальных исследований по определению точности и качеству деталей, полученных на гидроабразивном станке, также ряд экспериментов по изучению динамические процессы при ГАР.

- наблюдение – процесс пассивного познания изучаемых явлений и объективной фиксации результатов восприятия;

- измерение – активное познание явлений путем определения их основополагающих характеристик и свойств в исчисляемых единицах меры. Измерение реальных размеров деталей, полученных на гидроабразивной установке.

- сравнение – сопоставление предметов и явлений по значимым характеристикам. Сравнение полученных размеров с размеров заданные по рабочему чертежу.

- описание – процесс подробной фиксации данных, полученных в результате перечисленных выше методов.

### 3 Расчет и аналитика

#### 3.1 Моделирование установки гидроабразивной резки

Динамические системы можно представить в виде дифференциальными моделями, т.е. дифференциальными уравнениями. В практике по теории таких систем применяются два основных метода позволяющие представить динамическими моделями:

- первый метод представление процессов в системах из самых систем в переменных входа-выхода, т.е. реальные которые действуют на систему. Рассматривается влияния (вход) в измеримых физических переменных, которые характеризуют динамические процессы и также интересующих исследователя (выходы);

- второй метод принимаются представления в переменных состояния [10].

В данной работе применяется первый метод. Так как данный метод позволяет более точно определить состояние устойчивости системы. В данной части рассматривается теоретическое исследования и моделирование установки и динамических процессов гидроабразивной резки. Внешний вид гидроабразивной установки приведен на рис.8.

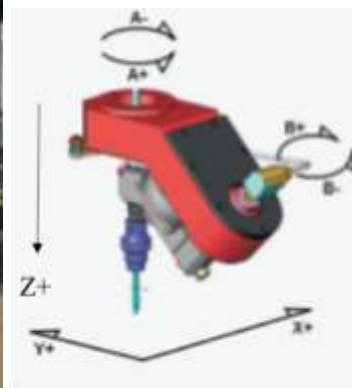


Рисунок 8 – Внешний вид гидроабразивной установки

### 3.1.1 Расчетная часть

В данной части составляется расчетная схема, которая описывает конструкцию установки. Все элементы, которые входят в конструкции установки будут обозначены в расчетной схеме.

#### 3.1.1.1 Расчетная схема

Исходя из конструкции гидроабразивной установки (рис.8) для моделирования системы составлена расчетная схема. Расчетная схема гидроабразивной установки представлена на рис. 9.

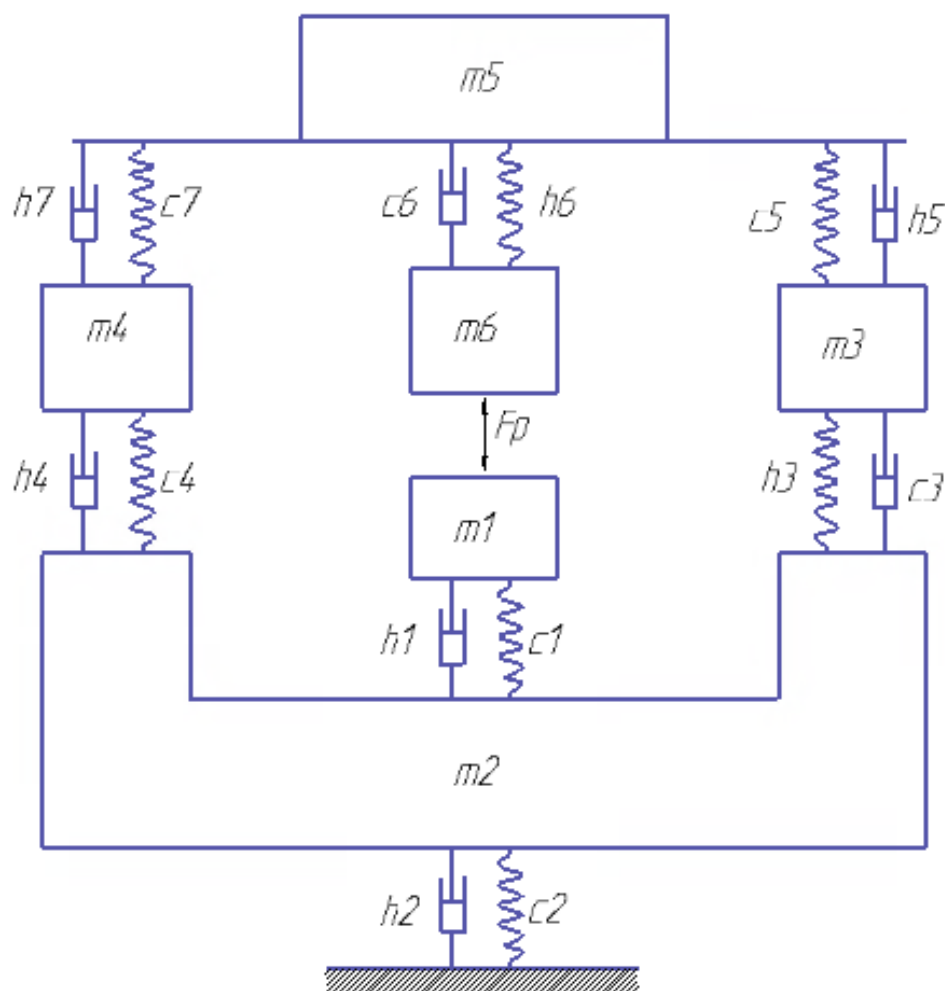


Рисунок 9 – Расчетная схема

Данная система состоит из шести массы:  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ ,  $m_5$  и  $m_6$ .

В данном вибрационной системе, которая описывает гидроабразивную установку, масса  $m_1$  является заготовкой, масса  $m_2$  является основанием и  $m_6$

это режущая головка. m5 портальная система перемещения направляющие (балка). m3 и m4 являются стойками.

### 3.1.1.2 Анализ параметров

Распишем параметры элементов, входящих в состав структурной схемы. Масса m1 заготовка, которая ложится на установочной решетке с жесткостью C1 и коэффициентом демпфирования h1. Так как заготовки при обработке разные массы имеют, в данном случае принимаем среднюю массу 500 кг. Жесткости решеток экспериментальным путем была определена, и она равна 1000000 Н/м. Коэффициент демпфирования равен 1 Н\*с/м.

Масса m2 является основанием установки гидроабразивной резки. Основание имеет сложную конструкцию, но массу ее принимают 60% от массы установки. Масса m2 – 12 000 кг. Основание стоит на 8 опор с жесткостью C2.

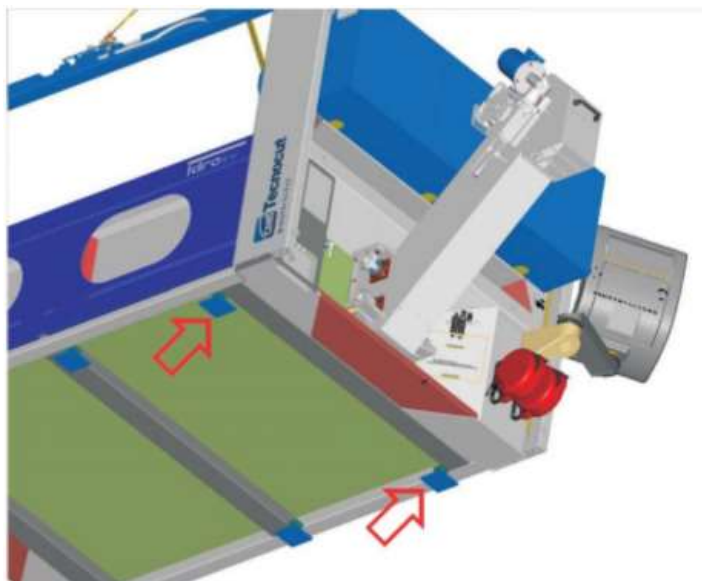


Рисунок 10 – Положение винтовых опор в конструкции гидроабразивной резки

Приближенное значение жесткости опор винта:

$$j_0 = e d_0 \text{ (Н/мкм)} \quad (1)$$

$$j_0 = 5 * 20 = 100 \frac{\text{Н}}{\text{мкм}} = 100 * 10^6 \text{ Н/м.}$$

где, e=5;10;30 соответственно для радиально упорных, шариковых и роликовых упорных подшипников; d<sub>0</sub>– диаметр винта, мм [14].

Так как у нас 8 опор тогда  $C_2$  будет равна:

$$C_2 = n * j_0 = 800\ 00000\ \text{Н/м}$$

Декремент затухания величина расчётная и рассчитывается по графику затухающих колебаний. Для колебательных систем с вязким трением (сила сопротивления пропорциональна скорости движения) физической величиной, определяющей характер колебаний, является коэффициент демпфирования.

$$h = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (2)$$

где,  $c$  – коэффициент силы сопротивления движению;

$k$  – коэффициент упругости;

$m$  – масса подвижного груза.

При коэффициенте демпфирования меньшем единицы колебательная система будет плавно затухать. Чем меньше будет коэффициент, тем дольше будут длиться колебания. При коэффициенте равном единице или большем никаких колебаний система испытывать не будет, а просто плавно будет стремиться к нулевому положению. Так, например, дверные доводчики настраивают на коэффициент демпфирования 1 и более, чтобы дверь автоматически закрылась через некоторое время без удара о створку. Демпферы для входных дверей в метро наоборот настроены на коэффициент демпфирования меньше 1. После того как человек толкнёт такую дверь она сделает два три колебания и остановится [5]. Таким образом,  $h_1$  будет равен 1 Н\*с/м.

Масса  $m_6$  включает в себе режущую головку. Режущая головка в свою очередь состоит из заправочной емкости и система подачи и смешивания воды с абразивом, сопло, шланги для транспортировки воды и абразив. Массу  $m_3$  принимаем в данном случае 50 кг.

Между массой  $m_6$  и  $m_1$  находится зона обработки, где происходит обработка материалов. Тут возникает сила резания или сила резки, которая является внешним воздействием в данной вибрационной системе.

Сила резания при гидроабразивной обработки рассматривается как сила воздействия гидромониторной струи на вертикальную преграду [21], которая



рассчитывается по формуле (6).

В процессе гидроабразивной обработки водяные струи оказывают гидродинамическое воздействие на обрабатываемые поверхности. Ударная сила струи, истекающей из сопла, теоретически равна:

$$F_t = m \cdot v = \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (3)$$

где  $F_t$  – сила удара струи в заготовку, Н;

$m$  – секундный расход воды, кг/с;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь поперечного сечения струи, м<sup>2</sup>;

$v$  – скорость вылета струи из сопла, м/с.

На достаточно близких расстояниях от сопла, где влияние трения струи о воздух и рассеивание воды в окружающую среду не столь заметны, сила воздействия струи на поверхности заготовки будет приблизительно равна теоретической величине, определяемой по уравнению (6). С дальнейшим увеличением расстояния между соплом и преградой сила воздействия струи постепенно уменьшается. Так как при гидроабразивной обработке расстояние от сопла до заготовки небольшая применяем данную формулы для расчёта силы резания.

Средняя скорость вылета струи  $V$  – средняя скорость набегания потока на тело по следующей формуле:

$$V = \frac{G_{ж}}{S} \quad (4)$$

где,  $G_{ж}$  – расход жидкости.

Расход жидкости находим по следующей формуле:

$$G_{ж} = G_{в} + G_{а} \quad (5)$$

где,  $G_{в}$  – расход воды;

$G_{а}$  – расход абразива.

$$G_{в} = 5 \frac{\text{л}}{\text{мин}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$$

Расход абразива равна 400 г/мин. Для того чтобы перевести в объемный расход нужно поделить на величину плотности абразива (таблица 1):

$$G_a = 400 \frac{\Gamma}{\text{мин} \cdot 2,4 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}} = 166,667 \frac{\text{см}^3}{\text{мин}} = 0,166667 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$$

Расход жидкости будет равна:

$$\begin{aligned} G_{\text{ж}} &= 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{мин}} + 0,166667 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{мин}} = 5,166667 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{мин}} \\ &= 0,0861110^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \end{aligned}$$

$S$  – площадь миделева сечения (площадь проекции тела на плоскость, нормальную к вектору скорости воды)

$$S = \pi \cdot R^2 \quad (6)$$

где,  $R$  радиус сопла.

$$S = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot (0,51 \cdot 10^{-3})^2 = 3,14 \cdot 0,260110^{-6} \text{м}^2 = 0,816714 \cdot 10^{-6} \text{м}^2$$

Таким образом, средняя скорость вылета струи  $\vartheta$  будет равна:

$$\vartheta = \frac{0,08611 \cdot 10^{-3}}{0,816714 \cdot 10^{-6}} = 105,4347 \text{ м/с}$$

В данной работе в качестве абразива принимается гранатовый песок марки MESH 80. Общие характеристики гранатового песка приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Общие характеристики гранатового песка

Характеристики	Значение
Твердость по Моосу	8 Moh's
Хлориды	<50 ppm
Свободные металлы	< 0.01 %
РН	> 7
Электропроводность	< 150 $\mu\text{S/cm}$
Объемная плотность	2.4 г/см <sup>3</sup>
Удельная масса	4.10 г/см <sup>3</sup>
Температура плавления	1260 °C
Моназитовый эквивалент (Limit 0,25 %)	< 0,08 %
Форма зерна	угловатокруглый
Размер зерна в среднем	80Mesh = 160micron = 0,16мм

Плотность жидкости равна:

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{m_{\text{в}} + m_{\text{а}}}{V_{\text{в}} + V_{\text{а}}} = \frac{m_{\text{в}} + m_{\text{а}}}{\frac{m_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{а}}}{\rho_{\text{а}}}} \quad (7)$$

где,  $m_B$  – масса воды,  $m_a$  – масса абразива,  $\rho_B$  – плотность воды,  $\rho_a$  – плотность абразива.

$$\rho_{ж} = \frac{m_B + m_a}{V_B + V_a} = \frac{m_B + m_a}{\frac{m_B}{\rho_B} + \frac{m_a}{\rho_a}} = \frac{5\text{кг} + 0,4\text{кг}}{\frac{5\text{кг}}{1000\text{кг/м}^3} + \frac{0,4\text{кг}}{2400\text{кг/м}^3}} = 1045,16 \text{ кг/м}^3$$

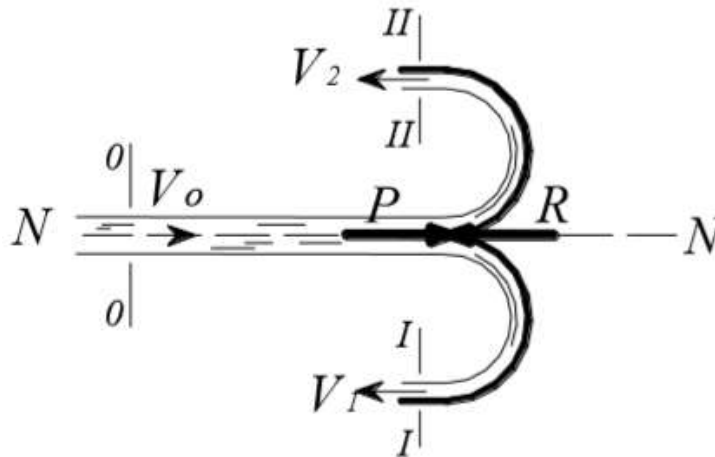


Рисунок 11 – Силы давление струи на криволинейную симметричную преграду

По данной схеме, когда струи направлено прямо на поверхности заготовки (рис.9) то сила давления  $P$  достигает максимума. Если струя будет направлена под каким-то углом, то в формуле вместо двойки будет соответствующий коэффициент [22]. Данный коэффициент зависит от синуса угла наклона струи.

Таким образом, сила удара струи в заготовку будет равна:

$$F_t = 2 \cdot m \cdot v = 2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 = 2 \cdot 1045,16 \cdot 0,816714 \cdot 10^{-6} \cdot (105,4347)^2 = 18,9779 \text{ Н}$$

Для определения силы резания в процессе гидроабразивной резки нужно учитывать два момента: момент вырезания в заготовку струи и момент устойчивого резания заготовки струи. В расчётах при теоретическом исследовании применены силы резания в момент вырезания в заготовку струи как показано на рис.11. Поэтому сила резания в двух случаях отличается. В случае устойчивого резания величина сила резания будет уменьшаться. Она будет зависит прежде всего от от физико-механических свойств обрабатываемого материала, колебания давления струи, равномерность подача абразива, равномерность подача сопла, форма зерна, ламинарное или турбулентный режим течение воды, трения

воды и абразива к стенке фокусирующая сопла и много других факторов. Закон изменения силы резания в процессе обработки (рис.33) необходимо определить экспериментальным путем.

Чтобы определить реакцию силу резания на режущую головку необходимо рассчитать коэффициент снижения осевого давления гидроструи на расстояние  $l$ :

$$\psi = \frac{P}{P_m} = \frac{P}{1,2986 \cdot P} = 0,77 \quad (8)$$

где,  $P_m$  – осевое динамическое давление:

Осевое динамическое давление находится по следующей формуле:

$$P_m = P \cdot \left(\frac{i_n}{l}\right)^k = P \cdot \left(\frac{2,04}{1,5}\right)^{0,85} = 1,2986P \quad (9)$$

где  $i_n$  – длина начального участка струи, м;  $d$  – диаметр сопла, м;  $Re$  – число Рейнольдса для потока воды на вылете из сопла;  $A, B$  – безразмерные эмпирические коэффициенты;  $k$  – показатель степени, характеризующий интенсивность процесса распада струи;  $l$  – расстояние от сопла до заготовки.

Длина начального участка струи:

$$i_n = d \cdot (A - B \cdot Re) \quad (10)$$

Длина начального участка водяной струи зависит от многих факторов, среди которых наиболее важные – исходные параметры самой струи (давление воды и диаметр сопла), а также конструктивные особенности технологического оборудования, геометрия сопла и чистота обработки его внутренней поверхности. В большинстве работ, посвященных изучению зависимости длины начального участка, струи от исходных параметров, приводятся различные аналитические зависимости, в которых влияние исходных параметров струи на безразмерную длину начального участка  $l_n/d_0$  выражается при помощи числа Рейнольдса  $Re$ . Эти зависимости имеют одно общее свойство: выраженная в них функциональная связь  $l_n/d_0 = f(Re)$  отражает постепенное уменьшение безразмерной длины начального участка с увеличением числа  $Re$  в пределах  $(1,0 \dots 3,0) \cdot 10^6$ .

Коэффициенты А и В имеют определенный физический смысл. Коэффициент А отражает только степень влияния конструктивных особенностей сопла (зависит от геометрии сопла и чистоты обработки его внутренней поверхности), а коэффициент В – только степень влияния конструктивных особенностей проточного канала гидромонитора. Коэффициент А изменяется в пределах от 62,0 до 162,0, коэффициент В – от  $12,0 \cdot 10^{-6}$  до  $25,0 \cdot 10^{-6}$  при этом каждому типу гидромонитора соответствует определенное значение коэффициента В.

Выбирая коэффициенты рассчитываем длина начального участка струи:

$$i_n = 1,02 \cdot (62 - 20 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^6) = 2,04 \text{ мм}$$

Величина показателя степени  $k$  зависит от уровня турбулизации потока воды в каналах технологического оборудования, от условий формирования струи и ее исходных параметров. Чем выше значение  $k$ , тем хуже компактность струи. В результате испытаний промышленных низконапорных гидромониторов установлено, что  $k$  изменяется в пределах 0,5...0,85, при этом  $k = 0,85$  характерно для гидромониторов, конструкция проточной части которых вызывает повышенную турбулизацию потока воды. Поскольку проточная часть технологического оборудования имеет достаточно сложную геометрию каналов, несколько поворотов под углом  $90^\circ$ , что способствует турбулизации потока, величины осевого динамического давления струй моечных машинок есть все основания рекомендовать показатель степени  $k = 0,85$ .

Таким образом, реакция сила резания на режущую головку в данном случае теоретический будет равна:

$$N = 0,77F_t$$

Режущая головка с массой  $m_3$  соединена с массой  $m_5$  – направляющий с передачей винт-гайки. Длина винта составляет 0,3 м, диаметр 20 мм.



Рисунок 12 – Шарико-винтовой передачи (ШВП)

Жесткость является индикатором надежности и прочности системы. Жесткости ШВП лимитируется жесткостью пара винт-гайка, дорожек качения с шариками и самого винта. В случае, когда ШВП уже установлена, то к этому списку добавляется ещё жесткость подшипниковых опор, способ крепления гайки ШВП к рабочему столу и прочее значение жесткости всех иных контактирующих элементов. Из проводимых ранее испытания стало понятно, что жёсткость дорожек качения и шариков могут быть объединены в общую характеризующую гайку жесткость. Это значение проведена в таблицах как основная характеристика гаек. Согласно диаграмме [26], которая приведена в каталогах шарико-винтовых передач суммарная жёсткость передачи в данном случае будет равна  $200 \cdot 106$  Н/м.

Определяем коэффициент демпфирование по следующей формуле:

$$h = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (11)$$

где,  $c$  – коэффициент силы сопротивления движению;

$k$  – коэффициент упругости;

$m$  – масса подвижного груза.

Рассмотрим передачи винт-гайки в виде спирали, которая сделана из проволоки с сечением круг. Если рассматривать деформацию пружины как совокупность элементарных сдвигов в ее объеме под воздействие сил упругости, то коэффициент упругости можно вычислить при помощи формулы:

$$k = \frac{r^4 \cdot G}{4 \cdot R^3 \cdot n} \quad (12)$$

где  $R$  – радиус пружины,  $n$  – количество витков в пружине,  $r$  – радиус проволоки,  $G$  – модуль сдвига (постоянная, которая зависит от материала).

$$k = \frac{(0,01)^4 * 8,1 * 10^4}{4 * (0,02)^3 * 1000} = 2,53 \text{ Н/м}$$

$$h_6 = \frac{0,25}{2\sqrt{50 * 2,53}} = 0,0111 \text{ Н * с/м};$$

Масса  $m_5$  является направляющей на котором установлена режущая головка. Масса  $m_5$  включает в себе массу балки и кожух для защиты. Масса  $m_5$  в данном случае равна 500 кг.

Массы  $m_3$  и  $m_4$  являются стойками на котором установлена направляющая. А стойки в свою очередь установлены на основании. Стойка с массой  $m_3$  с правой части установки имеет массу 200 кг.

Стойка с массой  $m_4$  с левой части установки имеет массу 200 кг. На этой части установки также установлена часть гидравлики станка. Гидравлическая часть станка – это часть который при моделировании не учитывается, так как её влияние на точность обработки минимальная. Гидравлическая часть станка включает в себе насос, способный прокачивать жидкость от резервуара до зоны резки под высоким давлением и трубы для подачи воды. Также на этой части станка установлена блок управления, который мы не учитываем при моделировании. Блок автоматического управления для координации движения рабочего стола и водяного резака, способный контролировать и задавать рабочие параметры.

Стойки с массой  $m_3$  и  $m_4$  соединены с направляющей (балка). Направляющей имеет жесткости  $C_5=C_7=1217,79 \text{ Н/м}$ . Стойки также лежат на каретках, которые установлены на основание. Суммарная жесткость каретки согласно источникам [26] составляет  $C_3=C_4=100000000 \text{ Н/м}$ . Коэффициенты демпфирования соответственно будут равны:  $h_5=h_7=0,4 \text{ Н * с/м}$ ;  $h_4=h_3=0,2 \text{ Н * с/м}$ .

### 3.1.2 Составление системы уравнений

Для массы  $m_1$  который является в данной системе заготовкой, сила резания действует как внешние воздействия. Остальные силы: силы упругости установочной решетки с жесткостью  $C_1$ , силы демпфирования и силы инерции тел  $m_1$  будут как обратной связью, направлены в противоположные внешние силы. Величина силы  $F_{c1}$  будет равна произведению коэффициент жесткости  $C_1$  и разность между перемещением тел  $m_1$  и тел  $m_2$ , так как решетка с жесткостью  $C_1$  находится между этими телами.

Расставим силы, действующие на системы.

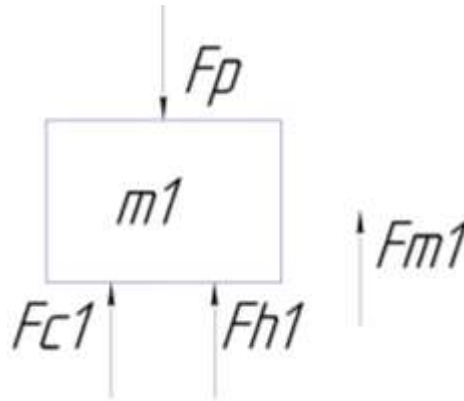


Рисунок 13 – Схема расстановки сил на первое тело  
Составляем баланс сил первого тела:

$$F_p = F_{c1} + F_{m1} + F_{h1} \quad (13)$$

$$h_1 \cdot (V_1 - V_2) + c_1 \cdot (X_1 - X_2) + m_1 \cdot a_1 = F_p \quad (14)$$

На основании с массой  $m_2$  будут воздействовать как внешние силы  $F_{c1}$ ,  $F_{h1}$ ,  $F_{c3}$ ,  $F_{h3}$ ,  $F_{c4}$  и  $F_{h4}$ . Эти силы заставляют тело с массой  $m_2$  двигаться. Второе тело начинает двигаться и сопротивление для тела будут силы инерции  $F_{m2}$  силы упругости опорного винта  $F_{c2}$  и силы демпфирования опорного винта  $F_{h2}$ . Величина силы упругости опорного винта будет равна произведению коэффициентом жесткости  $C_2$  и перемещением второго тела. Именно поэтому сила демпфирования  $F_{h1}$  будет равна произведением коэффициента демпфирования и скоростью второго тела.



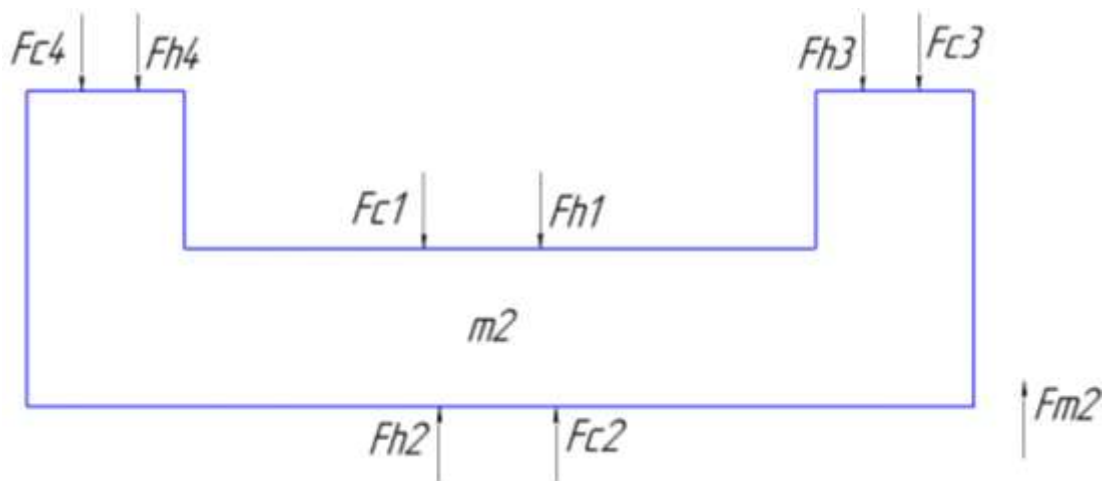


Рисунок 14 – Схема расстановки сил на второе тело

Составляем баланс сил второго тела:

$$F_{h1} + F_{c1} + F_{c5} + F_{h5} + F_{c7} + F_{h7} = F_{c2} + F_{h2} + F_{m2} \quad (15)$$

$$h_1 \cdot (V_1 - V_2) + c_1 \cdot (X_1 - X_2) + c_3 \cdot (X_3 - X_2) + h_3 \cdot (V_3 - V_2) + c_4 \cdot (X_4 - X_2) + h_4 \cdot (V_4 - V_2) = \\ = h_2 \cdot V_2 + c_2 \cdot X_2 + m_2 \cdot a_2 \quad (16)$$

Для массы  $m_3$  внешнее воздействие будут силы дефилирование  $F_{h5}$  и силы упругости, направляющей  $F_{c5}$ . Именно эти силы заставляют третью телу двигаться. А сила сопротивления для массы  $m_3$  будет силы инерции  $F_{m3}$ , силы упругости кареток  $F_{c3}$  и силы дефилирование  $F_{h3}$ . Величина силы упругости кареток  $F_{c3}$  будет равна произведению коэффициентом жесткости  $C_3$  и разность между перемещением тело  $m_3$  и  $m_2$ , так как каретки находится между этими телами. Силы демпфирования будет равна умножению разности скоростей тела  $m_3$  и  $m_2$  на коэффициент демпфирования  $h_3$ . Силы инерции равны произведению масса тело и ускорению.

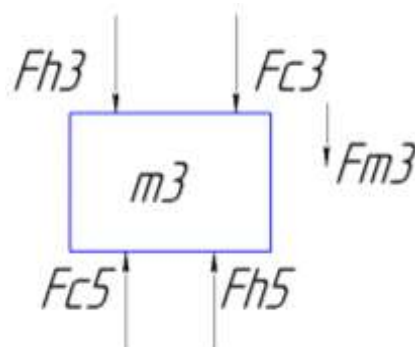


Рисунок 15 – Схема расстановки сил на третьего тело  
Составляем баланс сил для третьего тела:

$$F_{h5} + F_{c5} = F_{c3} + F_{h3} + F_{m3} \quad (17)$$

$$c_5 \cdot (X_5 - X_3) + h_5 \cdot (V_5 - V_3) = c_3 \cdot (X_3 - X_2) + h_3 \cdot (V_3 - V_2) + m_3 \cdot a_3 \quad (18)$$

Для массы  $m_4$  внешнее воздействие будут силы дефилирование  $F_{h7}$  и силы упругости пружины  $F_{c7}$ . Именно эти силы заставляют шестую телу двигаться. А сила сопротивления для массы  $m_4$  будет только силы инерции  $F_{m4}$ , силы упругости кареток  $F_{c4}$  и силы дефилирование  $F_{h4}$ . Величина силы упругости кареток  $F_{c4}$  будет равна произведению коэффициентом жесткости  $C_4$  и разность между перемещением тело  $m_4$  и  $m_2$ , так как каретки находится между этими телами. Силы демпфирования будет равна умножению разности скоростей тела  $m_4$  и  $m_2$  на коэффициент демпфирования  $h_4$ . Силы инерции равны произведению масса тело и ускорению.

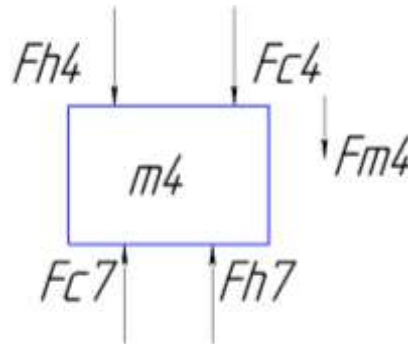


Рисунок 16 – Схема расстановки сил на четвертого тело  
Составляем баланс сил для четвертого тела:

$$F_{h7} + F_{c7} = F_{c4} + F_{h4} + F_{m4} \quad (19)$$

$$c_7 \cdot (X_5 - X_4) + h_7 \cdot (V_5 - V_4) = c_4 \cdot (X_4 - X_2) + h_4 \cdot (V_4 - V_2) + m_4 \cdot a_4 \quad (20)$$

Для массы  $m_5$  внешнее воздействие будут силы дефилирование  $F_{h6}$  и силы упругости передачи винт-гайки  $F_{c6}$ . Именно эти силы заставляют направляющего двигаться. А сила сопротивления для массы  $m_5$  будет силы инерции  $F_{m5}$ , силы упругости, направляющей  $F_{c5}$  и  $F_{c7}$ , также силы демпфирования  $F_{h5}$  и  $F_{h7}$ . Силы инерции равны произведению масса тело и ускорению.

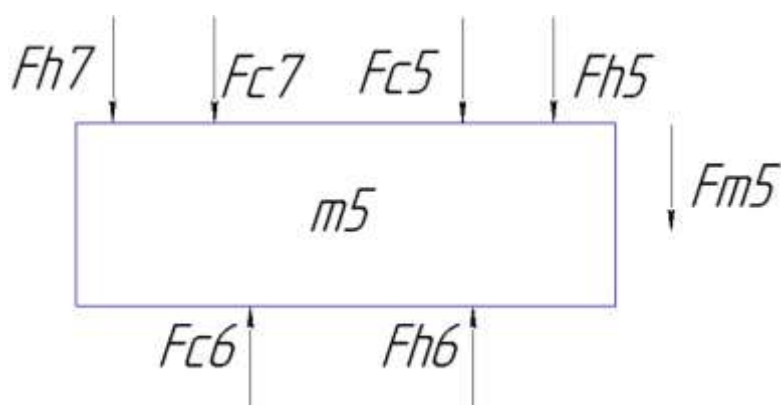


Рисунок 17 – Схема расстановки сил на пятого тело  
Составляем баланс сил для пятого тела:

$$F_{c6} + F_{h6} = F_{c5} + F_{h5} + F_{c7} + F_{h7} + F_{m5} \quad (21)$$

$$c_6 \cdot (X_6 - X_5) + h_6 \cdot (V_6 - V_5) = c_5 \cdot (X_5 - X_3) + h_5 \cdot (V_5 - V_3) + c_7 \cdot (X_5 - X_4) + h_7 \cdot (V_5 - V_4) + m_5 \cdot a_5 \quad (22)$$

Шестую телу, который является режущей головкой заставляет двигаться сила резания  $F_p$ . Обратной связью, то есть силы сопротивления для данного тела будут являться силы инерции  $F_{m6}$ , силы упругости передачи винт-гайки  $F_{c6}$ , силы демпфирования  $F_{h6}$ . Величина силы упругости передачи винт-гайки  $F_{c6}$  будет равна произведению коэффициентом жесткости  $C_6$  и разность между перемещением тело  $m_6$  и  $m_5$ , так как передача винт-гайки находится между этими телами. Силы демпфирования будет равна умножению разности скоростей тела  $m_6$  и  $m_5$  на коэффициент демпфирования  $h_6$ .

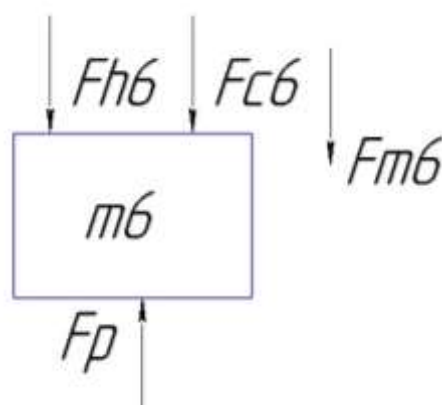


Рисунок 18 – Схема расстановки сил на шестого тело  
Составляем баланс сил для шестого тела:

$$F_p = F_{c6} + F_{h6} + F_{m6} \quad (23)$$

$$F_p = c_6 \cdot (X_6 - X_5) + h_6 \cdot (V_6 - V_5) + m_6 \cdot a_6 \quad (24)$$

Составляем систему уравнений:

$$a_1 = \frac{F_p - c_1 \cdot (X_1 - X_2) - h_1 \cdot (V_1 - V_2)}{m_1};$$

$$a_2 = \frac{h_1 \cdot (V_1 - V_2) + c_1 \cdot (X_1 - X_2) + c_2 \cdot (X_3 - X_2) + h_3 \cdot (V_3 - V_2) + c_4 \cdot (X_4 - X_2) + h_4 \cdot (V_4 - V_2) - h_2 \cdot V_2 - c_2 \cdot X_2}{m_2};$$

$$a_3 = \frac{c_5 \cdot (X_5 - X_3) + h_5 \cdot (V_5 - V_3) - c_3 \cdot (X_3 - X_2) - h_3 \cdot (V_3 - V_2)}{m_3};$$

$$a_4 = \frac{c_7 \cdot (X_5 - X_4) + h_7 \cdot (V_5 - V_4) - c_4 \cdot (X_4 - X_2) - h_4 \cdot (V_4 - V_2)}{m_4};$$

$$a_5 = \frac{c_6 \cdot (X_6 - X_5) + h_6 \cdot (V_6 - V_5) - c_5 \cdot (X_5 - X_3) - h_5 \cdot (V_5 - V_3) - c_7 \cdot (X_5 - X_4) - h_7 \cdot (V_5 - V_4)}{m_5};$$

$$a_6 = \frac{F_p - c_6 \cdot (X_6 - X_5) - h_6 \cdot (V_6 - V_5)}{m_6}.$$

По формуле угловой скорости находим собственную частоту каждого тела:

$$w = 2\pi \cdot f_w \quad (25)$$

Отсюда находим  $f_w$ :

$$f_{w1} = \frac{1}{2\pi} \cdot w_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c_1}{m_1}};$$

$$f_{w2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c_2 + c_1 + c_4 + c_3}{m_2}};$$

$$f_{w3} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c_5 + c_3}{m_3}};$$

$$f_{w4} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c_7 + c_4}{m_4}};$$

$$f_{w5} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c_7 + c_5 + c_6}{m_5}};$$

$$f_{w6} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c_6}{m_6}}.$$

### 3.1.3 Составление структурной схемы

Данная система состоит из шестерых массы:  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ ,  $m_5$  и  $m_6$ .

Для данной системы внешняя нагрузка является слой резания или силой резки. Сила резания в данном случае рассматривается как гидродинамическая воздействия воды на поверхности тело. Отдача от силы резания также действует на тело с массой  $m_3$  – режущая головка. Но процент отдачи сложно определить, поэтому для упрощения расчетов процент отдачи взяли 100%. Силы сопротивления для заготовки сил упругости  $F_{c1}$  и трения  $F_{h1}$ . Структурная схема гидроабразивной установки приведены в приложение Г.

В данной системе масса  $m_2$  – основание является самой большой. Внешнее воздействие для массы  $m_2$  являются: силы упругости установочной решетке  $F_{c2}$  и силы демпфирования  $F_{h1}$ , силы упругости каретки силы  $F_{c6}$ , силы демпфирования  $F_{h6}$ , силы упругости каретки  $F_{c5}$  и силы дефилирование  $F_{h5}$ . Все эти силы пытаются заставить основани. колебаться. В данном случае обратной связью являются силы упругости опорных винтов  $F_{c2}$  и силы демпфирование  $F_{h2}$ .

Для режущей головкой с массой  $m_3$  внешние воздействия являются силу резания  $F_r$ . Обратной связью является сила упругости передача винт-гайка  $F_{c3}$  и силы демпфирование  $F_{h3}$ .

Для массы  $m_4$  которая является направляющие, внешние воздействия считается силы упругости передачи винт-гайка  $F_{c3}$  и силы демпфирование  $F_{h3}$ , а обратной связью в данном случае являются силы упругости направляющие  $F_{c7}$  и силы демпфирование  $F_{h7}$ , также силы упругости направляющие  $F_{c4}$  и силы демпфирование  $F_{h4}$ .

Для массы  $m_5$  которая являются стойкой, внешнее воздействие в данном случае являются сила упругости направляющие  $F_{c4}$  и силы демпфирование  $F_{h4}$ , а обратной связью является силы упругости каретки и силы демпфирование  $F_{h5}$ .

Масса  $m_6$  также является стойкой. В данном случае внешнее воздействие

это силы упругости  $F_{c7}$  и силы трения  $F_{h7}$  обратной связью является сила упругости каретки 6 и силы трения  $F_{h6}$ .

В каждом случае результирующая сила является силы инерции. Результат делим на массу  $m$  и определяем ускорение  $a$ , дальше снова дважды интегрируем и находим скорость  $V$  и перемещение  $X$ .

С помощью программного обеспечения Simulink составили графическую модель динамики двухмассовой вибрационной системы. И исследовали динамические характеристики. Модель приведена в приложение В.

### 3.1.4 Оптимизация параметров

Решение системы дифференциальных уравнений в среде MatLab.

Выбираем параметров:

$$m_1=500 \text{ кг};$$

$$m_2=1200 \text{ кг};$$

$$m_3=200 \text{ кг};$$

$$m_4=200 \text{ кг};$$

$$m_5=500 \text{ кг};$$

$$m_6=50 \text{ кг};$$

$$C_1=1000000 \text{ Н/м};$$

$$C_2=80000000 \text{ Н/м};$$

$$C_3=100000000 \text{ Н/м};$$

$$C_4=100000000 \text{ Н/м};$$

$$C_5=1217,79 \text{ Н/м};$$

$$C_6=200000000 \text{ Н/м};$$

$$C_7=1217,79 \text{ Н/м};$$

$$h_1=1 \text{ Н*с/м};$$

$$h_2=1 \text{ Н*с/м};$$

$$h_3=0,2 \text{ Н*с/м};$$

$$h_4=0,2 \text{ Н*с/м};$$

$$h_5=0,4 \text{ Н*с/м};$$

$$h_7=0,4 \text{ Н*с/м};$$

$$h_6=0,0111 \text{ Н*с/м};$$

$$F_p=18,9779 \text{ Н};$$

$$k=0,77.$$

Задаем системы дифференциальные уравнения в среде MatLab как показано в приложение А. Решаем данные уравнения в среде MatLab с помощью составленной программы в среде Matlab.

Собственные частоты будут равны:  $f_{sob1} = 22,2817$ ;  $f_{sob2} = 78,2130$ ;  $f_{sob3} = 112,5409$ ;  $f_{sob4} = 112,5409$ ;  $f_{sob5} = 159,1569$ ;  $f_{sob6} = 0.5554$ .

В данной вибрационной системе рассматривается колебания и скорости перемещения заготовки  $m_1$  и режущие головки  $m_6$ . Так как именно эти параметры влияют на точность и качество обработки. Исходя из разработанной математической модели и полученные графики можно отметить, что на колебания заготовки с массой  $m_1$  влияет жесткости установочные платформе  $C_1$ . А на амплитуды и скорости перемещения режущие головки оказывает влияние жесткости передачи винт-гайка  $C_6$ . Но с другой стороны в данной вибрационной системе большое влияние оказывает жесткости, направляющие  $C_5$  и  $C_7$ . Данные параметры влияют на поведение систему в целом. Проведенный анализ параметров системы, которые влияют на амплитуды колебания заготовки и режущей головки приведен в таблице 1.

Таблица 5 – Оптимизация параметров

	$C5=C7=1217,79 \text{ Н/м}$	$C5=C7=1,3*1217,79 \text{ Н/м}$	$C5=C7=1,5*1217,79 \text{ Н/м}$
$C_6=2 \cdot 10^7 \text{ Н/м};$			
$C_6=2 \cdot 10^6 \text{ Н/м};$			
$C_1=2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$			



По составленным графическим модели (приложение В) системы и заданные параметры, которые были выбраны как оптимальные, получим графиков перемещение и скорость первого и шестого тела.

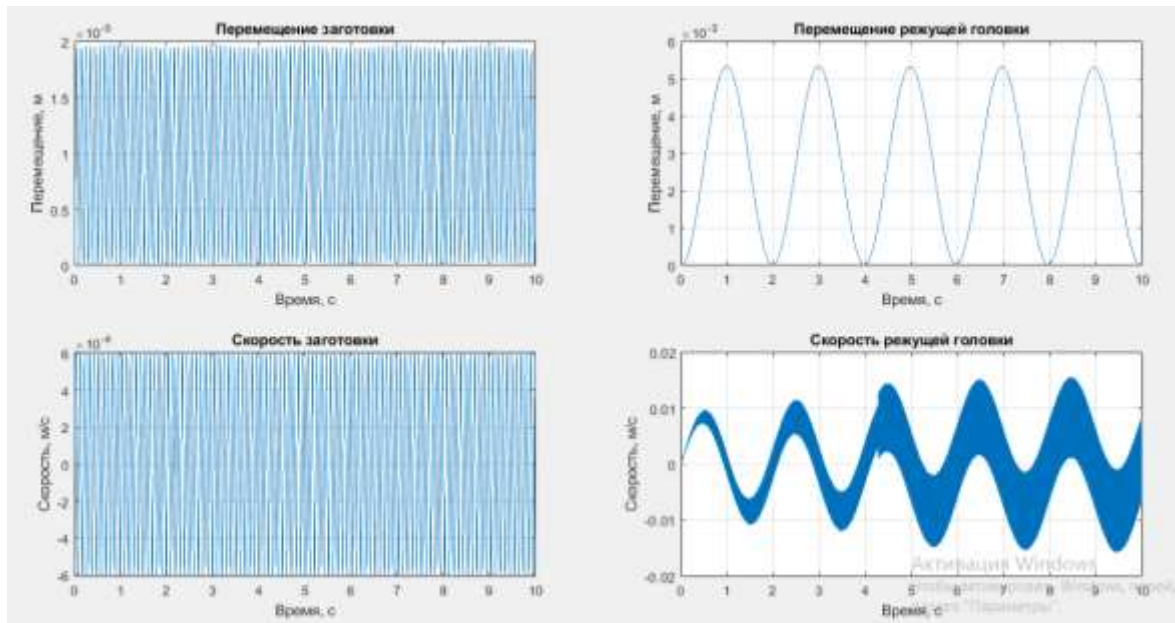


Рисунок 19 – Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при оптимальных вариантах параметров

### 3.1.5 Амплитудно-фазовые частотные характеристики системы

Для определения амплитудно-фазовые частотные характеристики системы необходимо найти передаточную функцию, которая равна:

$$W(p) = \frac{\text{вых.}}{\text{вход.}} = \frac{Fp}{X_1} \quad (26)$$

$$W(p) = \frac{\text{вых.}}{\text{вход.}} = \frac{Fp}{X_6} \quad (27)$$

В данной системе передаточная функция выражается двумя уравнениями. Это связано с тем, что сила резания как внешнее воздействие оказывает свое влияние сразу на заготовку с массой  $m_1$  и на режущую головку с массой  $m_6$ . Исходя из этого с помощью программного обеспечения Simulink определены динамические и частотные характеристики систем автоматического управления в среде Simulink запуская команды Bode Plot, Linear Step Response Plot и Gain and Phase

## Margin Plot.

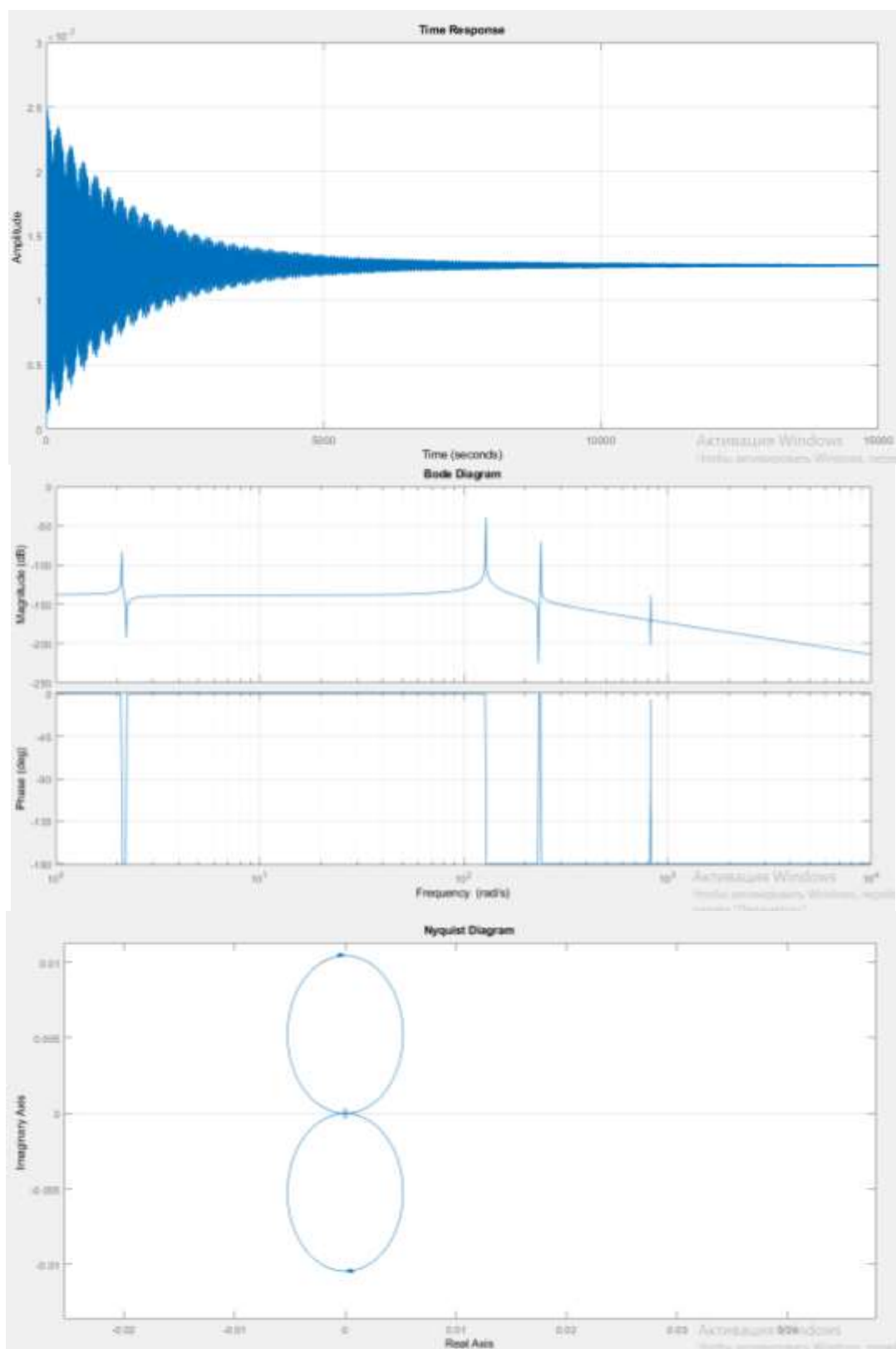


Рисунок 26 – Амплитудно-частотные характеристики системы для выхода X1

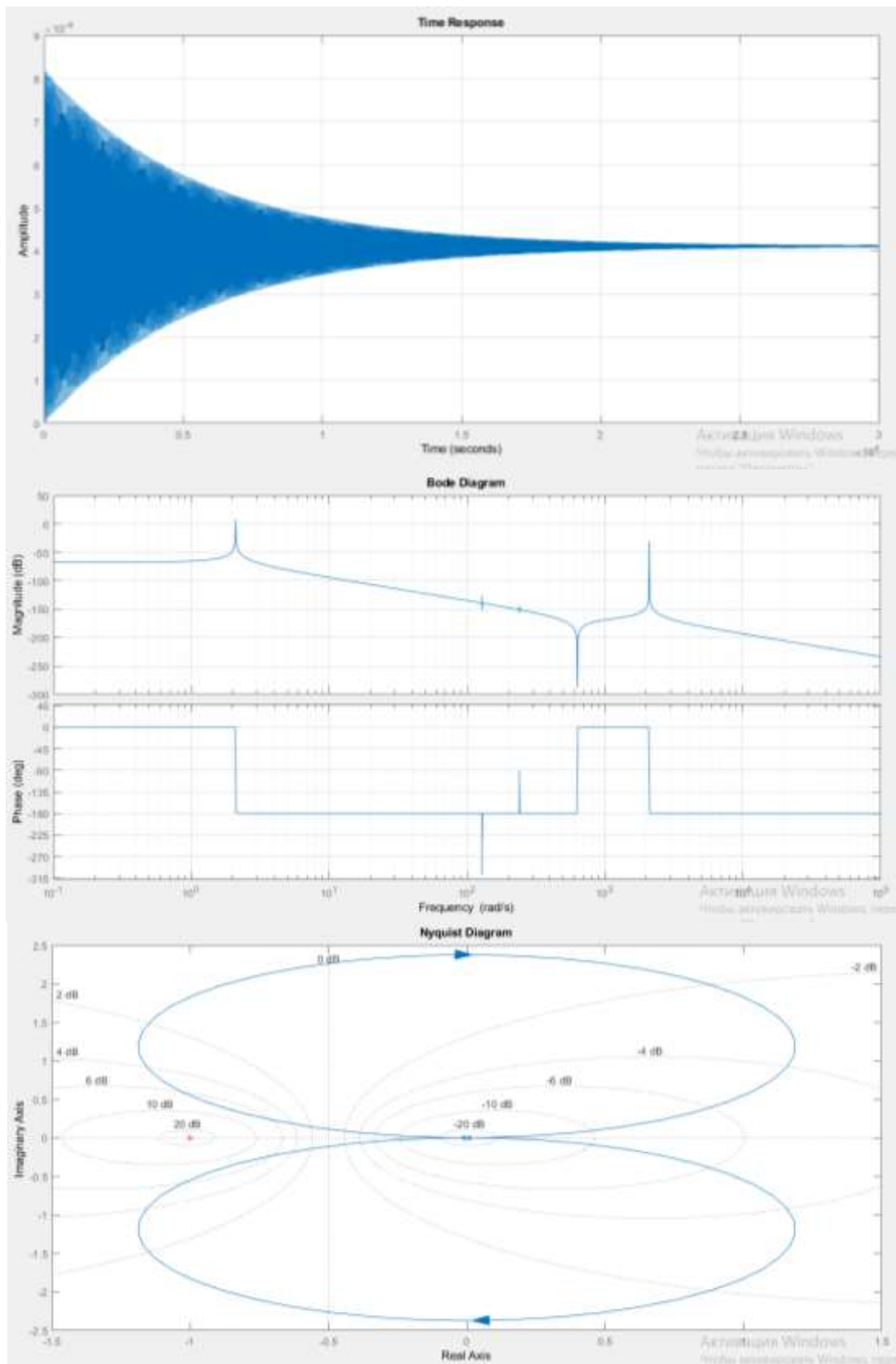


Рисунок 27 – Амплитудно-частотные характеристики системы для выхода X6  
 Данные характеристики показывают устойчивости данной системы. Таким образом можно отметить что при выбранным параметрами как оптимальные вибрационная система гидроабразивный установки устойчивая.

### 3.2. Исследование точности и качество изготовления детали «Подвес» при гидроабразивной обработке из нержавеющей стали

При изготовлении технических систем и конструкций применяются различные конструкционные материалы, выбор которых зависит от их назначения. Одним из широко распространенных конструкционных материалов, применяемых в различных областях промышленности является нержавеющая сталь различных марок. Она характеризуется особой устойчивостью к коррозии, стабильностью прочности и стойкости при высокой температуре, давлении и воздействии агрессивных сред. Однако, данный конструкционный материал является труднообрабатываемым. При обработке резанием нержавеющая сталь сначала упруго деформируется, потом обрабатывается легко, после чего переходит в стадию упрочнения. На этой стадии резание возможно только при значительном увеличении усилий. Все эти стадии проходит во время обработки и обычная сталь, но высоколегированная упрочняется намного заметнее [18]. Экономически целесообразно выполнять изготовления деталей из нержавеющей стали с применением технологии гидроабразивной резки (ГАР). Однако, при ГАР не всегда возможно получить требуемую точность и качество поверхностей детали. В связи с вышеизложенным, повышение производительности и точности гидроабразивных установок является актуальной задачей.

ГАР – лучший способ резки нержавеющей металла любых марок. С применением технологии гидроабразивной резки возможно производить разные технологические операции с нержавеющей сталью:

- резка листового металла;
- резка и перфорация профилей ;
- перфорирование листового металла различных толщин;
- нарезка заготовок различных толщин и конфигураций.

Основой способа гидроабразивной резки является высокоскоростное воздействие потока смеси воды и абразивного песка. При ГАР нержавеющая сталь не нагревается, не деформируется и не образует окалины в зоне обработки как при

лазерной резке.

В качестве объекта исследования выбрана деталь «Подвес», входящая в состав каретки перемещения шторки трекового детектора LHCb большого андройдного колл айдера.

На гидроабразивном станке из сплошного листа обрабатываются наружные контура детали, затем три внутренних отверстия. Чертеж детали представлен на рис.2.

Установочная платформа установки ГАР были разделены на 8 зоны резания (рис.28). Обработка детали выполнялась в зоне наибольшей конструкционной жесткости установки (зона V) и зоне наименьшей жесткости (зона VI).

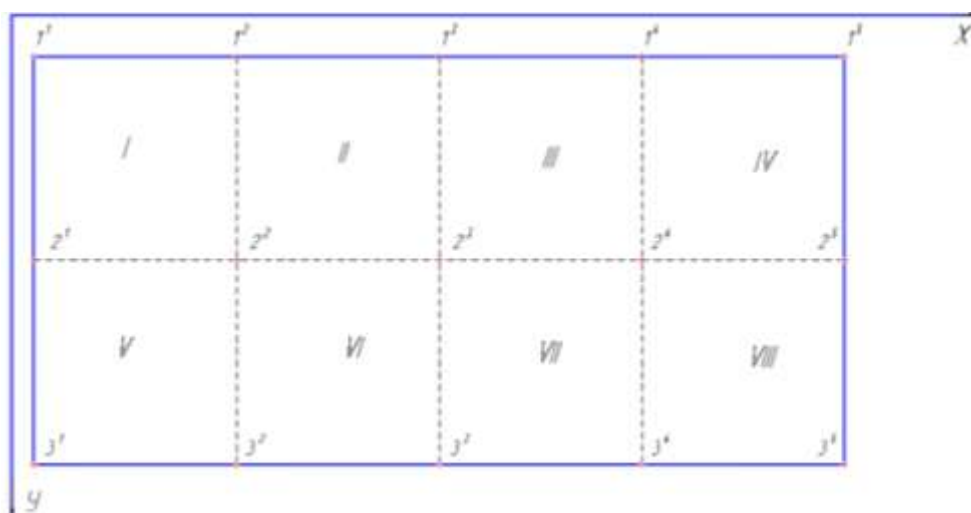


Рисунок 28 – Зонирование установочной платформы установки ГАР

В данном эксперименте были выбраны 4 образца на две зоны и также разные режимы резания: два образца в зоне V при режимах подачи Q3 (40 мм/мин) и Q4 (28 мм/мин) а также два образца в зоне VI при режимах подачи Q3 (40 мм/мин) и Q4 (28 мм/мин). Режимы резания при ГАР определяются в зависимости от материала заготовки, толщины срезаемого слоя материала с помощью специализированного программного обеспечения.

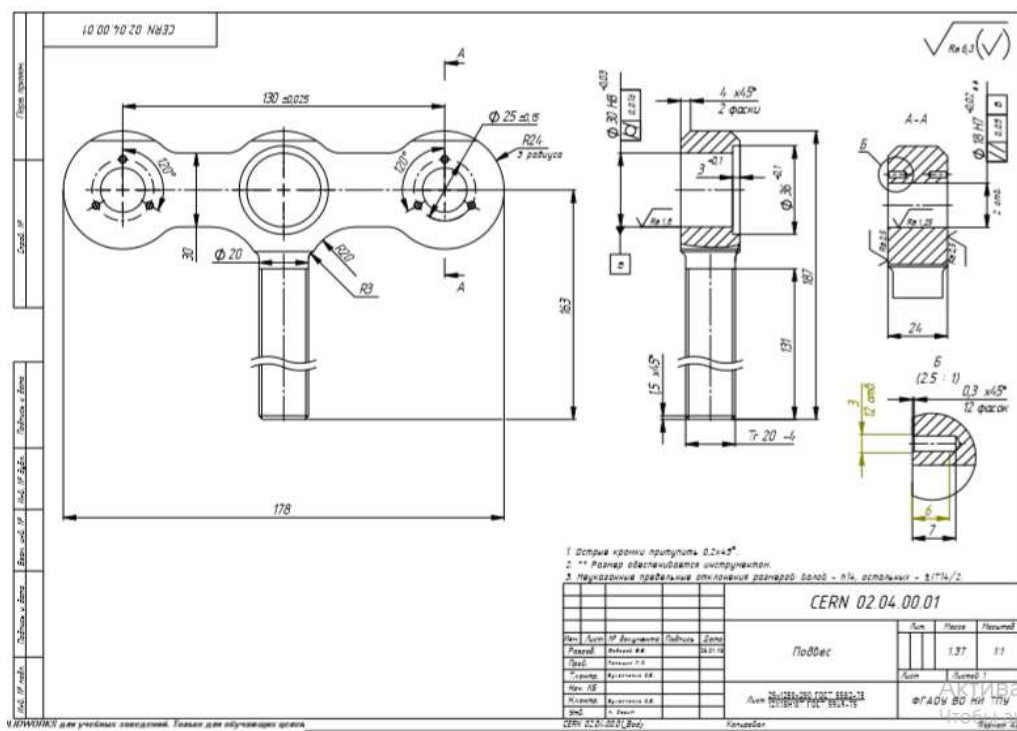


Рисунок 29 – Чертеж детали «Подвеса».

Анализируя полученные данные видно, что при скорости Q3 обработанное центральное отверстие имеет максимальное отклонение на зоне VI, а при скорости Q4 в зоне V имеет более точной формы.

Таблица 6 – Результаты измерения экспериментов

Поверхность	Зона V				Зона VI			
	Режимы обработки							
	Q3		Q4		Q3		Q4	
	отклонение, мм		отклонение, мм		отклонение, мм		отклонение, мм	
	Вход	Выход	Вход	Выход	Вход	Выход	Вход	Выход
Отверстие (28мм)	0,33	0,78	0,44	0,54	0,55	0,75	0,44	0,82
Отверстие 1 (16мм)	0,58		0,21	0,63	0,36	0,87	0,35	1,07
Отверстие 2 (16мм)	0,31	0,43	0,21	0,60	0,53	0,95	0,43	1,01
Размер 1 (30мм)	0,22	0,73	0,05	0,84	0,60	1,05	0,34	1,24
Размер 2 (30мм)	0,70	1,01	0,39	0,51	0,32	0,91	0,43	0,98

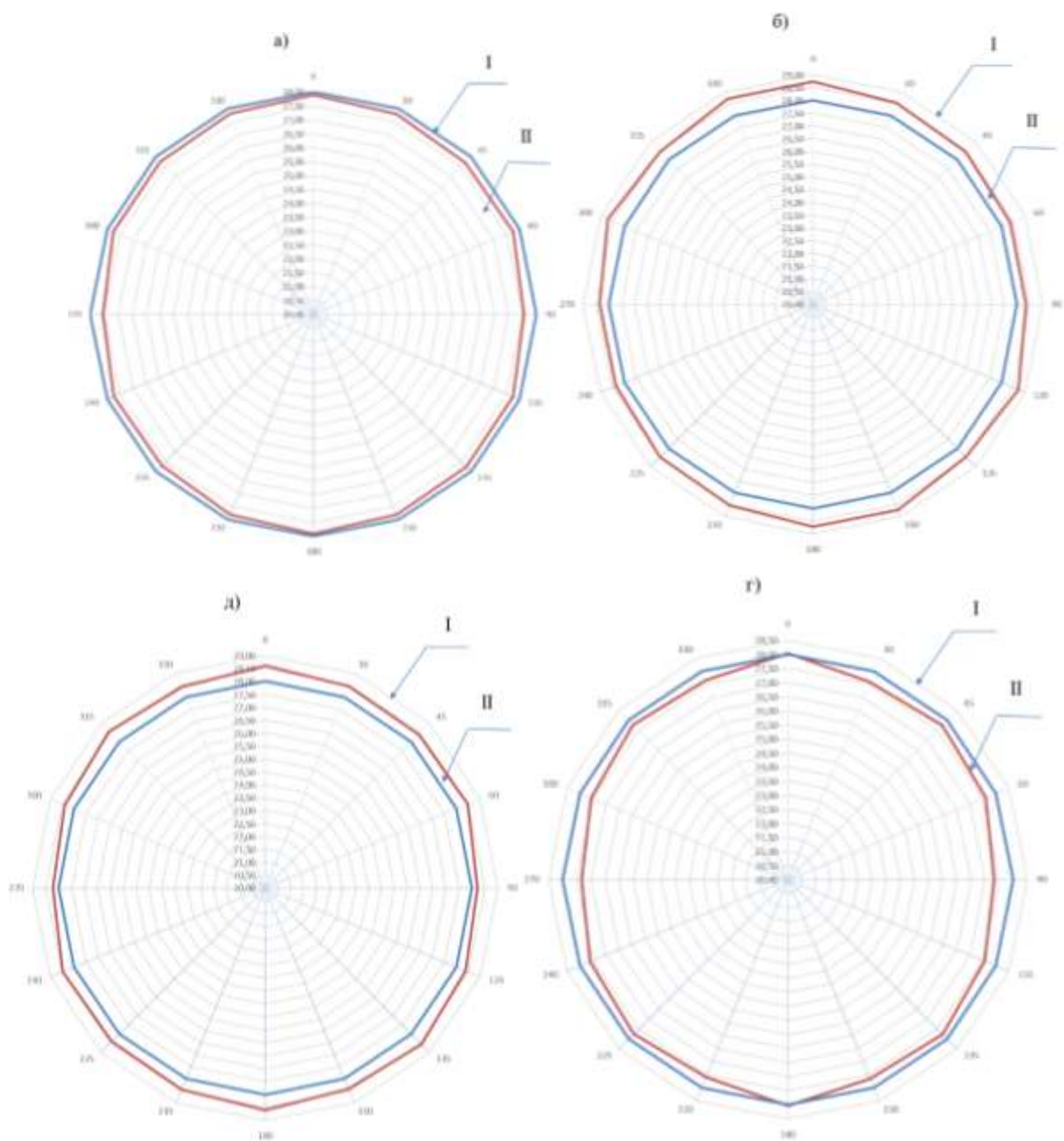


Рисунок 30 – Зависимости изменения технологического (1) и реального (2) диаметров отверстия от угла измерения на входе струи:  
 а - подача Q3, зона V; б – подача Q3, зона – VI; в – подача Q4, зоне V; г – подача Q4, зона VI

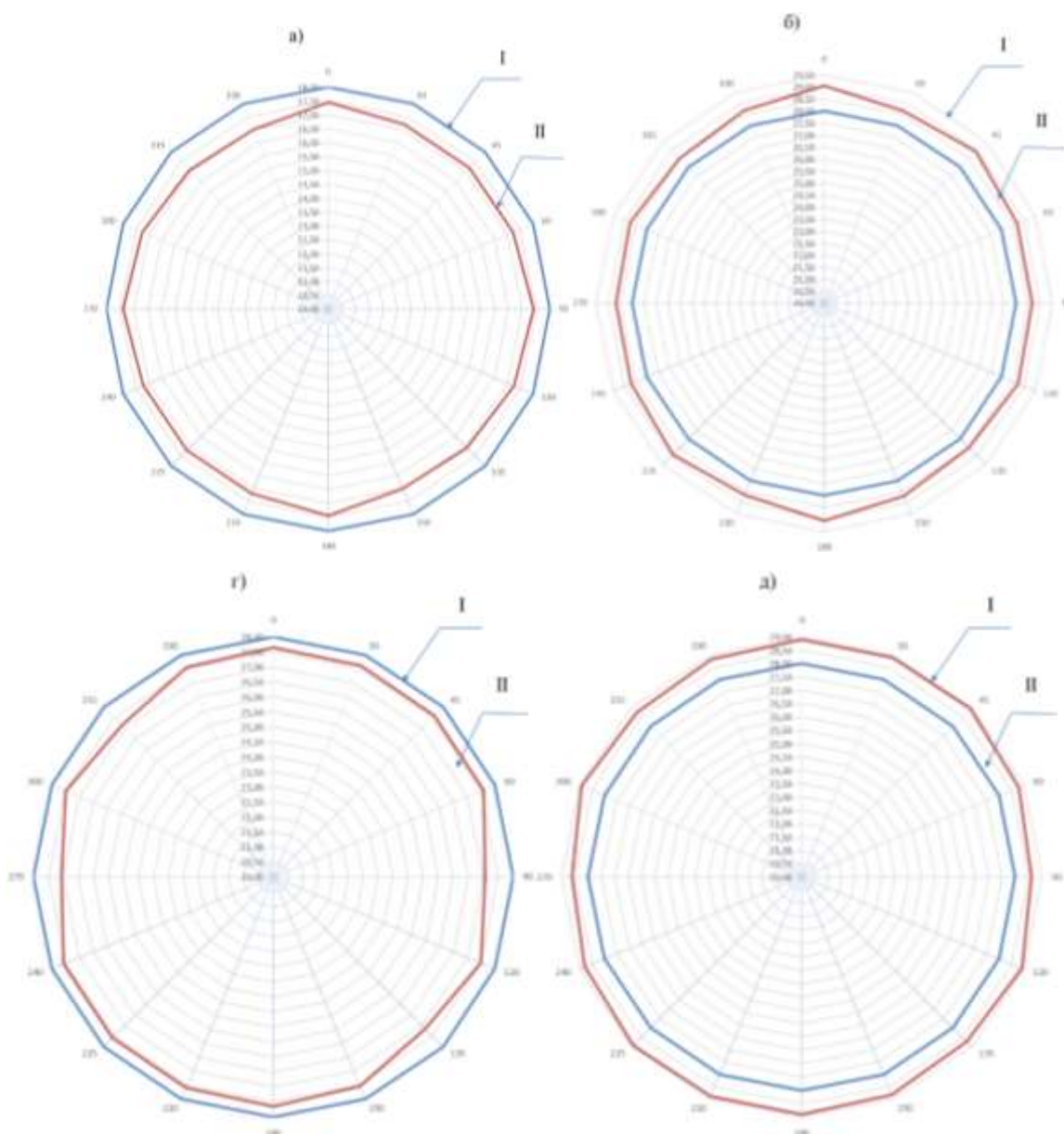


Рисунок 31 – Зависимости изменения технологического (I) и реального (II) диаметров отверстия от угла измерения на входе струи:

а - подача Q3, зона V; б – подача Q3, зона – VI; в – подача Q4, зоне V; г – подача Q4, зона VI.

Данные, полученные в результате измерений, представляют собой наборы координат точек для каждой из отверстий на входе и на выходе струи. Графическая интерпретация измеренных точек на входе струи приведена на рис. 2 и на выходе струи - на рис.3. Анализируя результаты изменения диаметра отверстия (30 мм) и сравнивая с технологическим размером (28 мм) можно отметить что, точность формы отверстия на входе выше чем на выходе, то есть отклонение реальной формы отверстия на входе струи меньше чем на выходе. Это означает, что гидроабразивная установка не дает нам высокую точность формы.



При исследовании процесса гидроабразивной резки одним из важнейшим является вопрос формирования профиля шероховатости поверхности реза. Шероховатость поверхности наряду с размерными характеристиками и отклонением формы детали является важнейшим показателем, величина которой определяет работоспособность и износ узлов деталей машин. Отклонения профиля, а также зависимость размерных характеристик деталей в зависимости от технологических параметров обработки представлены в работах Г.В. Барсукова, В.В. Шпилева и др [7,24,25]. Зная теоретическую зависимость формирования шероховатости поверхности реза от технологических параметров процесса, становится возможным прогнозировать качество изготавливаемых деталей, а также дать рекомендации по оптимизации процесса.

Гидроабразивная резка является механическим процессом, при котором в результате эрозионного разрушения частицы абразива снимают слой микростружки, а вода является ускорителем этого процесса. Она выполняет две функции. Первая это транспортировка частиц абразива к зоне резания. Вторая эта эвакуация продуктов резания из зоны обработки: отработанных частиц абразива, а также слоев микростружки. Также вода смазывает и охлаждает поверхность в зоне резания [1,9-11,66].

Одними из важнейших параметров обработки при гидроабразивной резки является давление струи из которого зависит многие другие параметры таких как средняя скорость струи. Исходя из основы гидродинамики можно отметить, что чем выше давление струи, тем больше будет скорость струи, в результате которого создается кинетическая энергия и обрабатывается слой материала, но когда струи разрезает слой материала кинетическая энергия потихоньку уменьшается и в результате этого происходит отклонения от размеров качества обработки.

Гидроабразивную струю можно рассматривать как твердый режущий абразивный инструмент, который имеет определённый диаметр. Рассмотрим схему струи и поверхности, которые образуются в процессе обработки.

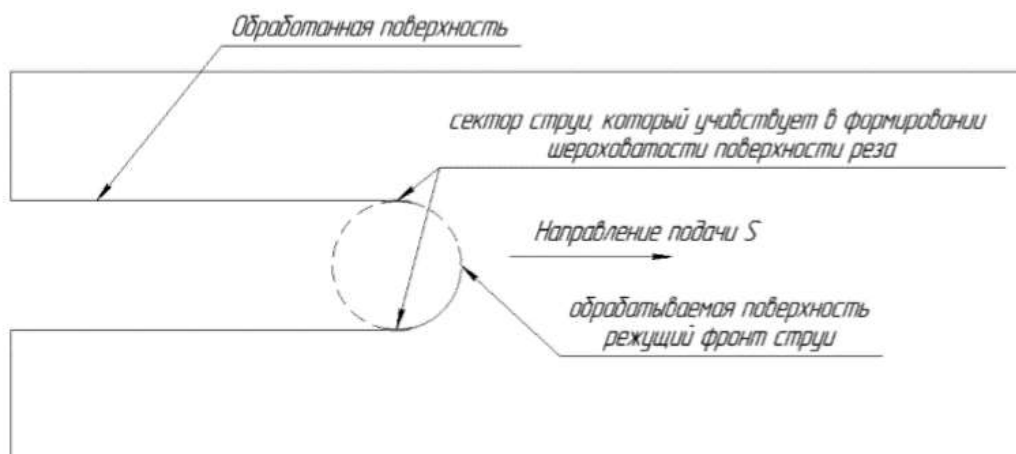


Рисунок 32 – Схема фронта режущей струи

В формировании поверхности обработки при гидроабразивной обработке можно заметить, что участвует лишь часть – небольшой сектор режущей струи, как это показано на рисунке 32.

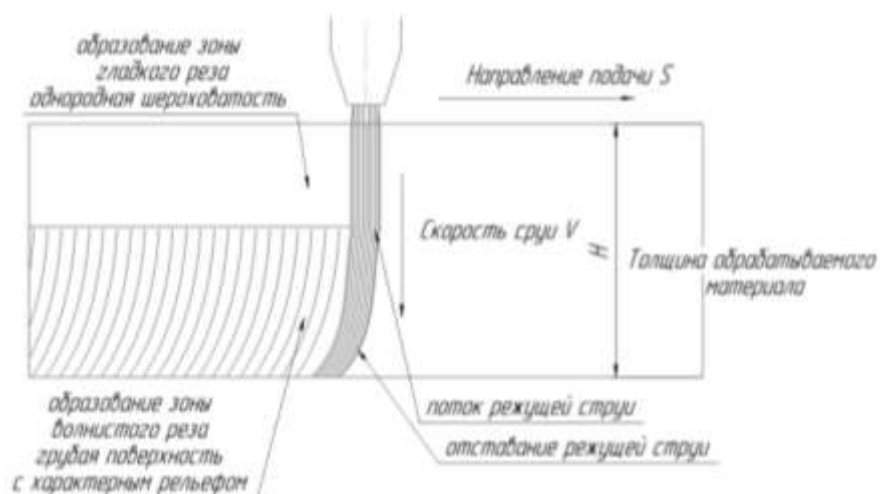


Рисунок 33 – Процесс обработки при гидроабразивной резки

Основная часть струи в начале обработки разрушает материал заготовки, затем уменьшая свои кинетические энергии отскакивают в сторону (рис.33). Здесь также играет важную роль свойства обрабатываемого материала.

При проникании струи к низу реза как показано на рисунке 34, возрастает угол атаки внедрения частиц. Большое число частиц, не вызывая полезных соударений отражаются от материала, новые частицы встречая препятствие отражаются, блокируют частицы поступающие в зону резания, и в результате образуется зона волнистого реза с грубой шероховатостью поверхности.



Рисунок 34 – Процесс формирования поверхности реза

Шероховатость поверхности образуется вследствие прохождения сектора режущей струи. Каждая частица при контакте с материалом создает пластические и упругие деформации, оставляя после себя царапину, ширина и глубина которой зависит от формы и размера этой частицы, угла внедрения частицы в материал, скорости и траектории движения. Шероховатость поверхности будет складываться из совокупности этих царапин, взаимно пересекающихся и налагающийся друг на друга. При увеличении подачи режущего сопла, уменьшается число взаимодействий в единицу времени, так как формообразующий сектор быстрее перемещается относительно материала. При увеличении давления, возрастает скорость струи, а значит опять же, получается меньшее значение шероховатости. А при увеличении размера абразивных частиц в смеси шероховатость обработанной поверхности будет возрастать, так как большие зерна оставляют более глубокие следы - царапины, величина которых напрямую зависит от формы и размера абразива. В более твердый материал частицам сложнее внедряться, чем в мягкий. Этим обуславливается образование худшей шероховатости при резании мягких материалов. Однако более твердый и прочный материал способствует более быстрой потере энергии режущей струи. Соударяясь с материалом, частицы, не вызывая полезного взаимодействия отражаются от материала, создавая блокаду для вновь поступающих частиц. Это явление называется «эф-

фектом отражения». Поэтому на твердых материалах с ростом подачи сопла режущей головки величина зоны волнистого реза возрастает более стремительно, чем при резании мягкого материала. Расстояние от сопла до режущей поверхности влияет на рассеивание струи. Расстояние от сопла до поверхности заготовки может меняться в зависимости от жесткости системы перемещения режущей головки. При контакте с воздухом получается факел, струя теряет свою режущую форму, концентрацию. При этом возрастают углы атаки абразивных частиц по отношению к обрабатываемой поверхности, количество взаимодействий падает, возрастает шероховатость поверхности реза [27,28,29,30,31,32].

В данной работе при исследовании качества обработки рассматривается шероховатости детали, полученные в разных зонах обработки при разных режимах резания.

Измерения проводились с помощью измерительного прибора – профилометра модели Form Talysurf Intra. На рисунке 35 показано процесс измерения профиля детали полученных установки гидроабразивной резки.



Рисунок 35 – Процесс измерения величина шероховатости  
Технические характеристики прибора приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Технические характеристики Профилометр Form Talysurf Intra

Параметр	Значение
1	2
Длина трассы измерения	0.1 – 50 мм
Расстояние, необходимое для выбора люфтов	0.3 мм
Прямолинейность направляющей	0.4 мкм на 50 мм
	0.2 мкм на 20 мм
Диапазон измеряемых углов	± 35 град.
Погрешность измерения углов (при Ra<0.1)	3%
Отклонение от дуги (P+V) на калибровочной сфере	0.25 мкм / 9.5 мм
Погрешность измерения радиусов	2% – 1 мм
	0.04% – 12.5-28 мм
	0.2% – 1000 мм
Погрешность измерения высотных параметров	2% ± 6 нм
Скорость измерения	1 мм/с
Скорость возврата	10 мм/с
<b>Возможности анализа</b>	
Выбор формы средней линии	Нет, База прибора, линия по МНК, линия MZ, дуга по МНК
Параметры формы	Наклон или радиус
Анализ шероховатости (фильтры GAUSS, ISO 2CR, 2CRPC, отсечки шага 0.08-8.0 мм, полоса пропускания 30:1, 100:1, 300:1 – в зависимости от отсечки шага)	Ra, Rq, Rv, Rt, Rsk, Rp, Rku, Rz(JIS) Rpm, R3y, R3z, RS, RSm, Ln, Rc, Rl, RLamq, RDelq, RDela,
<b>Индуктивный датчик</b>	
Диапазон	1 мм, 0.2 мм (номиналы)
Разрешающая способность	16нм диапазон 1 мм
	3.2 нм диапазон 0.2 мм
Измерительное усилие	0.7 мН-1 мН
Радиус шупа	2 мкм
<b>Габариты</b>	
Длина	535-585 мм
Ширина	116 мм
Высота	160 мм
Масса	6,4

Рассматривая качество шероховатости внутренних поверхностей отверстия, можно отметить что среднее значение шероховатости в центральные отверстия при скорости Q3 три в зоне V было максимально, то есть Ra2,6, более грубые шероховатости имеет центральное отверстие при Q3 в зоне VI. Результаты измерения шероховатости поверхностей приведены таблице 8.

Таблица 8 – Результаты измерения шероховатости поверхностей

Тип поверхности	Режим обработки	Среднее значение шероховатости Ra
Центральное отверстие	Q3	2,6
Центральное отверстие	Q4	2,8
Отверстие 1	Q3	2,6
Отверстие 1	Q4	2,3
Отверстие 2	Q3	2,6

Таким образом, рассматривая процесс формирования поверхности заготовки и качество обработки в разных зонах резания при разных режимах обработки можно отметить, что на качество поверхности заготовки при гидроабразивной резки влияет давление струи, скорость подачи струи и местоположение заготовки на установочной платформе. Увеличению скорости подачи струи в зависимости зоны резания на установочной платформе есть приводит к улучшению качество обработки. Также можно отметить что изменения эти параметры существенно влияет на ресурс режущей головки.

### 3.3 Исследование точности изготовления детали «Стенка передняя» при гидроабразивной обработке из нержавеющей стали

Для определения точности и качества поверхности, изготавливаемых изделий на гидроабразивной установке было необходимо провести несколько экспериментов. Портальная система гидроабразивной резки была разделена на 8 зон резания. Деталь «Стенка передняя» изготавливается из конструкционной криогенной стали 12X18H10T ГОСТ 5632-72. Деталь «Стенка передняя» является опорой иллюминатора роботизированной установки ультразвукового контроля изделия сложной формы. Деталь изготавливается из листового проката с последующей обработкой [23]. Технологические свойства стали 12X18H10T ГОСТ 5632-72 приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Технологические свойства стали 12X18H10T ГОСТ 5632-72

Характеристики	Значение
Удельный вес	7920 кг/м <sup>3</sup>
Термообработка	Закалка 1050 - 1100°C
Температураковки	начала 1200 °C, конца 850 °C. Сечения до 350 мм охлаждаются на воздухе
Твердость материала	НВ 10 -1 = 179 МПа
Свариваемость материала	без ограничений, способы сварки: РДС (электроды ЦТ-26), ЭШС и КТС. Рекомендуется последующая термообработка
Обрабатываемость резанием	в закаленном состоянии при НВ 169 и $\sigma_{\text{в}}=610$ МПа, $K_{\text{и тв. спл}}=0,85$ , $K_{\text{и б. ст}}=0,35$
Флокеночувствительность	не чувствительна
Жаростойкость	в воздухе при $T=650$ °C 2-3 группа стойкости, при $T=750$ °C 4-5 группа стойкости
Предел выносливости	$\sigma_{-1}=279$ МПа, $n=107$

На гидроабразивной установке выполнялась основная часть технологического процесса изготовления детали «Стенка передняя». Были вырезаны 36 отверстия диаметром 9 мм, затем обрабатывался наружный и внутренний контур детали. В качестве образцов были выбраны 5 деталей. Образцы были установлены как показано на рис.36.

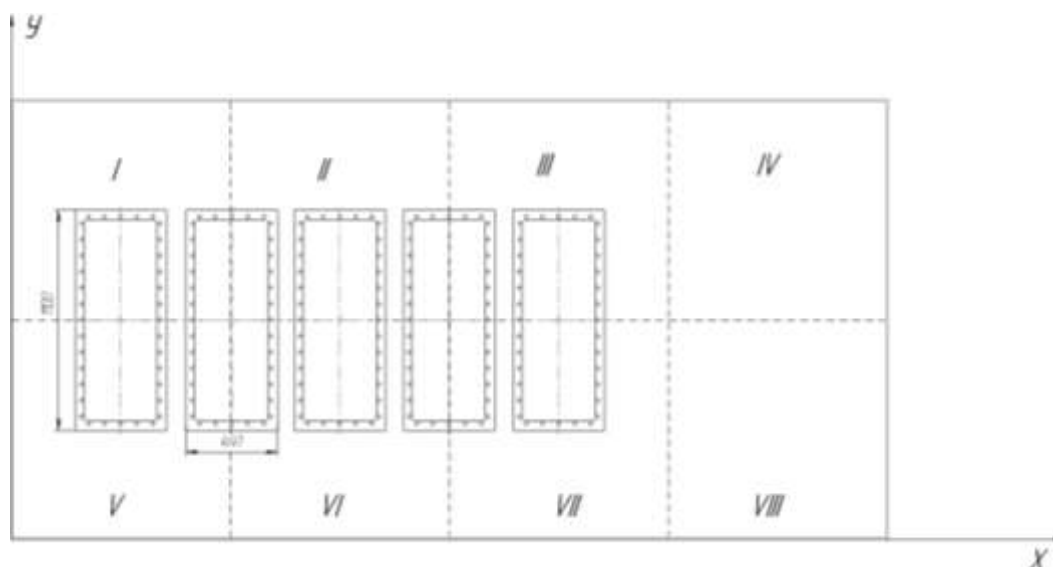


Рисунок 36 – Схема расположения детали в зоне резания

Образцы были обработаны на гидроабразивной установке с последовательной механической обработкой. На выбранных образцах после обработки при ГАР были отмечены некоторые размеры для измерения. Это те ключевые размеры, которые можно было применить для исследования точности. Измеренные размеры показаны на эскизе (рис.37).

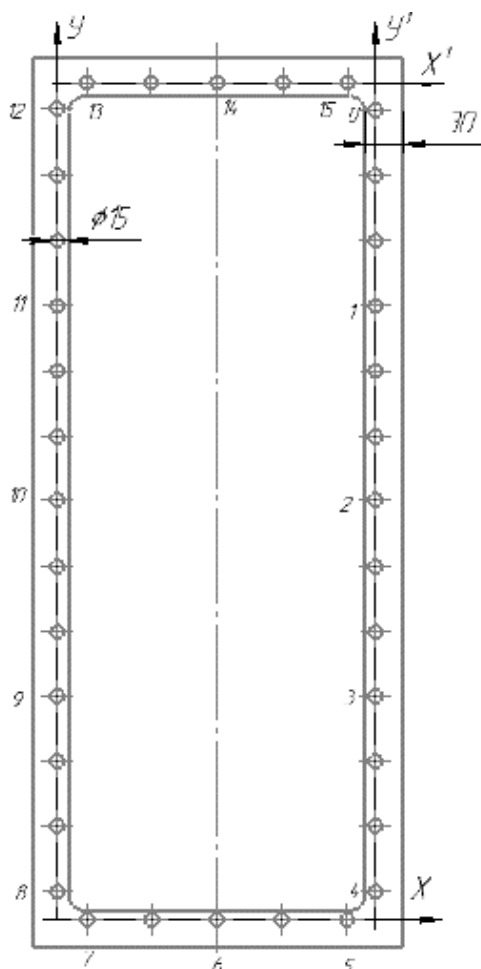


Рисунок 37 – Обработанная заготовка при ГАР



В данной работе рассматривались 15 диаметральных размеров, а также линейные размеры. Результаты измерения приведены в таблицах 10, 11, 12,13 и 14.

Таблица 10 – Отклонения от номинальных размеров отверстия по оси X (верхняя часть)

Номинальный размер, мм	Реальный размер отверстий, мм	Отклонения	Реальный размер отверстий, мм	Отклонения
9	9,05	-0,05	8,93	0,07
	9,05	-0,05	8,78	0,23
	9,16	-0,16	8,75	0,25
	9,06	-0,05	8,79	0,21
	9,13	-0,13	8,88	0,12
	9,05	-0,05	8,91	-0,09
	9,14	-0,14	8,95	-0,05
	9,12	-0,11	8,93	-0,07
	9,14	-0,14	8,99	-0,01
	9,08	-0,08	8,88	-0,12
	9,05	-0,05	8,83	0,17
	9,03	-0,03	8,84	0,16
	9,06	-0,05	8,65	0,35
	8,98	0,02	8,82	0,18
	8,99	0,01	8,76	0,24
	9,11	-0,11	8,57	0,44
	9,05	-0,05	8,49	0,51
	9,01	0,00	8,41	0,59
	9,03	-0,02	8,35	0,65
	9,07	-0,07	8,36	0,64
	9,16	-0,16	9,08	-0,08
	9,14	-0,14	9,04	-0,04
	9,12	-0,12	9,00	0,00
	9,13	-0,13	8,93	0,07
	9,10	-0,10	9,06	-0,06

Таблица 11 – Отклонения от номинальных размеров отверстия по оси Х  
(верхняя часть)

Номинальный размер, мм	Реальный размер отверстий, мм	Отклонения	Реальный размер отверстий, мм	Отклонения
9	9,04	-0,04	8,72	0,29
	9,10	-0,10	8,84	0,16
	8,95	0,05	8,57	0,43
	9,06	-0,06	8,69	0,32
	9,12	-0,12	8,92	0,08
	9,12	-0,12	8,96	-0,04
	9,07	-0,07	8,82	-0,18
	9,13	-0,13	8,95	-0,05
	9,11	-0,11	8,85	-0,15
	9,14	-0,14	9,12	0,12
	8,96	0,04	8,80	0,20
	9,06	-0,06	8,85	0,15
	9,04	-0,04	8,69	0,31
	9,04	-0,04	8,64	0,36
	8,99	0,01	8,66	0,34
	9,10	-0,10	8,35	0,65
	9,07	-0,07	8,35	0,65
	9,05	-0,05	8,28	0,72
	9,05	-0,05	8,43	0,57
	9,10	-0,10	8,37	0,63
	9,16	-0,16	9,05	-0,05
	9,13	-0,13	9,05	-0,04
	9,19	-0,19	9,00	0,01
	9,15	-0,15	9,06	-0,05
	9,16	-0,16	9,00	0,00

Таблица 12 – Отклонения от номинальных размеров отверстия по оси У

№ Де-тали	1	Номиналь-ный раз-мер, мм	9	№ Детали	2	Номиналь-ный раз-мер, мм	9
На входе струи		На выходе струи		На входе струи		На выходе струи	
Реаль-ный раз-мер, мм	Реаль-ный размер, мм	Реальный размер, мм	Откло-нения, мм	Реальный размер, мм	Реаль-ный размер, мм	Реальный размер, мм	Откло-нения, мм
9,04	-0,04	8,72	0,29	9,12	-0,12	8,96	-0,04
9,07	-0,07	8,63	0,38	9,09	-0,09	8,91	-0,09
9,08	-0,08	8,66	0,34	9,11	-0,11	8,90	-0,10
9,11	-0,11	8,72	0,28	9,15	-0,15	8,76	-0,24
9,05	-0,05	8,78	0,23	9,14	-0,14	8,95	-0,05
9,05	-0,05	8,92	0,08	9,14	-0,14	9,12	0,12
9,08	-0,08	8,95	0,05	9,14	-0,14	8,85	-0,15
9,11	-0,11	9,02	-0,02	9,16	-0,16	8,92	-0,09
9,09	-0,09	8,97	0,03	9,12	-0,12	8,94	-0,06
9,05	-0,05	8,93	0,07	9,05	-0,05	8,91	-0,09

Таблица 13 – Отклонения от номинальных размеров отверстия по оси У

№ Де-тали	3	Номиналь-ный раз-мер, мм	9	№ Де-тали	4	Номиналь-ный раз-мер, мм	9
На входе струи		На выходе струи		На входе струи		На выходе струи	
Реаль-ный размер, мм	Реаль-ный размер, мм	Реальный размер, мм	Отклоне-ния, мм	Реаль-ный размер, мм	Реаль-ный размер, мм	Реальный размер, мм	Отклоне-ния, мм
8,96	0,04	8,78	0,22	9,10	-0,10	8,35	0,65
8,98	0,02	8,54	0,46	9,08	-0,08	8,30	0,70
8,97	0,03	8,91	0,09	9,05	-0,04	8,47	0,54
9,02	-0,02	8,86	0,14	9,32	-0,32	8,48	0,53
9,03	-0,03	8,81	0,19	9,05	-0,05	8,49	0,51
8,99	0,01	8,66	0,34	9,10	-0,10	8,37	0,63
8,98	0,02	8,81	0,19	9,08	-0,08	8,48	0,52
9,24	-0,24	8,83	0,17	9,06	-0,06	8,51	0,49
9,00	0,00	8,67	0,33	9,14	-0,14	8,22	0,79
9,05	-0,05	8,83	0,17	9,11	-0,11	8,57	0,44

Таблица 14 – Отклонения от номинальных размеров отверстия по оси У

№ Детали	5	Номинальный размер, мм	9
На входе струи		На выходе струи	
Реальный размер, мм	Реальный размер, мм	Реальный размер, мм	Отклонения, мм
9,16	-0,16	9,05	-0,05
9,10	-0,10	9,06	-0,06
9,17	-0,17	8,99	0,02
9,31	-0,31	9,01	-0,01
9,14	-0,14	9,04	-0,04
9,16	-0,16	9,00	0,00
9,08	-0,08	9,02	-0,02
9,11	-0,11	8,93	0,07
9,16	-0,16	9,02	-0,02
9,16	-0,16	9,08	-0,08

По результатам измерения были рассмотрены изменения отклонения от номинальных размеров на разных осях. На рис.38 приведены зависимости отклонения диаметральных размеров на оси  $X^1$ (верхней части детали) от координаты по оси абсцисс.

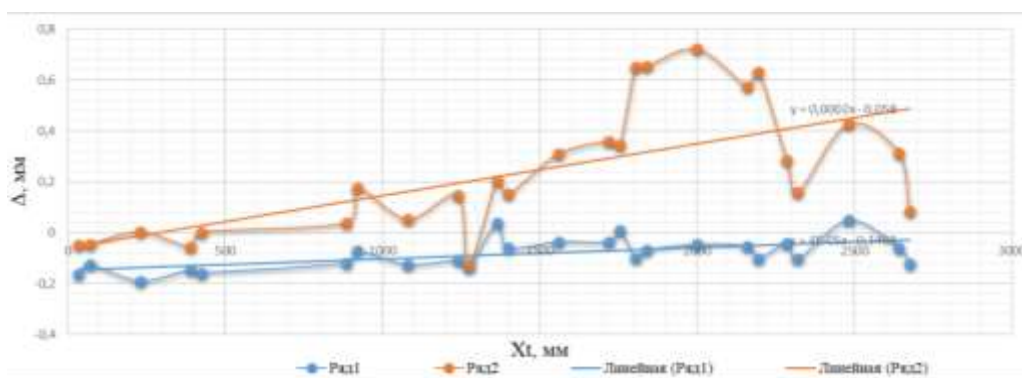


Рисунок 38 – Зависимости изменения отклонения диаметральных размеров от номинальных на верхней части детали ( $\Delta$  – отклонения диаметральных размеров по оси X, мм;  $X_i$  – координаты по оси X, мм)

На рис.39 приведены зависимости отклонения диаметральных размеров на оси X (нижней части детали) от координаты по оси ординат.

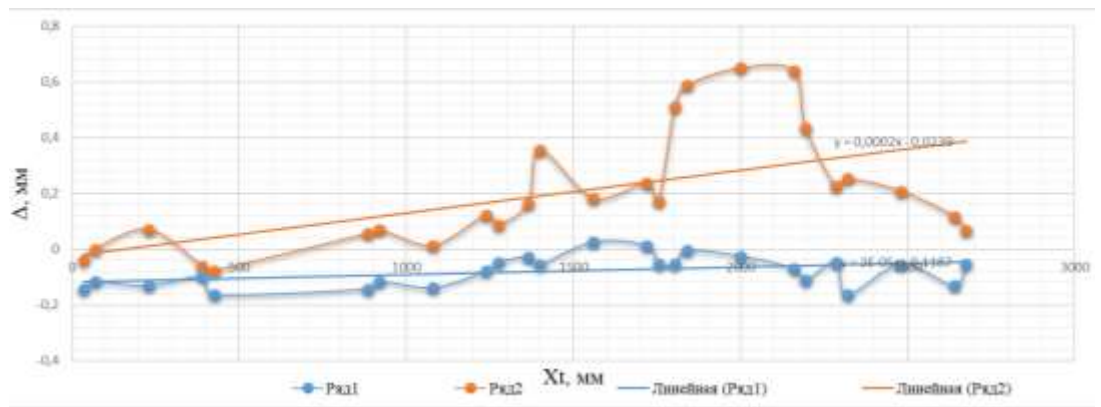


Рисунок 39 – Зависимости изменения отклонения диаметральных размеров от номинальных на нижней части детали ( $\Delta$  – отклонения диаметральных размеров по оси X, мм;  $X_i$  – координаты по оси X, мм)

Из приведенных выше зависимостей видно, что наибольшие отклонения наблюдаются в детали 4, а наименьшие отклонения в детали 5 и 2, которые были расположены в зоне II и III. Таким образом, точность обработки отверстия переменная: изменяется в зависимости от координаты по оси абсцисс.

Также рассматриваются изменения отклонения диаметральных размеров по оси ординат как показано на эскизе (рис.37). По результатам измерения были получены изменения отклонения от номинальных размеров на оси Y (правой части детали)  $Y^1$  (левой части детали). На рис.40 приведены зависимости отклонения диаметральных размеров на осях Y (правой части детали) и  $Y^1$  (левой части детали) от координаты по оси ординат.

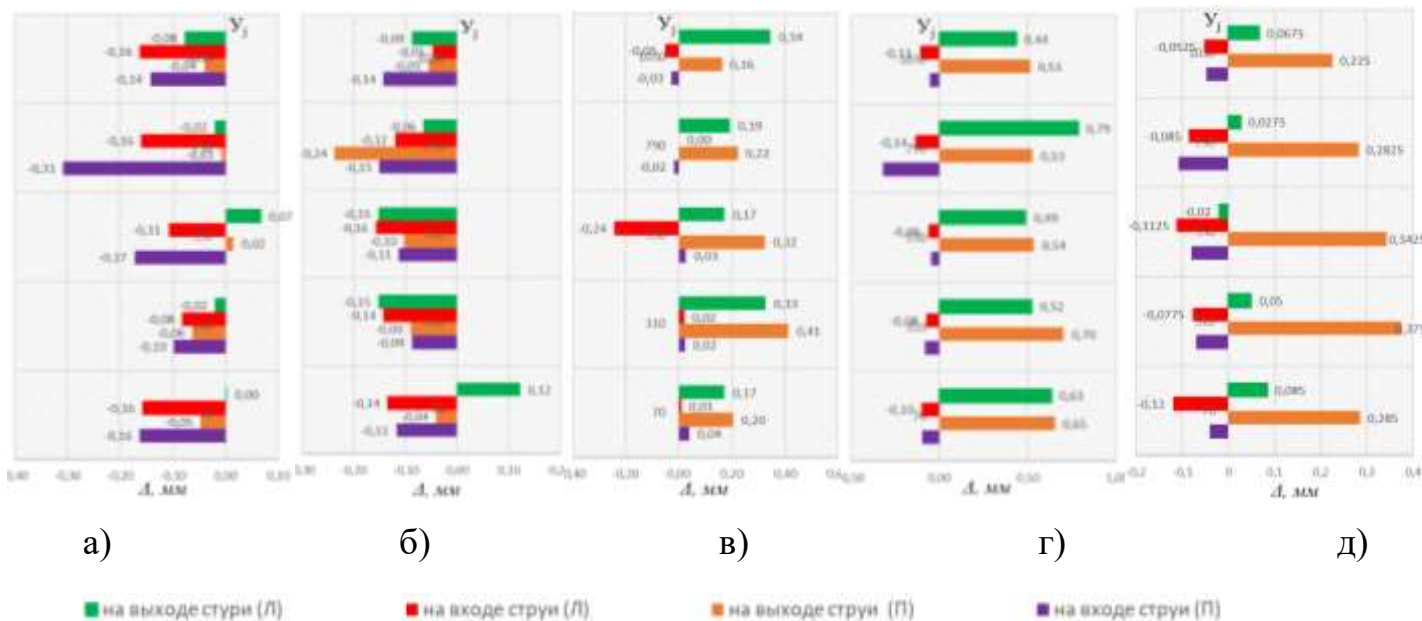


Рисунок 40 – Зависимости изменения отклонения диаметральных размеров от

номинальных по оси Y ( $\Delta$  – отклонения диаметральных размеров по оси Y, мм;  
 $Y_i$  – координаты по оси Y, мм)

В данном экспериментальном исследовании были рассмотрены изменения линейных размеров. Линейные размеры, также, как и диаметральные размеры играют важную роль при проектировании любого изделия. Именно линейные размеры обеспечивают чаще всего геометрические точности детали. Исходя из этого рассматриваются в данной работе изменения линейных размеров детали «Стенка передняя». На рис. 41 приведен результаты измерения отклонения линейных размеров от номинальных на верхней части детали.

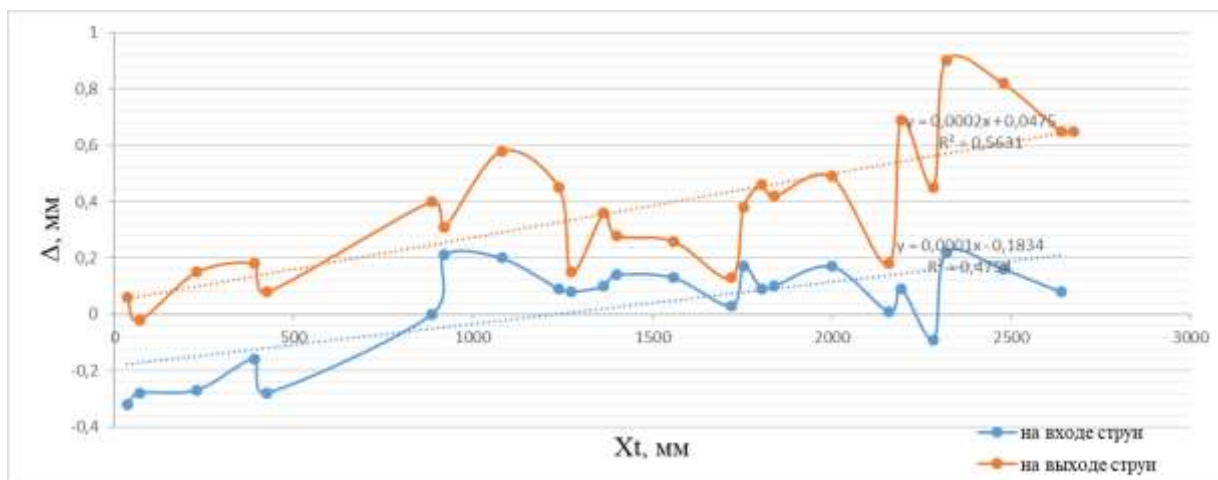


Рисунок 41 – Зависимости изменения отклонения линейных размеров от номинальных на верхней части детали ( $\Delta$  – отклонения диаметральных размеров по оси X, мм;  $X_i$  – координаты по оси X, мм)

На рис. 42 приведен результаты измерения отклонения линейных размеров от номинальных на нижней части детали.

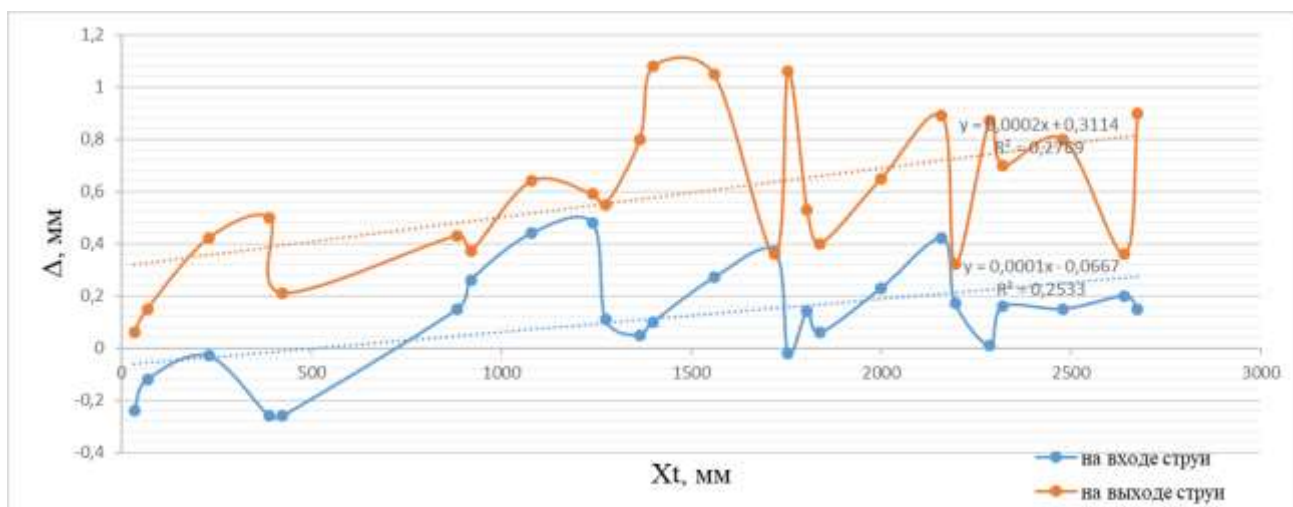


Рисунок 42 – Зависимости изменения отклонения линейных размеров от номинальных на нижней части детали ( $\Delta$  – отклонения диаметральных размеров по оси X, мм;  $X_i$  – координаты по оси X, мм)

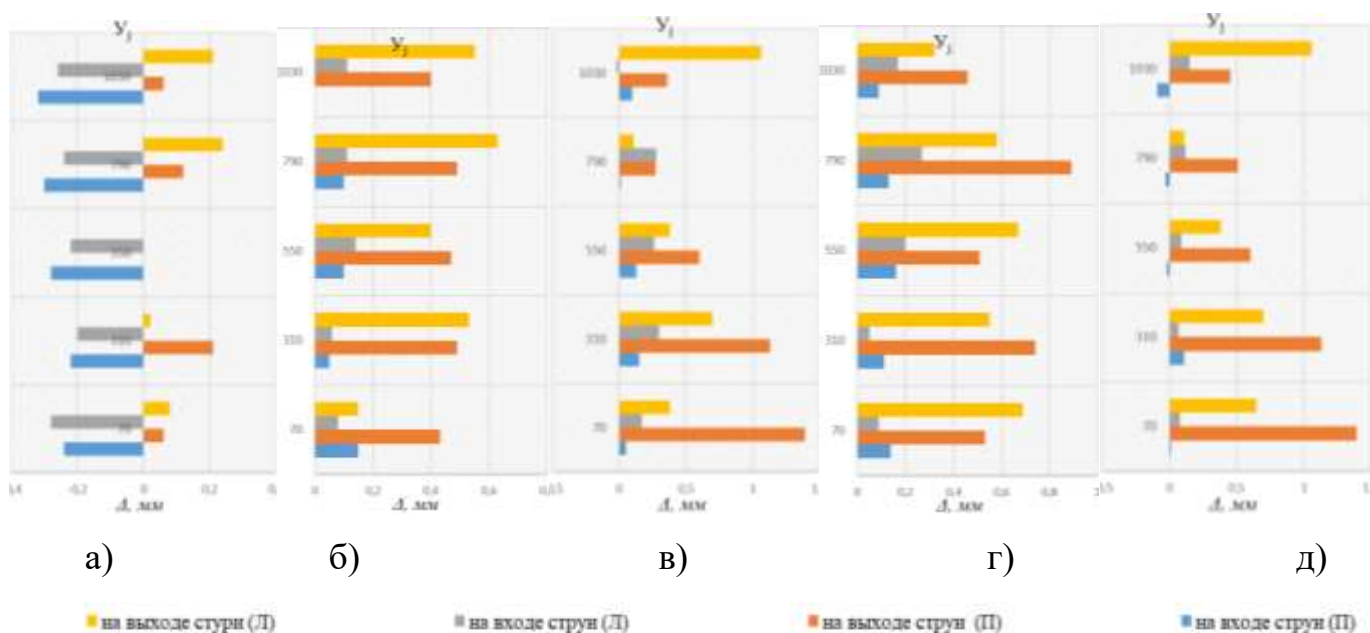


Рисунок 43 – Зависимости изменения отклонения линейных размеров размеров от номинальных по оси  $Y$  ( $\Delta$  – отклонения диаметральных размеров по оси  $Y$ , мм;  $Y_i$  – координаты по оси  $Y$ , мм)

В ходе данного эксперимента были рассмотрены изменения линейных размеров номинального размера 50 мм. Отклонения линейных размеров также были минимальными в середине установочной платформе. То есть детали с более высокой точности были получены в зоне резания на установочной платформе ближе стойками.

Анализируя зависимости изменения отклонения от номинальных размеров по оси  $y$ , можно отметить что наиболее точные отверстия были получены в детали 1 правой части. Отверстие с наименьшей точностью было получено в детали 4 левой части.

### 3.4 Экспериментальное исследование статической жесткости устройства перемещения режущей головки гидроабразивной установки

Прежде всего на точность и качество обработки при гидроабразивной резки влияет жесткость технологической системы. Поэтому необходимо учитывать жесткость устройства перемещения режущей головки гидроабразивной установки. С целью определения жесткости устройства перемещения режущей головки гидроабразивной установки производились ряд экспериментов.

Способность упругой системы при ГАР оказывать сопротивление действию сил, стремящихся ее деформировать, называют жесткостью системы гидроабразивной установки. Высокая жесткость системы гидроабразивной установки – одно из основных условий достижения высокой точности при обработке. При отсутствии достаточной жесткости под действием силы резания и других сил при гидроабразивной обработке деформируется, что приводит к искажению формы детали и возникновению отклонения размеров. С жесткостью технологической системы гидроабразивной установки связано явление вибрации. Системы, обладающие большой жесткостью, могут работать на высокопроизводительных режимах резания без появления вибраций.

Жесткость технологической системы выражается отношением составляющей силы резания, действующей по направлению нормали к обработанной поверхности, к взаимному смещению режущего инструмента и обрабатываемой детали, отсчитываемому в том же направлении:

$$j_i = \frac{P_i}{y}, \quad (28)$$

где  $j_i$  – жесткость системы, кН/мм;

$P_i$  – внешняя нагрузка, Н;

$y$  – деформация упругой системы, мм.

При оценке точности изготовления при гидроабразивной резки была ис-



следована жесткость устройства позиционирования инструмента установки гидроабразивной резки на разных плоскостях относительно разных осей. На рисунке 1 показана выбранная система координат для определения статической жесткости системы позиционирования инструмента установки гидроабразивной резки.

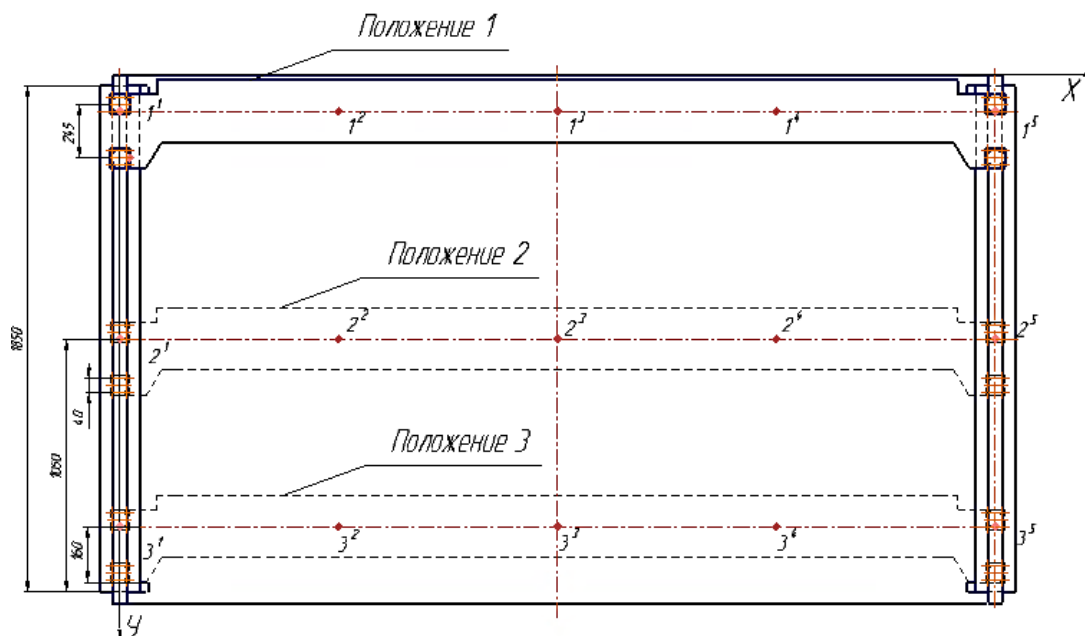


Рисунок 44 – Системы координат платформы ГАР для составления схему установки средств измерения в трех положениях на плоскости XOY относительно оси Z.

Системы координат платформы ГАР состоит из пяти точек. При определении статической жесткости системы позиционирования инструмента установки гидроабразивной резки были определены жесткости  $X_z$  и  $Y_z$ . По полученным данным была составлена диаграмма статической жесткости устройства перемещения на плоскости XOY. В данной диаграмме можно проанализировать, что жесткость  $Y_z$  высокая по сравнению  $X_z$ . Жесткость устройства перемещения на оси Y (точки  $1^1$ ,  $2^1$ ,  $3^1$ ) в начале зоны меньше чем в конце зоны.

Таблица 15 – Результаты измерения величина деформации, направляющий в трех положениях на плоскости XOY

Положение 1					
Точки измерения	1	2	3	4	5
Нагрузка, Н	520	520	520	520	520
Смещения, мм	0,040	0,163	0,444	0,152	0,047
Статическая жесткость, кН/мм	13	3,184	1,171	3,429	11,143
Положение 2					
Точки	1	2	3	4	5
Нагрузка, Н	520	520	520	520	520
Смещения	0,053	0,183	0,427	0,152	0,047
Статическая жесткость балки, кН/мм	9,750	2,836	1,219	3,429	11,064
Положение 3					
Точки	1	2	3	4	5
Нагрузка, Н	520	520	520	520	520
Смещения	0,037	0,168	0,423	0,142	0,043
Статическая жесткость балки, кН/мм	14,054	3,095	1,229	3,662	12,093

По результатам измерения величина деформации, направляющий в трех положениях на плоскости XOY составлена диаграмма статической жесткости (рис.45) устройства перемещения на плоскости X0Y относительно оси Z ( $X_z$  и  $Y_z$ ).

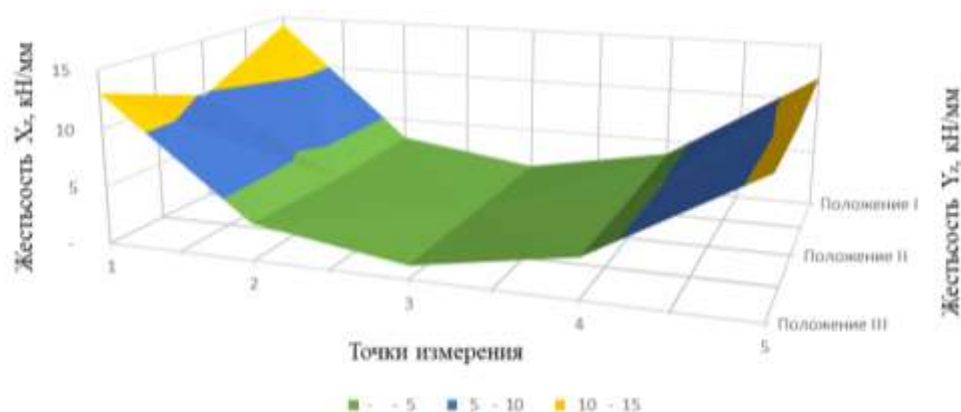


Рисунок 45 – Диаграмма статической жесткости устройства перемещения на плоскости X0Y относительно оси Z ( $X_z$  и  $Y_z$ ).

Также производился измерительный контроль статической жесткости системы перемещения режущей головки гидроабразивной установки на плоскости  $XOZ$  относительно оси  $Y$  ( $X_y$ ). По полученным результатам измерения был построен график статической жесткости  $X_y$ . Анализируя данный график можно отметить, что статическая жесткость  $X_y$  в середине системы перемещения режущей головки гидроабразивной не высокая.

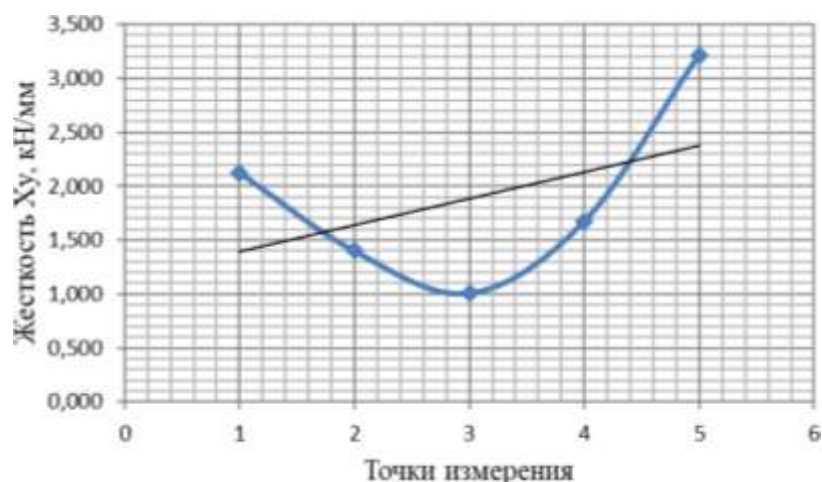


Рисунок 46 – График статической жесткости устройства перемещения на плоскости  $XOZ$  относительно оси  $Y$  ( $X_y$ ).

Определения жесткости системы перемещения режущей головки гидроабразивной установки на плоскости  $XOZ$  относительно оси  $Y$  ( $Z_y$ ) и на плоскости  $YOZ$  относительно оси  $X$  ( $Z_x$ )

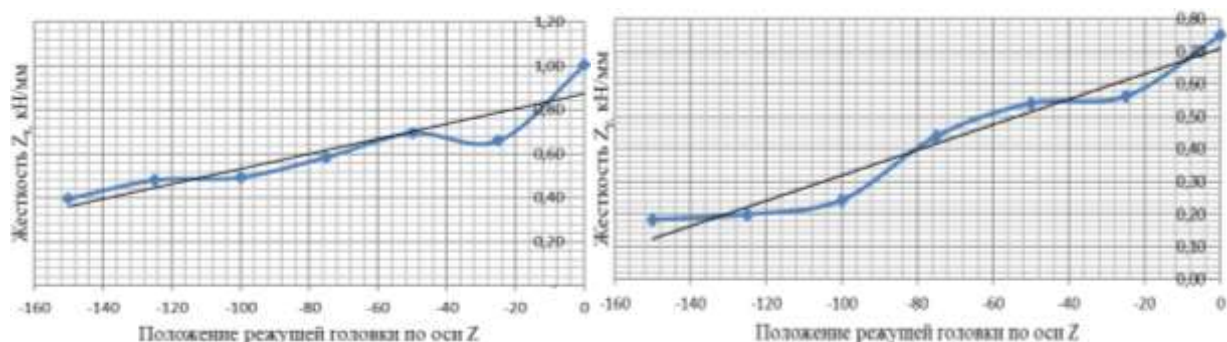


Рисунок 47 – График статической жесткости устройства перемещения на плоскости  $YOZ$  относительно оси  $X$  ( $Z_x$ ) и статической жесткости устройства перемещения на плоскости  $XOZ$  относительно оси  $Y$  ( $Z_y$ )

## 4 Результаты проведенного исследования

### 4.1 Результаты математического моделирования

Использование моделей и моделирования при исследованиях динамических систем дает возможность решить сложные задачи проектирования технологического оборудования. Созданное для специалистов математическое и программное обеспечение сделало моделирование широко применяемым профессиональным инструментом для решения сложных задач оптимального технологического проектирования. [11]. Моделирование с помощью программного обеспечения Matlab имеет свои недостатки по сравнению Simulink. Simulink дает возможность наглядно и схематично представить математическую модель, а также в среде Simulink можно получить более точные результаты.

В данной работе были определены оптимальные параметры для гидроабразивной установки, проведен спектральный анализ системы, выявлены амплитудно-частотные характеристики для заготовки и режущей головки.

На рисунках 48, 49 и 50 приведены графики перемещения заготовки и режущей головки без изменения параметров системы соответственно 50 кг, 100 кг и 500 кг.

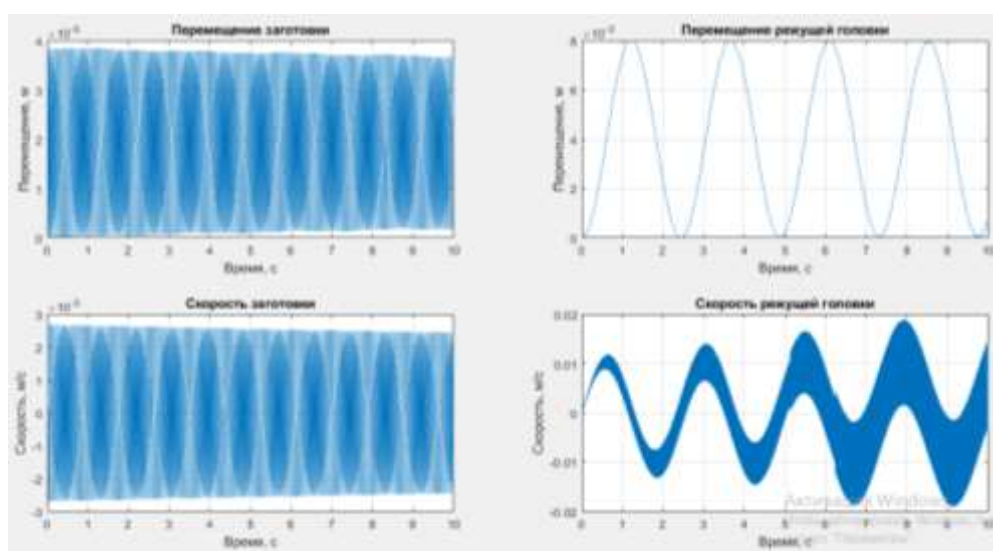


Рисунок 48 – Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при массе 50 кг

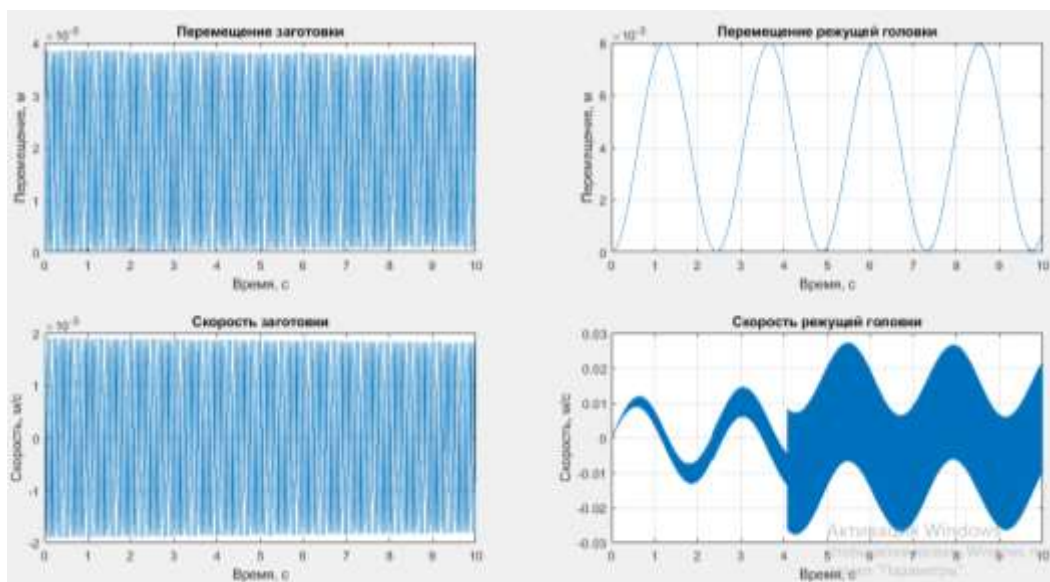


Рисунок 49 – Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при массе 100 кг

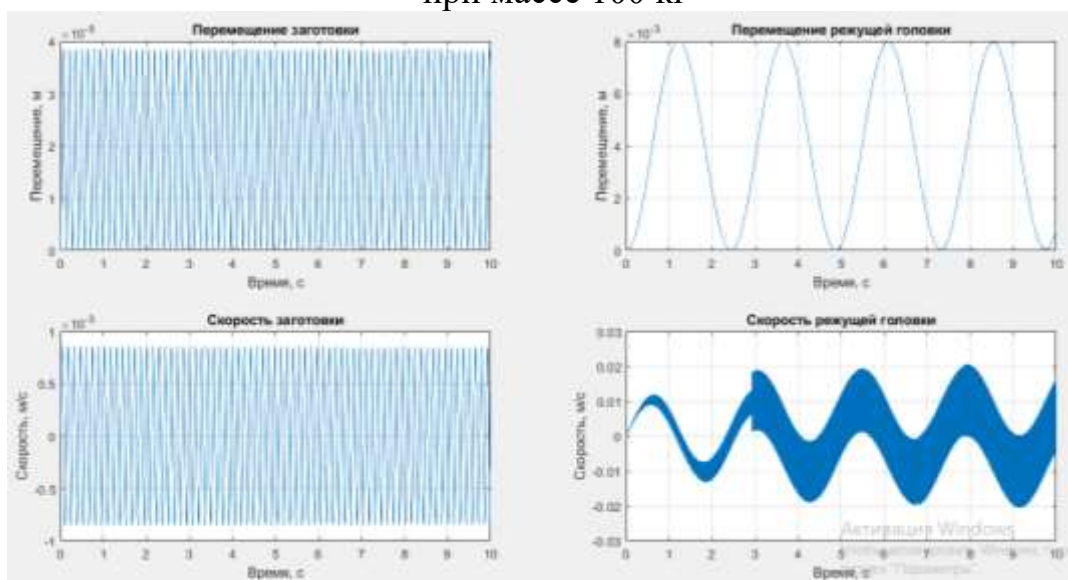


Рисунок 50 – Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при массе 500 кг

Таким образом на амплитуды колебания заготовки и режущей головки, которая в данной системе должна быть минимальная, влияет много факторов. Важно отслеживать колебания 3 телом которого является режущая головка в данной установке. Величина амплитуды колебания её напрямую влияет на точность обработки. При анализе параметров были рассмотрены жесткости: передачи винт гайки, направляющей и установочной платформы. Сила резания рассматривается как величина постоянная. Сила резания зависит от скорости вылета струи, давление и плотности смеси воды с абразивом. Изменяя данные параметры сила резания может меняться в пределах малых значений.

Масса самой заготовки в данной системе также играет очень важную роль. Некоторые заготовки на установочной платформе при гидроабразивной обработке не закрепляются, то есть в таком случае жесткость установочной платформы остаётся неизменной. Но если масса заготовки недостаточная и вызывает большие колебания в системе, то необходимо закрепить заготовку на установочной платформе. В данной ситуации жесткость установочной платформы в разы увеличивается. Целью изучения влияния массы заготовки на колебания самой заготовки в данной системе, были рассмотрены разные заготовки на установочной платформе. На рисунках 51, 52 и 53 приведены графики перемещения и скорости первого и четвертого тела при оптимальных вариантах параметров при массе заготовки соответственно 50 кг, 100 кг и 500 кг.

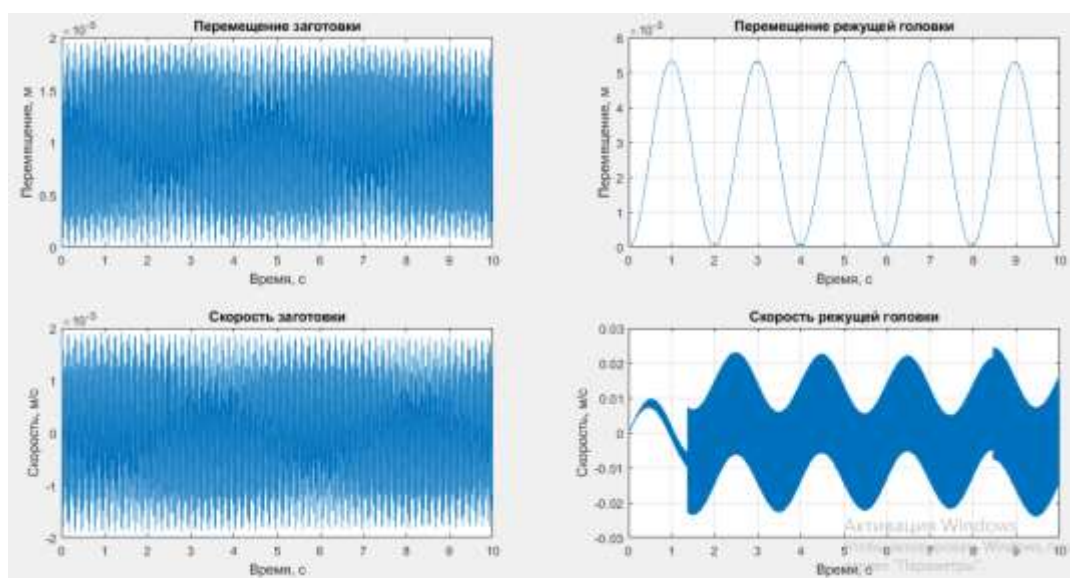


Рисунок 51 – Графики перемещения и скорости заготовки режущей головки при оптимальных вариантах параметров при массе 50 кг

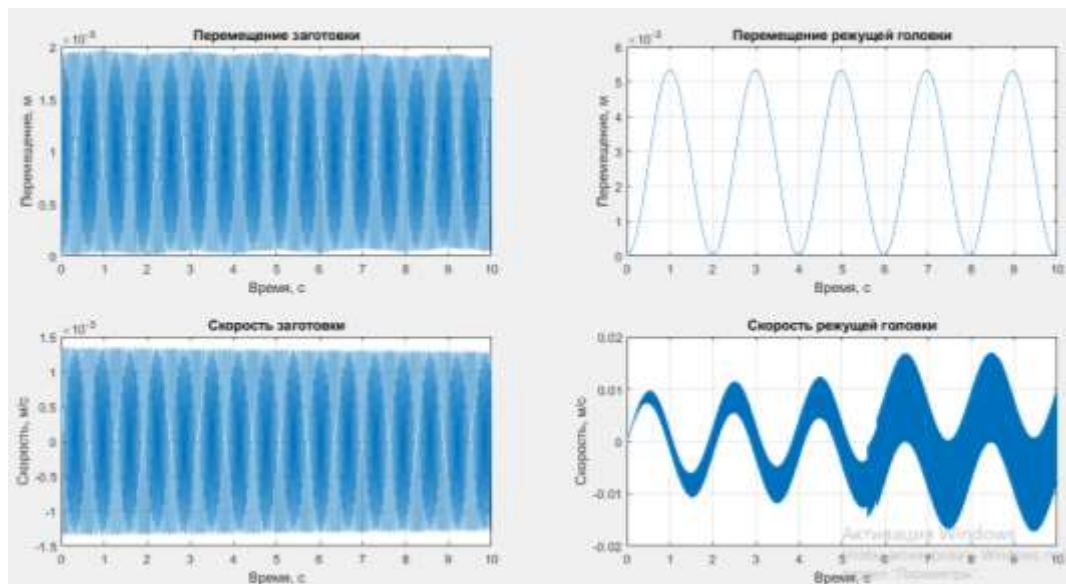


Рисунок 52 – Графики перемещения и скорости заготовки, режущей головки при оптимальных вариантах параметров и массе 100 кг

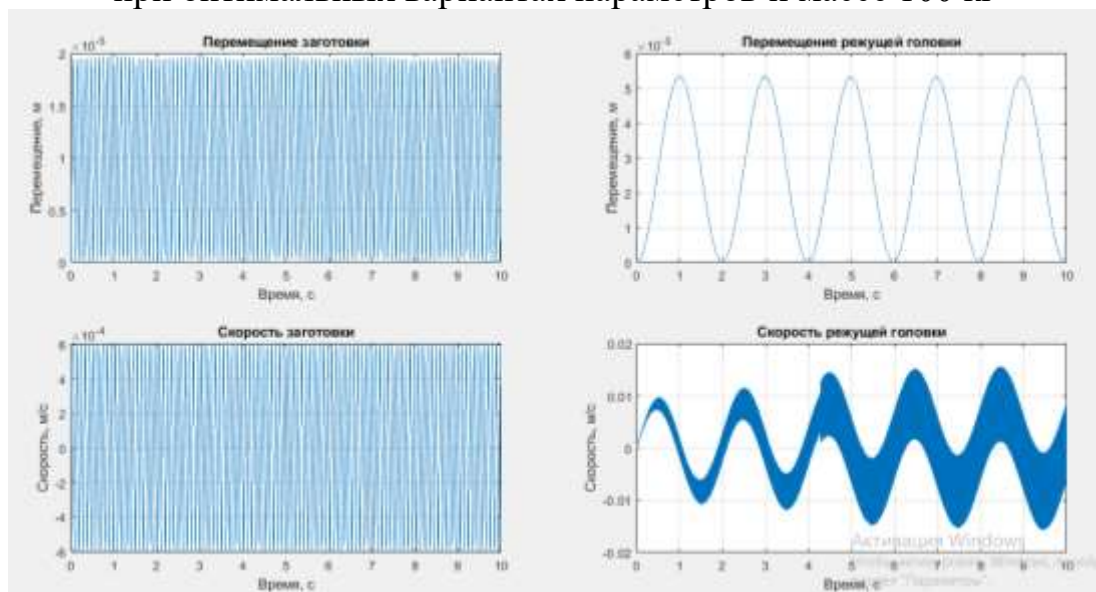


Рисунок 53 – Графики перемещения и скорости заготовки, режущей головки при оптимальных вариантах параметров и массе 500 кг

Таким образом, увеличение жесткости направляющей, установочной решетки и изменения конструкции режущей головки приведет к уменьшению колебания заготовки на установочной платформе и режущей головке. Именно оптимизация параметров данных элементов в конструкции гидроабразивной установки приведет к повышению точности и качества обработки.

## 4.2 Результаты исследования точность и качество деталей, полученных на гидроабразивной установке

На качество обработки при гидроабразивной резке влияют возникающие погрешности при гидроабразивной обработке, которые являются значимым фактором в формировании погрешностей последующей обработки изделия (технологическая наследственность).

В экспериментальном исследовании на примере детали «Подвес» были рассмотрены точность и качество детали на установочной платформе в двух зонах резания. Более точные детали были получены в первой зоне где устройство перемещения режущей головки имеет наибольшую жесткость. На качество детали в том числе на параметры шероховатости поверхности деталей, полученных на установке гидроабразивной резки, влияет давление струи, скорость вылета струи, и качество абразива. От качества абразива зависит плотность жидкости, то есть смеси воды с абразивом которые в данной системе является режущей головкой.

Анализируя особенности конструкции, технологические свойства гидроабразивной резки, можно отметить что точность изготовления детали при ГАР это многофакторная величина. Поэтому необходимо оптимизировать параметры, которые больше всего влияют на точность обработки.

Из проведенного исследования на примере детали «Стенка передняя» было выявлено, что точность обработки при гидроабразивной резке прежде всего зависит от жёсткости технологической системы, а именно от жёсткости портальной системы перемещения по оси X и Y. В других работах были рассмотрены статистические жёсткости системы перемещения гидроабразивной резки. А в данном эксперименте были получены наиболее точные детали в зоне с высокой жёсткостью перемещения установки. То есть точность обработки в данном случае это переменная величина, которая прежде всего зависит от жёсткости технологической системы. Также было выявлено, что жёсткость системы перемещения гидроабразивной резки по оси X влияет больше, чем по оси Y, потому что



полученные отверстия по оси  $Y$  характерно похожи, а по оси  $X$  зависимости от жёсткости системы изменяются.

#### 4.3 Повышение точности и качества деталей, полученных на установке гидроабразивной резки

Повышение точности и качества обработки детали полученных на гидроабразивной установке является комплексным решением. Исходя из теоретического исследования, разработанной математической модели и исследования параметров, влияющих на колебания заготовки с массой  $m_1$  и режущие головки с массой  $m_6$  можно отметить, что для минимизации параметров колебания в процессе гидроабразивной резки необходимо увеличить жесткость направляющих на 50%, жесткость передачи винт-гайки на 50%, и жесткость установочной платформы на 100%. Именно данные параметры оказывает большое влияние на поведение системы в математической модели.

В данной работе при исследовании математического моделирования гидроабразивной установки была учтена жесткость передачи винт-гайки как суммарная жесткость элементов режущей головки. Для увеличения жесткости можно применить передачу винт-гайки скольжения. Применение передачи винт-гайки скольжения в начале работы установки будет оптимальная, но как только происходит изнашивание узлов элементов, входящих в состав, режущей головки передача начинает возбуждаться. Соответственно ресурс передачи винт-гайки скольжением намного меньше, чем передачи винт-гайка качения. Поэтому жесткость существующей конструкции можно увеличить за счет: изменения габаритов передачи винт-гайки качения, увеличения количества шариков, шаг винта.

Жесткость установочной решетки можно увеличить за счет изменения конструкции самой решетки. В данный момент решетка состоит из пластины и уголков, которые механическим способом соединяются между собой. При модернизации данной конструкции можно применить сварные соединения вместо механических. Также можно поменять пластина и уголки на более жесткие элементы.

Масса самой установочной решетки оказывает небольшое влияние на поведение данной вибрационной системы.

Для повышения точности и улучшения качества обработки при гидроабразивной резке необходимо обеспечить равномерную жёсткость системы или в зависимости от жёсткости системы изменить режимы резания. Введение коррекции отклонения режущей струи при ГАР на разных зонах резания позволит повысить точность изготовления и качество поверхности получаемого изделия.

## 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НИ, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

1. Дать оценку коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.
2. Планировать научно-исследовательских работ.
3. Выполнить расчет бюджета научно-исследовательской работы.
4. Определить ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Процесс управления любым проектом охватывает три периода: разработка проекта, организационное управление проектом; и функциональное управление проектом. Чаще всего в процессе освоения проектного метода основной акцент ставится на этап разработки проектом, цель которого и состоит в том, чтобы сформулировать его концепцию, разобрать его основные структурные элементы, провести анализ и сформировать план проекта. Естественно основной задачей этого раздела является выявление и разработка наиболее эффективных проектных решений.

### 5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований

#### 5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Технология гидроабразивной резки благодаря своим уникальным свойствам и универсальности, находит свое применение в различных отраслях про-

мышленности, в изготовлении художественных изделий, строительстве, производстве рекламной продукции.

Потенциальными потребителями результатов исследования являются коммерческие организации, в которых ведётся производство различных конструкции и требуется резка материалов со сложными формами.

Также к потребителям данных исследований можно отнести, предприятия по производству строительных материалов и обработкой стекла.

В таблице 1 приведены основные сегменты рынка, которые могут быть заинтересованы в приобретении данной технологии, по следующим критериям: тип серийности производства и сферы применение ГАР.

Таблица 16 – Карта сегментирования рынка

		Сферы применение							
		Машино-строение	Авиационная и аэрокосмическая промышленность	Жилищное и промышленное строительство	Электротехническая промышленность	Инструментальное производство	Резинотехническая промышленность	Производство пищевого и торгового оборудования	Стекольная промышленность
Тип производства	Крупные	-	+	+	+	-	-	+	-
	Средние	+	+	+	+	+	-	+	+
	Мелкие	+	+	+	+	+	+	-	+

### 5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Конкуренция служит важнейшим способом повышения эффективности, как целой экономической системы, так и всех ее звеньев [33]. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам.

Данный анализ проводится с помощью оценочной карты (таблица 2), в которой рассматриваются разработанное и две конкурирующие установки:

- K1, установка лазерной резки TF3015EDGE;
- K2, установка плазменной резки модели Start L50.

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_j, \quad (29)$$

где  $K$  – конкурентоспособность проекта;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_j$  – балл показателя.

Таблица 17 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{K1}$	$B_{K2}$	$K_{\phi}$	$K_{K1}$	$K_{K2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,15	5	4	4	0,75	0,6	0,6
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
3. Энергоэкономичность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
4. Надежность	0,07	5	5	5	0,35	0,35	0,35
5. Уровень шума	0,05	4	5	5	0,2	0,25	0,25
6. Безопасность	0,15	5	4	4	0,75	0,6	0,6
7. Потребность в ресурсах памяти	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
8. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,07	5	5	5	0,35	0,35	0,35
9. Простота эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
10. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
3. Цена	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	10	10	10	1	1	1
6. Финансирование научной разработки	0,03	5	5	5	0,15	0,15	0,15
7. Срок выхода на рынок	0,04	5	4	4	0,16	0,16	0,16
Итого	1	34	33	32	1,5	1,46	1,41

По результатам оценочной карты можно убедиться, что в сравнении с конкурирующими установками рассматриваемой установки является эффективней по техническим и экономическим критериям. Конкурентными преимуществами разработки являются: модульность конструкции, многооперационность, низкая цена и как следствие высокая конкурентоспособность.

### 5.1.3 SWOT – анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно- исследовательского проекта. Такой метод применяют для исследования внутренней и внешней среды проекта. Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон, возможностей и угроз для реализации проекта (таблица 18).

Таблица 18 – Матрица SWOT

Внутренняя среда	<b>Сильные стороны:</b>	<b>Слабые стороны:</b>
	С1. Снижение себестоимость и повышения производительность. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4. Востребованность рынка в данном оборудовании С5. Использование ресурсов (материалы) мировых лидеров. С6. Уникальность технологии, широкая область применения.	Сл1. Угроза со стороны крупных зарубежных компаний. Сл2. Единичное (мелкосерийное) производство. Сл3. Слабая маркетинговая политика. Сл4. Высокая стоимость по сравнению с отечественными аналогами, ввиду применения импортных комплектующих. Сл5. Полная зависимость от импортных ресурсов.
Внутренняя среда	<b>Возможности:</b>  В1. Взаимоотношения с поставщиками комплектующих деталей; используемых ресурсов. В2. Возможность быстрого роста и развития. В3. Повышение стоимости конкурентных разработок. В4. Появление дополнительного спроса на новый продукт. В5. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.	<b>Угрозы:</b>  У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Увеличение конкуренции. У3. Введение ограничений на ввоз импортной продукции на территорию РФ

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивные матрицы проекта (таблицы 19, 20, 21, 22).

Таблица 19 – Интерактивная матрица проекта для сильных сторон и возможностей

		Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	B1	+	-	+	+	+	-
	B2	+	0	+	+	+	+
	B3	+	0	+	0	+	+
	B4	+	+	+	+	0	+
	B5	+	+	+	0	-	+

Таблица 20 – Интерактивная матрица проекта для слабых сторон и возможностей

		Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	+	+	0	+	+
	B2	+	-	+	+	+
	B3	+	-	0	+	+
	B4	-	+	-	-	+
	B5	-	-	+	-	0

Таблица 21 – Интерактивная матрица проекта для сильных сторон и угроз

		Сильные стороны проекта					
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	У1	0	-	+	+	+	0
	У2	+	+	+	0	+	+
	У3	-	-	+	+	+	-

Таблица 22 – Интерактивная матрица проекта для слабых сторон и угроз

		Сильные стороны проекта				
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	+	+	+	+	0
	У2	0	+	-	+	+
	У3	-	-	-	+	+

На третьем этапе составлена итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 23).

Таблица 23 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Снижение себестоимость и повышения производительность.</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Востребованность рынка в данном оборудовании</p> <p>С5. Использование ресурсов (материалы) мировых лидеров.</p> <p>С6. Уникальность технологии, широкая область применения.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Угроза со стороны крупных зарубежных компаний.</p> <p>Сл2. Единичное (мелкосерийное) производство.</p> <p>Сл3. Слабая маркетинговая политика.</p> <p>Сл4. Высокая стоимость по сравнению с отечественными аналогами, ввиду применения импортных комплектующих.</p> <p>Сл5. Полная зависимость от импортных ресурсов.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Взаимоотношения с поставщиками комплектующих деталей; используемых ресурсов.</p> <p>В2. Возможность быстрого роста и развития.</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p> <p>В4. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В5. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p>	<p>На основании продуктивных взаимовыгодных отношений с потребителями можно добиться развития и роста как проекта, так и компании. Также стремительное развитие проекта может быть достигнуто благодаря возможности создания конфигураций и соединений реальных узлов, что может заинтересовать компании, занимающиеся производством данных узлов, а также востребованность рынка в данном оборудовании и использование комплектующих мировых лидеров.</p>	<p>Взаимоотношения с поставщиками комплектующих деталей может упростить приобретение деталей для установки и сэкономить часть финансовых средств. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ, а также программа по импортозамещению может привести к снижению себестоимости станда.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Увеличение конкуренции.</p> <p>У3. Введение ограничений на ввоз импортной продукции на территорию РФ</p>	<p>Взаимоотношения с потребителями и возможность создания конфигураций и соединений реальных узлов могут избавить от угрозы отсутствия потребности в устройстве и угрозы переманивания конкурентами. Востребованность рынка в данном оборудовании может привести к большому количеству заказов и компенсировать недостаток финансирования проекта.</p>	<p>Слабая маркетинговая политика, угроза со стороны крупных зарубежных компаний, полная зависимость от импортных комплектующих и высокая стоимость по сравнению с отечественными аналогами может повлечь за собой снижение спроса на разработку и как следствие приведет к нестабильному финансированию.</p>



#### 5.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в табл. 24.

Таблица 24 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	4
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	4	4
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	5
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	5	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	4
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	<b>59</b>	<b>62</b>

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю составляем оценку по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. При оценке степени проработанности научного проекта:

- 1 балл означает не проработанность проекта,
- 2 балла – слабую проработанность,
- 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен,
- 4 балла – выполнено качественно,
- 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта.

Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид:

- 1 означает не знаком или мало знаю,
- 2 – в объеме теоретических знаний,
- 3 – знаю теорию и практические примеры применения,
- 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю,
- 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (30)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Перспективность данной разработки можно считать выше среднего так как  $B_{\text{сум}}$  получилось от 59 до 45.

## 5.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения данного научного исследования необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и исследователь. Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы.

Разработанный список задач и производимых работ, в рамках проектирования, а также распределение исполнителей по этим работам, представлен в виде таблицы 25.

Таблица 25 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
1	2	3	4
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель Исследователь
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Исследователь
	4	Календарное планирование работ по проекту	Руководитель
Составление обзор литературы и теоретическое исследование	5	Изучение истории технологии ГАР	Исследователь
	6	Анализ ресурсов используемых при гидроабразивной обработки	
	7	Определение объект и методов исследования	Руководитель Исследователь
	8	Моделирование установки гидроабразивной резки	Исследователь

Продолжение таблицы 25

1	2	3	4
Выполнение экспериментальной части	9	Проведение исследование точности и качества детали «Подвес» на гидроабразивной обработки при разных режимах	Исследователь
	10	Проведение исследование точности и качества детали «Стенка передняя», полученная на гидроабразивной обработки	Исследователь
	11	Проведение экспериментальных исследований по определению статистической жесткости системы гидроабразивной установки	Исследователь
	12	Проведение экспериментальных исследований по изучению динамики гидроабразивной установки	Исследователь
Подведение результатов НИ	13	Проведение экспериментальных исследований точности и качество после введение коррекции на примере призмы	Исследователь
Контроль и координирование НИ	14	Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	Руководитель
Разработка технической документации и проектирование НИ	15	Технико-экономические расчеты	Исследователь
	16	Оформление технической документации	Исследователь

### 5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Для удобства построения диаграммы Гранта, которая представляет ленточный график работ, представленных отрезками во времени, необходимо перевести длительность каждого из этапов работ из рабочих дней в календарные дни. Для этого необходимо рассчитать коэффициент календарности для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя исследователя) по следующей формуле:

$$k_{\text{кал.ис.}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 104 - 14} = 1,475 \quad (31)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году,  $T_{\text{вых}}$  – количество выходных

дней в году,  $T_{пр}$  – количество праздничных дней в году.

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$k_{\text{кал.рук.}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 53 - 14} = 1,224$$

Ниже приведен пример расчёта временных показателей проведения научного исследования для первого этапа работы, остальные выполняются аналогично. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоёмкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} \quad (32)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоёмкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;  $t_{\text{mini}}$  – минимально возможная трудоёмкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;  $t_{\text{maxi}}$  – максимально возможная трудоёмкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн (так как исполнители работали одновременно, то минимально и максимально возможную, а также ожидаемую трудоёмкость учитываем общими для исполнителей).

На основании расчетов ожидаемой трудоёмкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (33)$$

Где  $Ч_i$  – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

Длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (34)$$

где,  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;  
 $T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях.

По полученные данные, коэффициенты и формулы в программе Excel выполняем расчеты для каждой работы. Все полученные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 26.

Таблица 26 – Временные показатели НИ

№ раб.	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ож}$ , чел-дни					
	Руководитель	Исследователь	Руководитель	Исследователь	Руководитель	Исследователь	Руководитель	Исследователь	Руководитель	Исследователь
1	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	2	-
2	3	3	6	6	4,2	4,2	2,1	2,1	3	3
3	-	7	-	10	-	8,2	-	8,2	-	12
4	-	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	3
5	-	3	-	6	-	4,2	-	4,2	-	6
6	-	3	-	6	-	4,2	-	4,2	-	6
7	3	3	6	6	4,2	4,2	2,1	2,1	3	3
8	-	7	-	10	-	8,2	-	8,2	-	12
9	-	7	-	14	-	9,8	-	9,8	-	14
10	-	7	-	21	-	12,6	-	16,8	-	25
11	-	14	-	21	-	16,8	-	16,8	-	25
12	-	7	-	14	-	9,8	-	9,8	-	14
13	-	14	-	21	-	16,8	-	16,8	-	25
14	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	3	-
15	-	2	-	5	-	3,2	-	3,2	-	5
16	-	7	-	14	-	9,8	-	9,8	-	14
Итого:								11	168	

На основе таблицы 26 построим план-график работ (диаграмма Ганта). Диаграмма Ганта строится по длительности исполнения работ в рамках НИ с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения.

Таблица 27 – Календарный план-график проведения НИ

№ раб.	Исполнители	T <sub>кi</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																				
			ноябрь			декабрь			янв.	февраль			март			апрель			май			июнь	
			1	2	3	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Рук.	2	■																				
2	Рук. / Исслед.	3/3	■	■																			
3	Исслед.	12		■	■																		
4	Исслед.	3			■																		
5	Исслед.	6				■																	
6	Исслед.	6					■																
7	Рук. / Исслед.	3/3					■		■														
8	Исслед.	12						■															
9	Исслед.	14							■														
10	Исслед.	25								■	■	■											
11	Исслед.	25										■	■	■									
12	Исслед.	14												■	■	■							
13	Исслед.	25														■	■	■	■				
14	Рук.	3																				■	
15	Исслед.	5																					■
16	Исслед.	14																					■

### 5.3 Бюджет научного исследования

#### 5.3.1 Расчет материальных затрат

Данный пункт включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта. В таблице 28 приведены материальные затраты, для проведения ряд экспериментов.

Таблица 28 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Абразив	MESH 80			945
Специальное приспособление		1	200	200
Профилометр	TQC SP1560	1	26 718	26 718
Штангенциркуль	DR.IRON DR6001	1	464	464
Индикатор часового типа	ИЧ 0-10 0.01 с ушком Эталон	3	1199	3597
Штатив магнитного типа ШМ	CZ-6CO	3	1142	3426
Набор инструментов	Gigant 131ЭТО	1	13800	13800
Всего за материалы				49150
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				19660
Итого по статье $C_m$				68810

#### 5.3.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения НИ.



Таблица 30 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для НИ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1.	Анализатор вибрации АГАТ-М, Балансировочный прибор	1	327,6	327,6
2.	Вибропреобразователь общего назначения «AP2082М-100»	2	58,5	117
Итого:				444,6

### 5.3.3 Расчет амортизации специального оборудования

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Таблица 31 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Анализатор вибрации АГАТ-М, Балансировочный прибор	1	5	327,6	327,6
2	Вибропреобразователь общего назначения «AP2082М-100»	2	5	117	117
3	Установка гидроабразивной резки модели Теспусит Idro Line 1740	1	10	17 600	17 600
Итого:					18 044,6 тыс. руб.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (35)$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (36)$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Рассчитаем амортизацию для Анализатора вибрации АГАТ-М, с учётом, что срок полезного использования 5 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0,2$$

Рассчитаем амортизацию для Установки гидроабразивной резки, с учётом, что срок полезного использования 10 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{10} = 0,1$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Анализатора вибрации:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot 1 = \frac{0,2 \cdot 327600}{12} \cdot 0,5 = 2730.$$

Вибропреобразователь:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot 1 = \frac{0,2 \cdot 117000}{12} \cdot 0,5 = 975.$$

Установки гидроабразивной резки:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot 1 = \frac{0,1 \cdot 17600000}{12} \cdot 3 = 439999,9.$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A=2730+975+439\,999,9=443\,704,9$$

#### 5.3.4 Расчет основной заработной платы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (37)$$

где  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (табл. 8).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.},$$

где  $Z_{\text{м}}$  – должностной оклад работника за месяц;  $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (табл. 16);  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

- при отпуске в 28 раб. дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней –  $M = 10,3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{214} = 1734,9 \text{ руб.}$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

Для инженера (исследователя):

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.},$$

где  $Z_{\text{мс}}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 32 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исследователь
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней	53/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	214

Таблица 33 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{np}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m, руб$	$Z_{он}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	11	23620,3
Исследователь	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1734,9	168	291967,2
Итого:								315 587,6

### 5.3.5 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 23620,3 = 3543 руб..$$

Для инженера (исследователя):

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 291967,2 = 43795,1 руб..,$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии выполнения НИ принимаем равным 0,15).

### 5.3.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (23620,3 + 3543) = 8149 руб.$$

Для инженера (исследователя):

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (291967,2 + 43795,1) = 100728,7 руб.$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

### 5.3.7 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как: печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

Накладные расходы в целом:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 6) \cdot k_{\text{нр}} = 990\,856,1 \cdot 0,2 = 198\,171,2 \text{ руб.}$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 34.

Таблица 34 – Группировка затрат по статьям

Статьи								
Сырье, материалы	Специальное оборудование	Амортизация	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
68810	444600	443 704,9	315 587,6	47 338,1	108 877,7	1 272 702,5	254540,5	1 527 243

### 5.4 Определение ресурсоэффективности научного исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (38)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

В качестве максимальной стоимости исполнения научно-исследовательского проекта принимается минимальный размер гранта на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными - кандидатами наук в научных организациях РФ, так как аналогичные научные исследования ранее не проводились.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{1527243}{2000000} = 0,76$$

Таким образом, эскалация важности научных грантов вызвана с их экономическим значением, поскольку в первую очередь они служат специальным механизмом финансирования исследований, который играет жизненно важную роль для научных сообществ. Задача грантовой поддержки научных исследований была сформулирована в Стратегии инновационного развития Российской Федерации (РФ) на период до 2020 года [13]. Помимо этого, федеральный закон «О науке и государственной научно-технической политике» закрепил цель государственной научнотехнической политики, а именно: «развитие, рациональное размещение и эффективное использование научно-технического потенциала, увеличение вклада науки и техники в развитие экономики государства, реализации важнейших социальных задач, преобразование материального производства и интеграция науки и образования».

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. По результатам проведенного анализа конкурентных технических реше-

ний можно отметить, что гидроабразивная установка является наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 179 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 168 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель - 11;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 1 527 243 руб;

4. Главным преимуществом научного исследования является то, что подобные исследования по повышению точности гидроабразивной обработки, оптимизации параметров и возможности применения в различных отраслях не приведены. По интегральным финансовым показателям можно отметить, что научное исследование эффективный и в этой связи поддержка научного исследования может являться грантом на выполнение проектов фундаментальных научных исследований. Данный способ является самым быстрым и простым для реализации данного научного исследования.

## 6 Социальная ответственность

Любое предприятие должно создать возможности и разработать механизмы поддержки, необходимые для осуществления своей экологической политики и достижения целевых и плановых показателей [35]. Особое внимание должно быть обращено на работу экспертов в области экологии, их профессиональную компетенцию.

Реальные условия труда характеризуются различными вредными и опасными факторами [36]. Между опасными и вредными факторами не существует чёткой границы, каждый фактор может рано или поздно привести к потере здоровья или к несчастному случаю.

Для недопущения несчастных случаев и вреда здоровью, рабочее место должно быть спроектировано с соблюдением всех законодательных норм и правил, ГОСТов, СНиПов и Федеральных законов.

Данный раздел включает в себя описание и влияние на человека опасных и вредных факторов при исследовании проекта на тему «Исследование влияния системы СПИД на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки». Целью данного раздела является выявление возможных вредных и опасных факторов процесса разработки проекта, а также разработка мероприятий по предотвращению негативного воздействия на здоровье инженера, занимающегося разработкой проекта и эксплуатацией оборудования в процессе исследования.

### 6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Охрана труда – это система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности. Включает в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные мероприятия. Основные документы в области охраны труда: Конституция РФ; Трудовой кодекс РФ.



Обязанности руководителя: обеспечение безопасных условий труда, обеспечение средствами индивидуальной защиты (СИЗ), обучение и инструктаж, аттестация рабочих мест, проведение медосмотров, расследование несчастных случаев, обязательное социальное страхование от несчастных случаев.

Права работника: на рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда, обязательное социальное страхование, отказ от выполнения работы в случае возникновения опасности, компенсация, установленная законом за вредные условия труда;

- Федеральный закон «Об основах охраны труда в РФ»;
- Федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве»;
- Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»;
- Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»;
- Федеральный закон «О пожарной безопасности».

Государственные нормативные акты:

ГОСТ, СН (санитарные нормы), СНиП (строительные нормы и правила), СанПиН (санитарные правила и нормы), ГН (гигиенические нормы), ПУЭ (правила устройства электроустановок); ГОСТы.

В соответствии с Трудовым кодексом государственное управление охраной труда осуществляется правительством РФ и по его поручению федеральными органами муниципальной власти. Принципы управления: предупреждение травматизма и профессиональных заболеваний, обеспечение гарантий прав работников на охрану труда, обязательное социальное страхование [37]. Основные цели: реализация государственной политики, создание безопасных условий труда, защита интересов работника пострадавшего от несчастных случаев, взаимодействие и сотрудничество работодателей, государственных органов, профсоюзов и т.д. в области охраны труда.

## 6.2 Производственная безопасность

В данном пункте рассматриваются опасные и вредные факторы (ГОСТ 12.0.003-2015), которые могут возникнуть во время разработки, изготовления и испытания гидроабразивных установок. Перечисленные факторы приведены в таблице 34.

Таблица 35 – Вредные и опасные факторы при разработке и выполнении работ

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Раз- ра- ботк а	Из- го- тов- ле- ние	Экс- плу- ата- ция	
<b>Вредные факторы</b>				
1. Отклонения показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
2. Превышение уровня шума			+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
3. Повышенный уровень вибрации			+	СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
5. Психофизиологические производственные факторы	+	+	+	Трудовой кодекс РФ
<b>Опасные факторы</b>				
1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека		+	+	ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
2. Движущиеся части гидроабразивной установки			+	ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам.

## 6.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов

### 6.3.1 Микроклимат

Требования к метеорологическим условиям регламентируют Санитарные правила и нормы – СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений», которые устанавливают оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата для рабочей зоны закрытых производственных помещений с учетом характеристики трудового процесса, тяжести выполняемой работы, времени пребывания на рабочем месте и периодов года, а также методы измерения и оценки этих показателей на действующих предприятиях.

Показатели микроклимата должны обеспечивать хранения теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма.

В результате терморегуляции происходит изменение обмена веществ и в зависимости от температуры окружающей среды повышается или понижается уровень тепловыделений. Интенсивность обмена веществ и уровень тепловыделений существенно не изменяются при температуре воздуха 15...20°C и относительной влажности 35...70%. При гидроабразивной обработки необходимо контролировать относительной влажности воздуха, так как величина относительной влажности воздуха изменяется в процессе работы гидроабразивного станка.

Оптимальные и допустимые абсолютные величины показателей микроклимата выбираются в последовательности, указанной в зависимости от следующих факторов.

Первоначально устанавливаются характеристика трудового процесса, и если трудовой процесс вызывает нагрузку преимущественно на центральную нервную систему (напряженности труда), то в помещении должны обеспечи-

ваться оптимальные показатели микроклимата А1. Если установленная характеристика отражает преимущественно нагрузку на опорно-двигательный аппарат (тяжесть труда), то в помещении могут быть обеспечены допустимые показатели микроклимата А 2.

Таблица 36 – Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочем месте

Наименование	Оптимальная		Допустимая	
	Зимний период	Летний период	Зимний период	Летний период
Температура,	17-19	19-21	15-25	16-27
Относительная влажность, %	60-40	60-40	15-75	15-75
Скорость движения воздуха, м/с	0,2	0,2	0,4	0,5

### 6.3.2 Уровень шума на рабочем месте

Основные источники шума при гидроабразивной обработке можно разделить на 5 групп: Передачи – главного и вспомогательного движения, коробки передач; Гидравлические агрегаты; Электродвигатели; Направляющие трубы; Прочие резания.

Кроме того, источником шума являются: подшипники; передачи винт-гайка; кулачковые механизмы; дисковые муфты.

Насосы и электродвигатели должны монтироваться на виброизоляторах. Самым эффективным методом снижения шума при обработке металлов резанием является оснащение станка подвижными кожухами, герметично закрывающими зону резания. Обычные кожухи изготавливаются из листового железа, предназначены они только для защиты оператора от попадания эмульсии и стружки. Звукоизолирующий кожух состоит из 2-х слоев листового железа, между которыми находится демпфирующий материал. Места контакта кожуха уплотнены вибропоглощающим материалом.

Кожухи и ограждения на станке, предназначенные для устранения случайного контакта человека с подвижным механизмом, необходимо выполнять гер-

метичными, стенки должны быть многослойными или иметь демпфирующее покрытие.

При гидроабразивной обработки расстояние сопло до заготовки определяет уровень шума, чем больше расстояние до заготовки, тем больше будет уровень шума. Как правило, уровень шума в процессе гидроабразивной резки составляет 80-85 Дб.

При ГАР возникают гидродинамические шумы возникают вследствие: нестационарных процессов в жидкостях (кавитация, турбулентность потока, гидравлический удар).

Меры борьбы: улучшение гидродинамических характеристик насосов; выбор оптимальных режимов работы; при гидроударах – правильное проектирование и эксплуатация гидросистемы.

В установке гидроабразивной резки применены плунжерные насосы высокого давления. При работе насосов возникают электромагнитные шумы. Причины – взаимодействие ферромагнитных масс под влиянием переменных магнитных полей.

Меры защиты: конструктивные изменения в электромашинах, например, изготовление скошенных пазов якоря ротора; в трансформаторах; более плотная прессовка пакетов, использование демпфирующих материалов.

Поэтому, согласно СП 51.13330.2011 при разработке технологических процессов, проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, при организации рабочих мест следует принимать все необходимые меры по снижению шума, воздействующего на человека, до значений, не превышающих допустимые.

Поскольку уровень шума будет постоянно варьироваться при работе гидроабразивной установки, то были предусмотрены индивидуальные средства защиты, которые предупреждают расстройства органов слуха и нервной системы организмы. В качестве таких средств были использованы беруши и наушники.

### 6.3.3 Уровень вибрации на рабочем месте

Вибрация – механические колебания упругих тел или колебательные движения механических систем. По характеру действия на организм человека вибрацию подразделяют на общую (действует на всё тело) и местную (действует только на руки рабочего).

При работе особенно, когда режущий инструмент – струи воды под углом происходит отклонение всех элементов системы от центральной оси координаты ненагруженного станка [38]. Чем выше жесткость узлов станка и обрабатываемой детали, тем меньше величина их отклонений и тем лучше качество обработки: форма детали и шероховатость максимально приближены к заданным значениям. Жесткость системы также ограничивает максимальную массу заготовки.

При недостаточной жесткости возникают вибрации, станок начинает «дробить», что приводит к понижению качества обработки. При этом, не всегда справедливо, что чем больше усилие резки, тем выше погрешность обработки. Вибрация может появляться и из-за сильного занижения рекомендованных технологией режимов резки.

Присутствующий вид вибрации во время работы станка относится к 3 категории общей вибрации на постоянных рабочих местах. В таблице 37 приведены допустимые значения для данной категории согласно СН 2.2.4/2.1.8.566–96.

Таблица 37 – Предельно допустимые значения производственной локальной вибрации.

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	ПДУ виброускорения		ПДУ виброскорости	
	м/с <sup>2</sup>	дБ	м/с*10 <sup>-2</sup>	дБ
8	1,4	123	2,8	115
16	1,4	123	1,4	109
31,5	2,8	129	1,4	109
63	5,6	135	1,4	109
125	11	141	1,4	109
250	22	147	1,4	109
500	45	153	1,4	109
1000	89	159	1,4	109

Все элементы в конструкции гидроабразивной установки не превышают норму по ПДУ. Однако при работе из-за режимов резки при гидроабразивной обработке возможно превышаются норма по ПДУ. Для уменьшения вибраций рассматривается:

- оптимизации режимов резки;

- увеличение жесткости конструкции, особенно направляющей.
- периодический контроль рабочей среды: качества абразива и воды.

#### 6.3.4 Освещенность на рабочем месте

Оптимальные условия работы на рабочем месте могут быть обеспечены лишь при достаточном освещении. Естественное и искусственное освещение должно соответствовать требованиям СНиП 23–05–95. Величина коэффициента естественного освещения (КЕО) для различных помещений лежит в пределах от 0,1 до 12%.

В производственных помещениях, где установлены гидроабразивной установки следует применять совмещенное освещение.

Помещение имеет параметры: длина –  $B=8$  м; ширина –  $A=10$  метров; высота –  $H=3,5$  метра; рабочая плоскость находится на уровне  $d=1$  м; свес светильника –  $m=0,5$  м; коэффициенты отражения потолка –  $a=50\%$ , стен –  $b=30\%$ , пола –  $c=10\%$ ; расстояние между светильниками –  $h=H-d-m=5$  м.

Рассчитаем площадь помещения:

$$S=A \cdot B=10 \cdot 8=80 \text{ м}^2 \quad (39)$$

Индекс помещения находится по формуле:

$$i = \frac{S}{(A+B) \cdot h} = \frac{80}{(10+8) \cdot 5} = 0,9 \quad (40)$$

По индексу помещения и коэффициентам отражения, находим коэффициент использования светового потока  $\chi=36\%$ . Количество принятых светильников  $N=12$ . Коэффициент минимальной освещенности принять за  $z=1,1$ . По СП 52.13330.2016 нормируемая освещенность составляет  $E_n=750$  лк, коэффициент запаса  $k_3=1,6$ .

Вычислим световой поток для создания требуемого освещения:

$$\Phi_{л} = \frac{E_n \cdot S \cdot k_3 \cdot z}{10 \cdot 0,36} = 29333,33 \text{ лм} \quad (41)$$

Световой поток для одного светильника равен:

$$\Phi_{л1} = \frac{\Phi_{л}}{N} = \frac{29333}{12} = 2444,44 \text{ лм} \quad (42)$$

Выберем люминесцентную лампу типа OSRAM Basic 640, G13, T8, 36Вт со значением светового потока 3350 лм в количестве 12 штук для обеспечения нормы освещения в аудитории. Схема расположения ламп приведена на рис. 1.

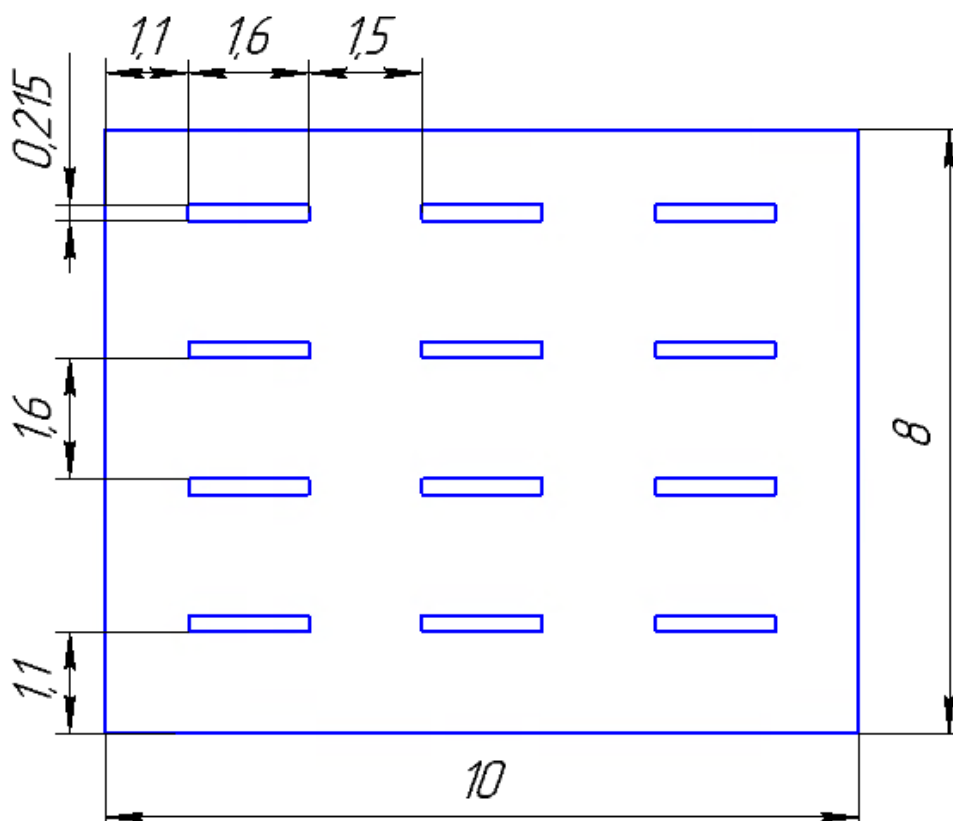


Рисунок 54 – Схема расположения ламп (размеры в м)

### 6.3.5 Электробезопасность

Электрический ток поражение электрическим током может привести к серьёзным травмам и смерти человека. Все металлорежущее оборудование должно быть надёжно заземлено, токоведущие провода и кабели надо изолировать. При возникновении в электрической сети опасности поражения человека током применяется защитно-отключающее устройство [34]. Недоступность токоведущих частей электроустановок обеспечить размещением их на необходимой высоте, ограждением от случайных соприкосновений. Поддоны так же являются средством защиты от электрического поражения.



#### 6.4 Требования во время работы гидроабразивного станка

Оператор гидроабразивной установки должен предварительно пройти медицинский осмотр, обучение и аттестацию, инструктаж по ТБ. Рабочее место должно быть оборудовано следующим образом:

Работник должен быть защищен специальной одеждой и средствами индивидуальной защиты. Перед началом работы проверяют исправность заземления, работу вентиляции. Не допускается использовать свет с напряжением больше 36 В.

Производственный стол и стеллаж должны быть устойчивыми, оборудование прочно закреплено. Рядом отсутствуют посторонние предметы, которые не участвуют в резке металла.

Во время гидроабразивной резки необходимо: быть только в спецодежде и со средствами защиты; работать с ограждающими и блокировочными устройствами, при достаточной освещенности; не подходить к поднятым грузам, не входить в зону резки непосредственно во время процесса; не резать материалы, образующие пыль, пары или вещества, опасные для жизни во время резки; вращающиеся и движущиеся части не трогать, токоведущие элементы должны быть полностью изолированы.

Требуется ежедневная и плановая диагностика состояния оборудования, подробный периодический инструктаж. Без прохождения инструктажа по технике безопасности допускать человека на рабочем месте недопустимо.

При аварийных ситуациях немедленно отключить оборудование, оповестить сотрудников об опасности, действовать в соответствии с утвержденным планом ликвидации аварии. Пострадавшим оказать первую помощь до приезда скорой.

Операторы установок для резки не занимаются ремонтом оборудования, тем более во время его работы. Курение, прием еды или напитков на рабочем месте запрещен, держать возле оборудования личные вещи запрещено.

На основании ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ рабочее место должно соответствовать требованиям обеспечения безопасности и охраны здоровья. Рабочее место должно соответствовать антропометрическим показателям работника. Также необходимо обеспечить место средствами защиты от вибрации и шума.

## 6.5 Экологическая безопасность

### 6.5.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Гидравлическая или гидроабразивная обработки является сегодня наиболее эффективным, гибким, экологически чистым и энергосберегающим методом. Кроме того, высокое качество поверхности реза позволяет применять данный вид технологии раскроя материала не только в заготовительном производстве, но и в области точного машиностроения.

При гидроабразивной обработке есть возможность вторичного использования отходов. Исходное сырье при гидроабразивной обработки является вода и абразивный материал – гранатовый песок. Комплексное исследование состава и свойств отходов гидроабразивной резки стали показало, что они представляют собой тонкие тяжёлые пески с высоким содержанием пылевидной фракции, в химическом составе которых, преобладают оксиды железа, кремния и алюминия. Такая характеристика отходов позволила наметить возможные пути их использования. В соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов (ФККО 2017) отходы песка при гидроабразивной резке черных и цветных металлов относятся к V классу опасности, то есть практически неопасным. По механизму образования и составу данные отходы соответствуют минеральным отходам и попутным продуктам, не утратившим природных свойств, сохраняющим химический и минеральный состав соответствующих горных пород и природных минералов, и, соответственно, можно опираться на соответствующие рекомендации по их подготовке и использованию [38].

Наиболее целесообразным на данном этапе исследования представляется

использование данных отходов в производстве изделий строительной керамики, доля которых в современном строительстве будет возрастать. Причем, ввиду нарастающего дефицита кондиционного сырья, тенденцией является работа на искусственных многокомпонентных шихтах, в которых природное сырье составляет лишь малую долю, а основной объем приходится на вторичное сырье.

Предварительные исследования позволяют сделать выводы о возможности использования отходов гидроабразивной резки стали для изготовления керамических изделий в качестве полифункциональной добавки: флюса (плавня), пигмента для окрашивания керамического черепка (ввиду наличия хромофоров - оксида железа и вишнево-красного минерала - альмандина).

#### 6.5.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Учитывая влияния отходов процесса гидроабразивной резки на окружающую среду, внедрение данной технология ведётся с максимальным соблюдением экологических требований, целью которых является недопущение выбросов вредных веществ, превышающих предельно допустимые концентрации.

При непосредственном выбросе на производстве требуется применять специальные системы вентиляции воздуха для уменьшения выбросов в окружающую среду. Предельно-допустимые нормы выбросов необходимо регламентировать согласно ГН 2.2.5.3532–18.

Энергосбережение в любой сфере сводится по существу к снижению бесполезных потерь энергии. Анализ потерь в сфере производства, распределения и потребления электроэнергии показывает, что большая часть потерь – до 90% – приходится на сферу энергопотребления, тогда как потери при передаче электроэнергии составляют лишь 9–10%. Поэтому основные усилия по энергосбережению сконцентрированы именно в сфере потребления электроэнергии.

Рабочая среда при гидроабразивной обработке не содержит вредных веществ. Перед насосом высокого давления вода должна быть профильтрована до 0,5

мкм. После фильтрации или оседания взвесей, отработанная вода может сливаться в канализацию. Воду после гидроабразивной обработки можно использовать воду вторично. Подобные системы гидроабразивной резки существуют, но это превышает себестоимость ресурсов, так как уровень расхода воды низкая (около 200 л/час).

Для освещения производственное помещения при гидроабразивной резки используется люминесцентных ламп. Одним из недостатков люминесцентных ламп является применение небольшого количества ртути, и отказаться от ее использования не представляется возможным, так как на этом металле основан принцип работы. Лампы относятся к особо опасной категории отходов. Поврежденные или использованные лампы дневного света выбрасывают в бытовые контейнеры для мусора, что является недопустимым т. к. в них находятся крайне опасные, ядовитые вещества, которые попадают в грунт и загрязняют окружающую среду.

Утилизацией люминесцентных ламп имеют право заниматься только специализированные организации, имеющие лицензию на проведение подобного вида работ. Поэтому отходы от люминесцентных ламп и микросхем оборудования будут осуществляется другими предприятиями.

## 6.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

### 6.6.1 Анализ ЧС, которые может инициировать объект исследования

Процесс гидроабразивной резки может инициировать несколько чрезвычайных ситуаций. Наиболее типичной ситуацией, которая может произойти на производстве – это возникновение пожара на рабочем месте при перегрузке оборудования и большом нагреве (неисправность оборудования). Второй чрезвычайной ситуацией является электрическое поражение током человека, а именно плохо изолированные провода.

## 6.6.2 Анализ ЧС, которые могут произойти во работы гидроабразивной установки

К наиболее частым и типичным авариям на машиностроительных предприятиях, классифицируемым как техногенные ЧС, относятся пожары, взрывы ёмкостей с горючими газами или жидкостями, разрушение и взрывы технологического оборудования и другими продуктами, разрушение гидротехнических сооружений.

Эксплуатационно-технические причины: нарушение технологических процессов (отклонения параметров процесса, отклонения в характеристиках сырья и материалов, нарушение технологической дисциплины и др.); изношенность оборудования.

Человеческий фактор: нарушение трудовой дисциплины; нарушение правил безопасности проведения работ; психофизиологические причины (ошибки в действиях, усталость, невниманье и др.). Внешние причины: отклонения параметров энергопитания; погодные факторы; геологические явления; диверсии и др.

## 6.6.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

В числе мероприятий по защите рабочего от ЧС на предприятиях, указываются действия по эвакуации работающей смены, как при угрозе, так и при возникновении ЧС. Исходя из прогнозируемой возможности возникновения аварий, катастрофы или стихийного бедствия, которые могут повлечь за собой человеческие жертвы, принести ущерб здоровью людей, нарушить условия их жизнедеятельности, намечаются следующие мероприятия и временные параметры по эвакуации:

- определяется вид эвакуации (планомерная или экстренная);
- производится расчёт рабочих и служащих, необходимых для проведения

эвакуации;

- устанавливаются мероприятия по безаварийной остановке производства;
- намечаются схемы движения эвакуируемых из зоны ЧС к пунктам временного размещения и др;

- мероприятия режимного характера - запрещение курения в неустановленных местах;

- необходимо применить средство индивидуальной защиты при пожаре: респиратор, аптечка.

- производственное помещение необходимо обеспечить установками пожарной автоматики и первичными средствами пожаротушения (огнетушитель).

С учётом анализа и оценки ситуации руководитель объектовой комиссии по ЧС может принять одно из решений: провести эвакуацию внутри объекта; вывести персонал за пределы объекта; применить комбинированный метод.

При работе и проведении исследований на гидроабразивной установке выявлены опасные и вредные факторы (шум, вибрация, освещенность и т.д.), а также мероприятия по их устранению. Также указаны все необходимые гигиенические требования для безопасной организации рабочего места. Рассмотрены чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть (поражение током и пожар) и описаны действия для их предотвращения. Таким образом, можно отметить, рабочее место при гидроабразивной обработке соответствует всем нормативным документам и требованиям.

## Заключение

В результате выполненной работы на основе доступных литературных источников был произведен анализ развития гидроабразивной технологии на российском и зарубежном производстве. По поставленным задачам, разработана математическая модель гидроабразивной установки, которая реализована в программном продукте MatLAB. Для составленной математической модели был произведен расчёт диапазона значений параметров системы. В результате теоретических исследований влияния параметров системы на вибрационные характеристики, был выявлен вариант установки параметров, при котором наблюдались минимальные вибрации заготовки и режущей головки.

В ходе экспериментального исследования были определены жесткости системы позиционирования инструмента установки гидроабразивной резки, точности и качества обработки при ГАР. Определено влияние жесткости системы позиционирования инструмента установки гидроабразивной резки на точность и качество поверхностей получаемого изделия и определение пути повышения точности. По результатам проведенного исследования даны рекомендации по повышению точности и качества деталей.

В дальнейшем планируется провести ряд исследований по модернизации гидроабразивной установки и оптимизации параметров сил резания, вибрационных процессов, влияющих на точность и качество обработки при ГАР.

В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены опасные и вредные факторы, влияющие на здоровье, самочувствие работающего и безопасность труда, а также разработаны мероприятия по их устранению. Большинство опасных и вредных факторов удалось устранить и значительно снизить их негативное влияние. В целом можно отметить, что условия труда на рассматриваемом участке являются достаточно комфортными и безопасными, что способствует снижению показателей травматизма, а также благоприятно влияет на повышение производительности труда.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» определен коммерческий потенциал и перспективность проведения данного научного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, произведен расчет бюджета НИ, определена экономическая эффективность исследования.



## Список публикаций студента

1. Нозирзода Ш. С. Повышение точности гидроабразивной обработки // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 14-17 Октября 2019. - Кемерово: КузГТУ, 2019 - С. 178-181.

2. Нозирзода Ш. С. Перспективы развития гидроабразивной обработки // Современные материалы и технологии новых поколений: сборник научных трудов II Международного молодежного конгресса, Томск, 30 Сентября-5 Октября 2019. - Томск: ТПУ, 2019 - С. 339-341.

3. Нозирзода Ш. С. Исследование точности изготовления детали «подвес» при гидроабразивной обработки из нержавеющей стали // Россия молодая: сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 16-19 Апреля 2019. - Кемерово: КузГТУ, 2019 - С. 1-6.

4. Нозирзода Ш. С. Обеспечение точности при гидроабразивной резки // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы XIV Всероссийской заочной научно-практической конференции: в 3 т., Камышин, 15 Ноября 2019. - Волгоград: ВолгГТУ, 2019 - С. 36-39.

5. Нозирзода Ш. С. Исследование влияния жесткости системы позиционирования инструмента установки гидроабразивной резки на точность и качество поверхностей получаемого изделия / Ш. С. Нозирзода; науч. рук. С. Е. Буханченко // Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов XII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 28 октября - 1 ноября 2019 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – [С. 366-372].

6. Нозирзода Ш.С. Исследование влияния системы СПИД на точность и качество деталей при гидроабразивной резки/ XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов: Тезисы докладов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2020. С.334. (15-17 апреля 2020 г.).

## Список использованных источников

1. Кузьмин В. В. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения: учебник для вузов / В. В. Кузьмин [и др.]. Москва: Высшая школа, 2008. 279 с.
2. Штерензон В. А. Ш90 Моделирование технологических процессов: конспект лекций / В. А. Штерензон. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. унта, 2010. 66 с.
3. Применение гидроабразивной резки при обработке сложнопрофильных поверхностей деталей к.т.н. Моргунов Ю.А., Федотов А.А., Швычков Д.В. МГТУ «МАМИ».
4. Высокоэффективные технологии обработки: Монография / Г 83 С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, А.Р. Маслов и др./ Под общей ред. С.Н. Григорьева. – М.: Машиностроение, 2014. – 455 с.: ил.
5. Технологии точного моделирования / Гидроабразивная резка / История гидроабразивной резки [Электронный ресурс] URL: <https://ttm66.ru/news/istoriya-gidroabrazivnoj-rezki> (Дата обращения: 24.04.2019).
6. Полянский С.Н. Технология и оборудование гидроабразивной резки [Текст]. / С.Н. Полянский, А.С. Нестеров // Вестник машиностроения. 2004. - №5.-С. 43-46.
7. Барсуков Г.В. Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования состояний технологической системы. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Орел, 2006, 411с.
8. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. - М., 1974.
9. Официальный сайт компании ООО «Керамглас» осуществляет продажу высококачественного гранатового песка от ведущих Австралийских и Индийских поставщиков [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.garnet-abrasive.ru/> (Дата обращения: 25.09.2019).

10. Методы и средства научных исследований: учеб. пособие / Ю. Н. Колмогоров [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 152 с.
11. Кузьмин В. В. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения: учебник для вузов / В. В. Кузьмин [и др.]. Москва: Высшая школа, 2008. 279 с.
12. Штерензон В. А. Ш90 Моделирование технологических процессов: конспект лекций / В. А. Штерензон. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. 66 с.
13. Гидротехнические сооружения. Часть 1. Учебник для вузов. - Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. - 576 с.
14. Хелпикс.Орг / Гидростатическая передача винт-гайка [Электронный ресурс] URL: <https://helpiks.org/5-97348.html>.
15. Вибрационные испытания / Теория виброиспытаний / Ударный спектр и добротность колебательной системы [Электронный ресурс] URL: <https://zetlab.com/podderzhka/vibratsionnyie-ispyitaniya/teoriya-vibroispyitaniy/udarnyy-spektr-i-dobrotnost-kolebatelnoy-sistemyi/>.
16. Аэродинамическая сила и ее составляющие [Электронный ресурс] URL: <http://www.modelizd.ru/rocket/theories/aerodinamicheskaya-sila-i-ee-sostavlyayuschie>.
17. Гидравлика / Лекции по гидравлике / Плотность и удельный вес жидкостей / Плотность воды, масла, спирта, керосина, бензина и нефти [Электронный ресурс] URL: [http://www.techgidravlika.ru/view\\_post.php?id=16](http://www.techgidravlika.ru/view_post.php?id=16) (Дата обращения: 28.03.2019г.).
18. Особенности обработки нержавеющей стали на токарных станках [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://stanokgid.ru/osnastka/tokarnaya-obrabotka-nerzhaveyushhej-stali.html> (Дата обращения: 28.03.2019г.).
19. Официальный сайт ООО «Уралгрит» [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.uralgrit.com/partneri/> (Дата обращения: 28.05.2019г.).
20. Попелюх А.И. Перспективные способы обработки материалов: Учебное пособие / А.И. Попелюх, Тюрин, Н.В. Плотникова – Челябинск: Изд-во

ЮУрГУ, 2014. – 49 с.

21. Голиков В.А., Анфиногентов В.В. Расчетная схема определения геометрических и гидродинамических характеристик водяных струй моечных машин танкеров / Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 28. – Одесса: ОНМА, 2011. – 162 с.

22. Старцев В.А. Физико-механическое обоснование параметров гидромониторной разработки россыпей направленным бурением скважин. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2018 – 119с.

23. ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2018. – 31с.

24. Барсуков Г.В. Исследование погрешности формы при резании листовых материалов гидроабразивной струей / Сб. тр. Междунар. науч.- техн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения» - «Технология -2003», 2003 г. С. 449-455. 8

25. Шпилев В.В. Повышение эффективности процесса гидроабразивной резки листовых деталей путем оптимизации режимов обработки и параметров струи рабочей жидкости: . дис. канд. техн. наук: 05.02.08/ Шпилев Василий Владимирович.-Саратов, 2012. 147с.

26. Официальный сайт компании компании Hiwin в России / Шарико-винтовые передачи HIWIN [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.hiwin.com.ru/ballscrew/> (Дата обращения: 28.03.2019г.).

27. Пэндит С. Сатьянараянан Г. Исследование процесса образования шлифованной поверхности методом моделирования по наблюдаемым данным // Конструирование и технология машиностроения: Тр. Амер. Ова инженеров-механиков. - Мир. - 1984. - N3. - С.133-140.

28. Рудзит Я.Н. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. - Рига: Зинатне, 1975. - 214с. 62.

29. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.И. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. М.: Машиностроение, 1985.

30. Хусу А.П. и др. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход / Хусу А.П., Виттенберг Ю.Р., Пальмов В.А. - М.: Наука, 1975. - 343с.

31. Табаков В., Балан С. Изучение механизма разрушения поверхности материалов под действием эрозии // Труды американского общества 166 инженеров - механиков. Сер. Энергетические машины и установки. 1983. № 4. С. 106-110.

32. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве/ Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев А.С. и др./Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

33. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватули-на, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политех-нический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

34. Бобровский Н. М. Исследование влияния «зеленой» производственной технологии обработки выглаживанием на пожаробезопасность, экологию и здоровье человека // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – №3-6. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-vliyaniya-zelenoy-proizvodstvennoy-tehnologii-obrabotki-vyglazhivaniem-na-pozharobezopasnost-ekologiyu-i-zdorovie> (дата обращения: 19.02.2020).

35. Петров А. Б. Посткризисные проблемы развития российского машиностроения // Проблемы современной экономики. – 2011. – № 2. – С. 272-275.

36. Полещук Л. Г., Пономарёв В. А., Одинамадов Ф. И. «Экологическое мировоззрение» как путь выхода из экологического кризиса // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. В 2-х томах. Том 2 / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 141-146.

37. Пономарёв В. А., Полещук Л. Г., Солоха А. А. Инженерные компетенции экспертов-экологов в области переработки и утилизации отходов резинотехнических изделий // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 474-478.

38. Минералы. Диаграммы фазовых равновесий. Выпуск. 1. / под ред. Ф. В. Чухрова, И. А. Островского, В. В. Лапина – М.: Изд-во «Наука», 1974. – С. 139, 311.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А  
 Программа, содержащая функции системы дифференциальных уравнения  
 в среде Matlab

```
function f=dis(t,n)
% n(1)-x1, n(2)-V1, n(3)-x2,n(4)-V2,n(5)-x3, n(6)-V3, n(7)-x4,n(8)-V4, n(9)-x5,
n(10)-V5,n(11)-x6, n(12)-V6
m1=500; % кг
m2=1200; % кг
m3=200; % кг
m4=200; % кг
m5=500; % кг
m6=50; % кг
c1=2*1000000; % Н/м
c2=80000000; % Н/м
c3=100000000; % Н/м
c4=150000000; % Н/м
c5=1.5*1217.79; % Н/м
c6=1.5*200000000; % Н/м
c7=1.5*1217.79; % Н/м
h1=1; % Н*с/м
h2=1; % Н*с/м
h3=0.2; % Н*с/м
h4=0.2; % Н*с/м
h5=0.4; % Н*с/м
h6=0.0111; % Н*с/м
h7=0.4; % Н*с/м
Fp=18.97; % Н
k=0.77;
f1=sqrt((c1)/m1)/(2*pi)
f2=sqrt((c1+c3+c4+c2)/m2)/(2*pi)
f3=sqrt((c3+c5)/m3)/(2*pi)
f4=sqrt((c7+c4)/m4)/(2*pi)
f5=sqrt((c7+c5+c6)/m3)/(2*pi)
f6=sqrt((c7)/m4)/(2*pi)

f=[n(2);
(Fp-h1*(n(2)-n(4))-c1*(n(1)-n(3)))/m1;
n(4);
(h1*(n(2)-n(4))+c1*(n(1)-n(3))+h3*(n(6)-n(4))+c3*(n(5)-n(3))+h4*(n(8)-
n(4))+c4*(n(7)-n(3))-h2*n(4)-c2*n(3))/m2;
n(6);
(c5*(n(9)-n(5))+h5*(n(10)-n(6))-c3*(n(5)-n(3))-h3*(n(6)-n(4)))/m3;
n(8);
(c7*(n(9)-n(7))+h7*(n(10)-n(8))-c4*(n(7)-n(3))-h4*(n(8)-n(4)))/m4;
n(10);
(c6*(n(11)-n(9))+h6*(n(12)-n(10))-h5*(n(10)-n(8))-c5*(n(9)-n(7))-h4*(n(8)-
n(4))-c4*(n(7)-n(3))-h7*(n(10)-n(9))-c7*(n(9)-n(7)))/m5;
n(12);
(k*Fp-h6*(n(12)-n(10))-c6*(n(11)-n(9)))/m6];
```



Приложение Б  
Программа для решения системы дифференциальных уравнения в среде  
Matlab

```
clc;
clear;
close all;

[t,n]=ode45(@dis,[0,10],[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]);
x1=n(:,1);
V1=n(:,2);
x2=n(:,3);
V2=n(:,4);
x3=n(:,5);
V3=n(:,6);
x4=n(:,7);
V4=n(:,8);
x5=n(:,9);
V5=n(:,10);
x6=n(:,11);
V6=n(:,12);

subplot(2,2,1)
plot(t,x1)
grid on;
title('Перемещение первого тела')
xlabel('Время, с')
ylabel('Перемещение, м')

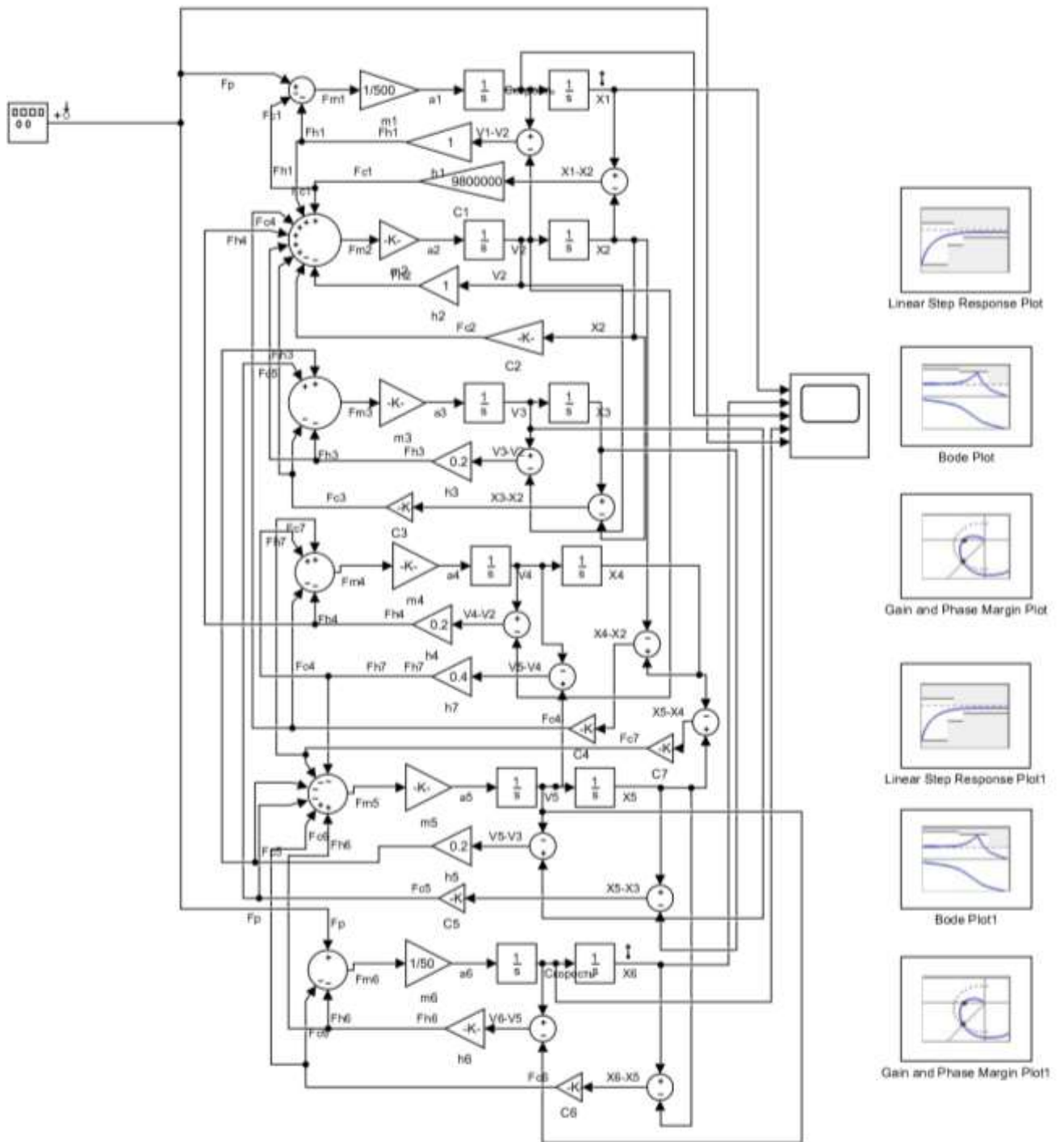
subplot(2,2,3)
plot(t,V1)
grid on;
title('Скорость первого тела')
xlabel('Время, с')
ylabel('Скорость, м/с')

subplot(2,2,2)
plot(t,x6)
grid on;
title('Перемещение шестого тела')
xlabel('Время, с')
ylabel('Перемещение, м')

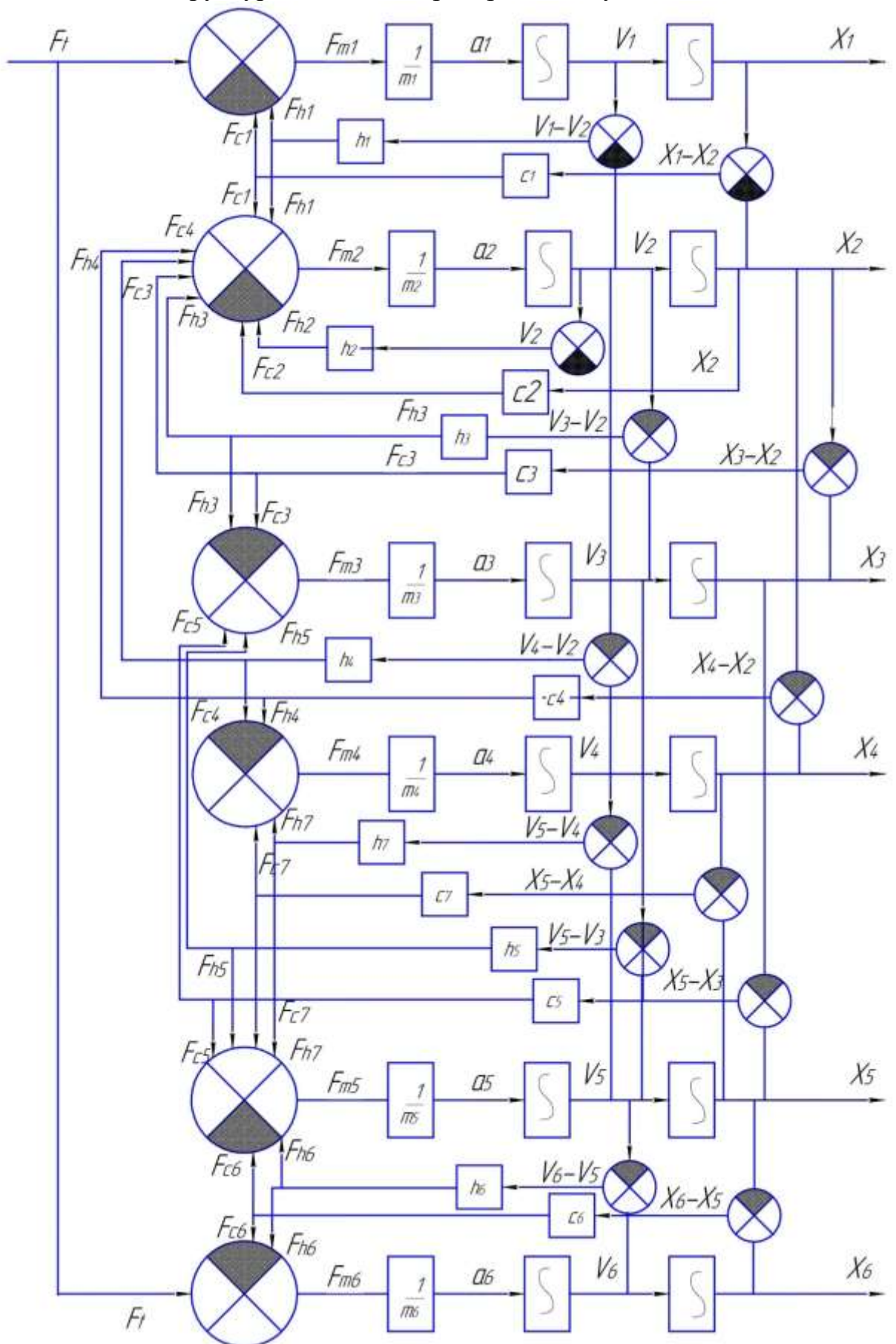
subplot(2,2,4)
plot(t,V6)
grid on;
title('Скорость шестого тела')
xlabel('Время, с')
ylabel('Скорость, м/с')
```

## Приложение В

### Графическая модель динамики гидроабразивной установки



Приложение Г  
Структурная схема гидроабразивной установки



## Приложение Д

### The main part

Консультант школы отделения (НОЦ) школы ИШНПТ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко Сергей Евгеньевич	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения (НОЦ) школы ИШНПТ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Диденко Анастасия Владимировна	к.ф.н.		

## 1 Literature Review

### 1.1 Analysis of existing methods of processing materials

The technological process (manufacturing technology) is understood as a sequential change in the shape, size, properties of a material or in-process part in order to obtain a part or product in accordance with specified technical requirements. Each technological process should be used in a certain range of indicators, due to the properties of the material of the workpiece and tool and technological features. When a critical level is reached, its further use becomes impossible for technical reasons or unprofitable for economic reasons.

In mechanical engineering, there are many types of material processing technology. Two of the groups of methods of material processing technology are electro-physical and electrochemical. These are methods that allow the separation (cutting) of materials. Currently, there are a variety of different ways to separate (cut) metals. However, all these varieties can be divided into two large groups (Fig. 1).

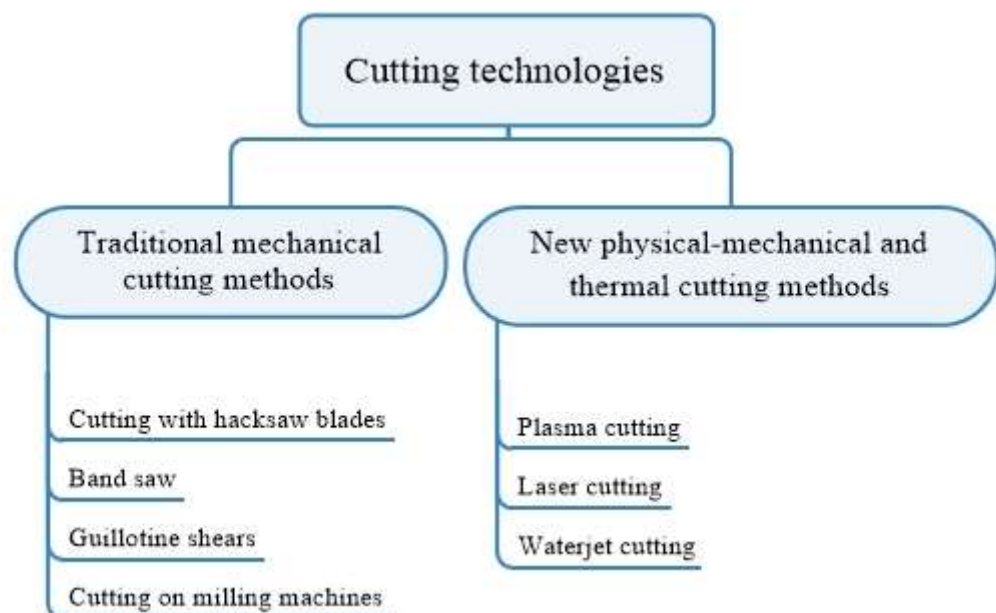


Figure 1 – Material cutting technologies

For the implementation of the process of mechanical cutting of materials in production, a variety of general and special purpose machines are used for cutting sheet, profile and other workpieces from a variety of metals and alloys. The use of

mechanical methods of cutting sheet material significantly increases the cost of manufactured products, and, consequently, reduces the competitiveness of machine-building enterprises. In this regard, physical and mechanical methods of metal cutting have recently become more common in machine-building plants. In figure 2 the main methods of physical and mechanical methods of material processing and their advantages and disadvantages are given.

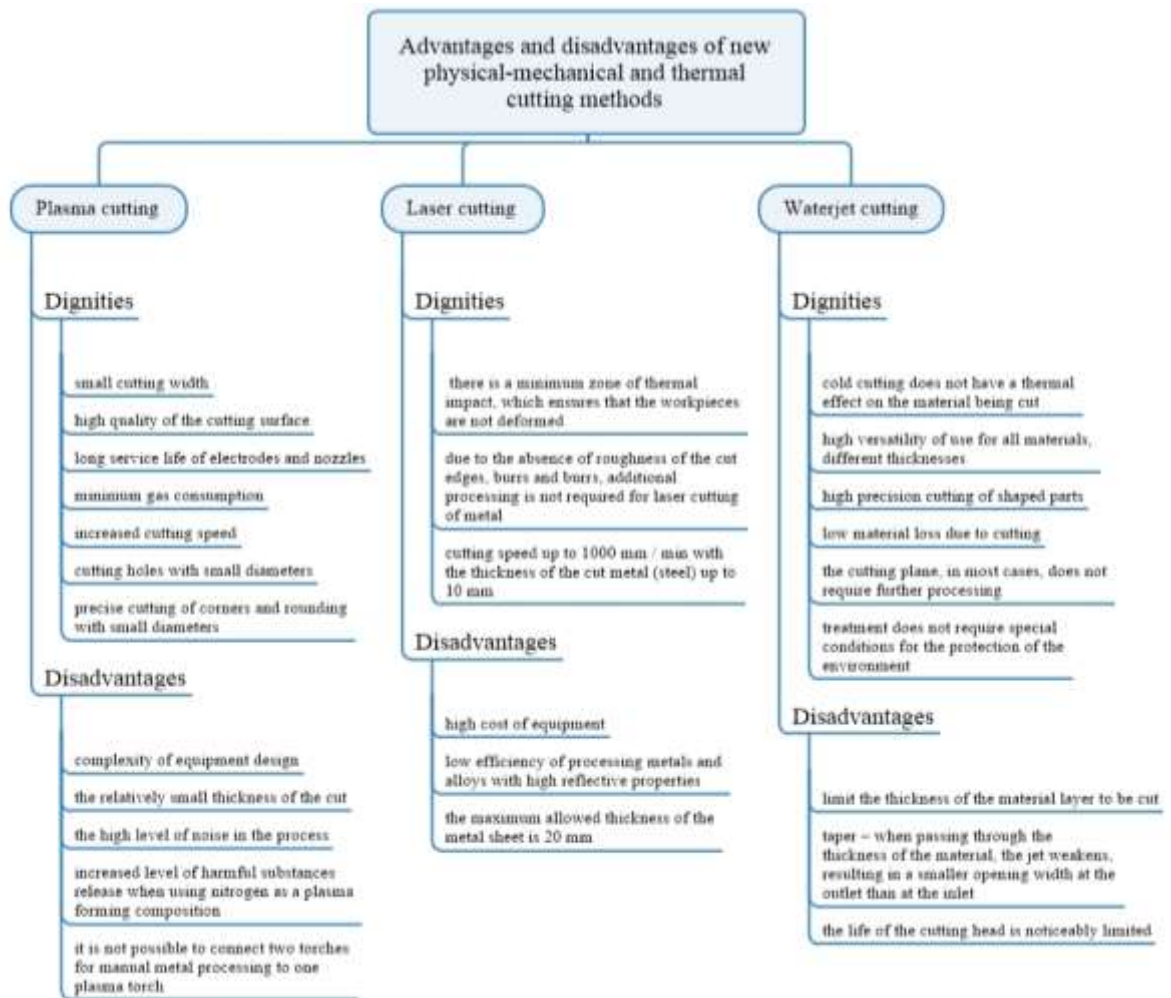


Figure 2 – Advantages and disadvantages of new physical-mechanical and thermal methods of cutting materials

The uniqueness of waterjet cutting technology is that it can be used to cut almost any type of material. It is important to note that waterjet cutting is an alternative not only to mechanical, but also to laser, plasma, and ultrasonic cutting, and in some cases is the only possible one.

## 1.2 History of waterjet cutting

The industrial use of water under pressure as a method of mechanical treatment of hard surfaces first appeared in the 30s of the twentieth century in the Soviet Union [4]. In the early 1930s, Soviet engineers first used a water jet to extract coal and stone from underground layers. In 1935, Vladimir Muchnik, a graduate of the Dnepropetrovsk Mining Institute, invented a method for destroying coal seams with a water jet, and a year later, the first water monitor was tested in one of the Donbass mines. Since 1939, industrial hydraulic mine began to appear.

However, this method was first mentioned in the 1850s. Gold miners in California washed the rock from the pits using water hoses so as not to do it manually. By the end of the nineteenth century, entire underground hydraulic lines were used in South African mines. In the early 50s, in search of the best way to cut large tree trunks, forestry engineer Norman Franz conducted experiments and found that water under high pressure can cut wood and polymers. This technology was further used in the United States in the 60s of the twentieth century when processing fiber-optic materials was used in the aircraft industry [4].

The now famous company «Flow International» in 1973 produced sandblasting machines, developed by a specialist (and today the head) of the company, Dr. Mohammad Hashish. It was in 1979 to increase the cutting ability and to add pomegranate sand to water as an abrasive, which is usually used in the manufacture of sandpaper [5]. In 1980, the first waterjet cutting machine was designed and launched, and in 1983, the company «Flow» organized their mass production.

The history of Flow goes back to the early 1970s, when several specialists left their jobs in the Research and Development Department of Boeing and founded Flow Research. The first commercially successful "Flow Research" technology was the use of an ultra-high-pressure water jet as an industrial cutting tool. After that, this company received a patent for the invention of a waterjet installation. Thus, "Flow Research" is the first manufacturer of waterjet installations in the world. Now the technology of waterjet cutting continues to develop, there are large enterprises for the development

and production of waterjet machines [5].

### 1.3 Analysis of features of waterjet technology

Hydro abrasive processing is one of the new and developing methods of material processing. Waterjet cutting technology is based on the principle of erosive effect of a mixture of high-speed water jet and solid abrasive particles on the material being processed. The physical essence of the waterjet cutting mechanism consists in the separation and removal of material particles from the cutting cavity by a high-speed flow of solid-phase particles. The flow stability and efficiency of the two-phase jet (water and abrasive) are ensured by an optimal choice of a number of cutting parameters, including pressure and water flow, as well as the flow rate and size of the abrasive material particles.

The essence of the method of waterjet cutting is that the grains of sand, dispersed at a great speed by a jet of water, tear off fragments of the processed material as shown in figure 3. Then the destructive force of such a beam is extinguished by water in the bath located in the path of the jet. Due to the energy that such a jet has, it is possible to cut materials of large thickness [7].

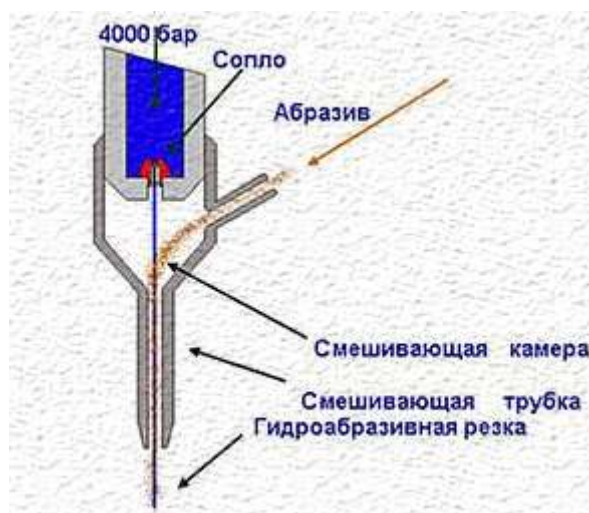


Figure 3 - Working operation of cutting material under high pressure on a waterjet installation

Processing of application method makes it possible to significantly reduce material losses due to the small cutting width, i.e. reducing allowances. From an environ-



mental point of view, water-jet treatment is clean and safe. The abrasive used is harmless to the health of operators, since it does not cause occupational diseases, and its waste can be used both in construction and for other purposes. With waterjet processing, it is possible to generate waste for reuse as cutting material.

Since there is no accumulated heat and no gases during waterjet cutting, the technology is explosion- and fire-proof. This makes it possible to cut even explosives, for example, when disposing of ammunition, as well as oil and gas - containing containers, pipelines, and so on.

After analyzing the technological process of waterjet processing, it can be noted a process of this type, the cutting tool does not require sharpening. The product reduces the impact load and the effect of the reverse force on the cutting tool, since there is no direct contact between the workpiece and the cutting tool. The low tangential force on the part allows to do without clamping this part in some cases. On a waterjet machine, it is possible to perform various operations (for example, drilling and cutting) with the same tool. This allows to concentrate multiple operations in one. It is also possible to cut on the same table simultaneously with several cutting heads from a single high-pressure pump.

Hydro abrasive processing at an industrial enterprise is performed on hydro-forming machines. It is possible to cut materials up to a thickness of 300 mm on waterjet machines. Such machines are equipped with CNC using this technology. This significantly increases productivity and extends the application capabilities and complexity of the operations performed. The most famous manufacturers of waterjet machines in the world are shown in table 1.

Table 1 – The most famous manufacturers of waterjet machines in the world

Country	Company	Machine model
USA	Flow	Flow WMC2 c ЧПФ
	Jet Edge	OMAX JetMaching Center 2626 c ЧПФ
Sweden		Water Jet Sweden NC 1000 c ЧПФ
Holland	Resato	Resato R-LCM 1515-1 c ЧПФ
Czech Republic	PTV	Cobra; WJxxyy-nZ-C; Uni Jet; WJxxyy-nZ-UJ
Italy	Garetta Technology	Tecnocut Idro Line 1740
Switzerland	Bystronic	BYSTRONIC ByJet Smart 3015

## 1.4 Analysis of resource features used in waterjet technology

Any production organization strives to use modern equipment and technologies, improve product quality, and optimize costs. Due to its versatility and environmental friendliness, waterjet cutting technology has found application in industrial production, construction, production of art products, and other areas of human activity.

Waterjet cutting technology is unique in that it can be used to cut most types of materials. For aluminum alloys, copper and brass, aquafresca is more effective than laser cutting, since these metals have a low ability to absorb the energy of laser radiation and require an increase in heating power [7]. Along with waterjet cutting, laser and plasma cutting are widely used. In the last two cases, the material is cut by melting it in the cutting area. This imposes restrictions on the scope of their application in contrast to the universal waterjet cutting.

The main resources for processing in a waterjet cutting plant are water and abrasive. For normal operation of waterjet cutting equipment, consumables of both artificial and natural origin are used. It should be noted that the hardness of the abrasive is usually determined by the Mohs scale. The main resources for processing on a waterjet unit are shown in figure 4.

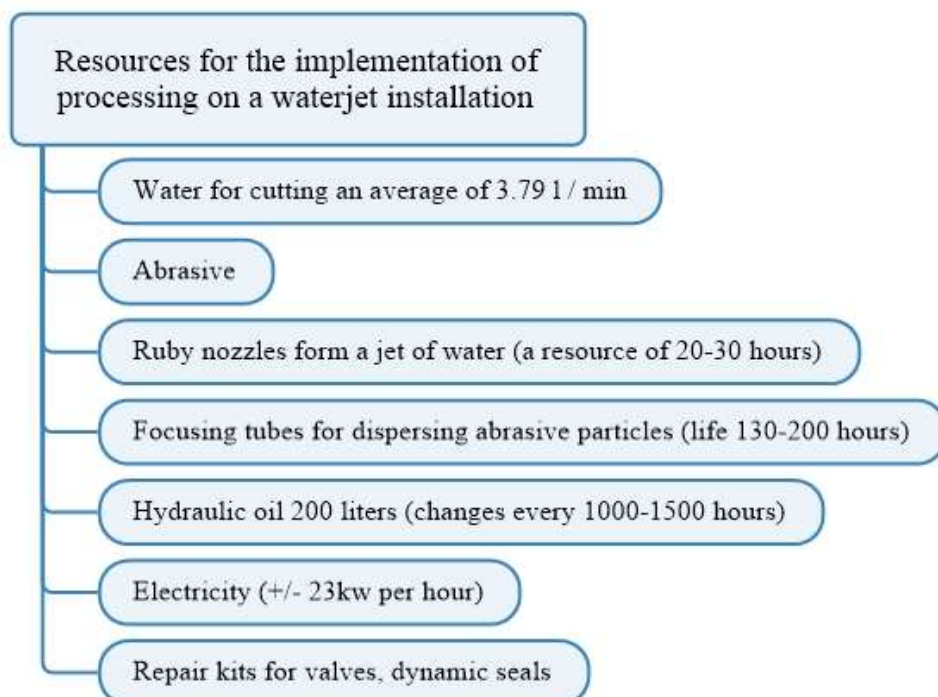


Figure 4 - Resources for processing on a waterjet plant

The water supply for a high-pressure pump must meet the following requirements. High concentrations of dissolved solids, especially calcium, silicon dioxide, and chlorides, will affect the service life of the HVD components. In case of poor analysis (minimum column) of water, it is necessary to complete the machine with a water softening system to increase the service life of spare parts. Table 2 shows the main requirements for water quality for waterjet cutting.

Table 2-Water quality requirements for waterjet cutting

Parameter	Minimum	Good	Best
Alkalinity (mg / l)	50	25	10
Calcium (mg / l)	25	5	0.5
Carbon dioxide (mg / l)	0	0	0
Chloride (mg / l)	15	1	0,1
Free chlorine (mg / l)	0,2	0,1	0.05
Iron (mg / l)	0.2	0.1	0.01
Manganese (mg / l)	0.1	0.1	0.1
Magnesium (mg / l)	0.5	0.1	0.1
Nitrates (mg / l)	25	25	10
Oxygen (mg / l)	2	1	0.1
PH Value	6.5 — 8.5	6.5 — 8.5	6.5 — 8.5
Silicon (mg / l)	15	10	1
Sodium (mg / l)	50	10	1
Sulphate (mg / l)	25	25	1
Total amount of dissolved solids, TDS (mg/l)	200	100	25*
Electrical conductivity [ $\mu$ s/cm]	290	145	45*
Total hardness in terms of CaCO <sub>3</sub> (mg / l)	25	15	1
Turbidity (NTU)	5	5	1

WJC technology uses mineral abrasives. One of the most important parameters for an abrasive is its hardness, measured according to the Mohs mineralogical scale. For WJC, abrasives with the hardness of 6.5 and higher Mohs are used. The choice of the type of abrasive depends on the physical properties of the material being cut. The hardness of the abrasive material must be higher than the hardness of the workpiece [8]. The types of abrasives used in water-jet processing are shown in figure 5.

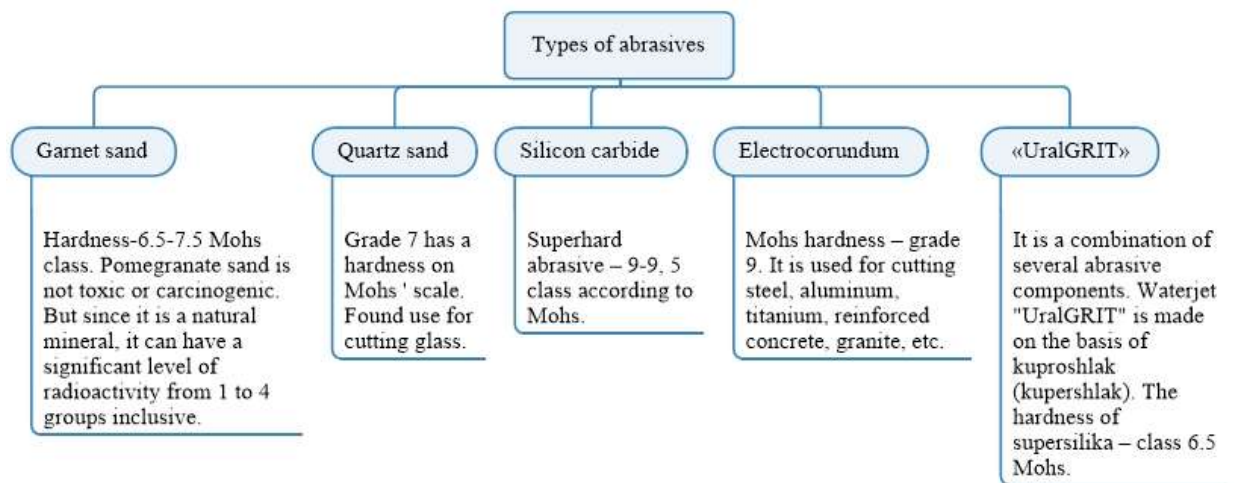


Figure 5 – Types of abrasives and their main characteristics

Waterjet cutting is an alternative method of processing due to the lack of temperature exposure and low consumption of cutting material. In addition, the high functionality of waterjet machines allows to process not only various materials, but also elements that differ in size, complex shapes and curly contours.

Currently, garnet sand is widely used for waterjet cutting, for example, «Garnet» [9]. This material is a hard and heavy abrasive, its density is approximately 4.1-4.3 g/cm. Garnet sand has a crystalline structure that has a high hardness and strength, providing it with high resistance to destruction. Thanks to these properties, garnet sand is virtually stable throughout the entire use period and ensures high quality of the cut.

The most common fraction of pomegranate sand is 80 Mesh. At the same time, the entire volume of pomegranate sand consumed in Russia is imported from abroad, which is associated with significant material costs, including the high cost of the powder and the cost of its transportation.

Also in Russia, there are domestic powders for waterjet cutting based on copper and nickel slags with physical and technical indicators that ensure high quality of cutting when processing the surfaces of elements made of different materials. The powder for waterjet cutting is created from a mixture of copper slag and electro corundum and a mixture of nickel slag and electro corundum.

Nickel and copper slags used for the production of powder for jet waterjet cutting are waste products of metallurgical production during the melting of copper and refining of nickel. Electro corundum is an artificially created abrasive material obtained

by melting in electric furnaces of bauxite with a reducing agent (anthracite, petroleum coke) and a precipitator. Patented powders for waterjet cutting contain slags and are characterized by the following physical and mechanical properties which are shown in table 3.

Table 3-Physical and mechanical properties of domestic powders

Indicator	Nickel slag	Copper slag
Appearance	Dark grey particles	
Particle shape	acute	
Bulk density, kg / m <sup>3</sup>	1400+1900	
Mass fraction of humidity, %	Not more 1	
Abrasive properties	Not less 4	
Mohs hardness	5,5-7,4	
Melting point, C	917-1061	

The results of research in LLC «Uralgrit» confirm that processing of various materials by cutting, a tool that uses instead of a cutter a mixture of water and powder produced from a mixture of nickel slag or copper slag and electrocorundum, is an effective method of cutting primarily due to significant savings in material costs for the powder [19].

Thus, the main criteria for choosing an abrasive for WJC:

- the hardness of the source material, such as garnet sand, has a hardness of 7 Mohs, which is sufficient for cutting steel, it must be taken into account that the wear of parts and components of the cutting head depends on the hardness of the abrasive;
- fraction, fine grain is more effective in some cases, although it is virtually impossible to restore fine grain for reuse, the rational grain size is considered to be 10-30% of the diameter of the cutting head nozzle;
- when choosing a water-based abrasive, it is necessary to take into account the required roughness of the resulting cut line, if the technical conditions allow for a large roughness, then it is quite possible to use a larger abrasive and vice versa.