Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Иванов Виктор Викторович

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ С ЗАКРУЧИВАНИЕМ СТРУИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Специальность 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент,
Калашников Евгений Александрович

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА РЕЗКИ МАТЕРИАЛОВ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУЕЙ 11
1.1. Применение гидроабразивной резки в различных отраслях промышленности 11
1.2. Сравнительная оценка применения гидроабразивного резания 15
1.3 Теоретические модели процесса гидроабразивной резки 17
1.4 Состояние вопроса по гидроабразивному раскрою заготовок и пути совершенствования этого процесса 32
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ 42
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ 49
3.1. Анализ обработанных поверхностей на основании единичного взаимодействия абразивных частиц 49
3.2. Геометрическая схема образования профиля установившейся шероховатости 53
3.3. Определение параметров установившейся шероховатости 56
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ 65
ГЛАВА 5. ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПО ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ (ЦИФРОВОГО СОВЕТНИКА) 82
5.1. Объект и условия проведения исследований 82
5.2. Условия выполнения исследований 82
5.3. Планирование эксперимента и обработка экспериментальных данных 89
ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦИФРОВОГО СОВЕТНИКА 99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ 101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 103

ПРИЛОЖЕНИЯ 113
П.1. Патент на изобретение 113
П.2. Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ 114
П.3. Исходный код программы 116
П.4. Инструкция пользователя по эксплуатации цифрового советника 126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы и степень её разработанности. При получении плоских изделий из листового сортамента в заготовительном производстве используют различные способы механической обработки, и один из них – гидроабразивная резка, которая заключается в применении водяной струи высокого давления с добавлением абразивной фракции в виде мелких частиц песка. При этом данному способу присущи недостатки: снижение режущих параметров гидроабразивной струи, что приводит к увеличению затрат на электрическую энергию, покупке расходных комплектующих для станка (фильтры, гидроабразивное сопло, абразивные зерна) и ухудшению геометрических показателей качества (шероховатость, волнистость) получаемых заготовок в процессе резки. Также при способе гидроабразивной обработки резание металла производится за счет усталостного выкрашивания частиц, которое является заключительной стадией процесса резки за счет «бомбардирования» большого количества абразивных зерен о поверхность заготовки, что приводит к искажению формы поверхности из-за ее обмятия. В чистовом виде резание в данном процессе отсутствует. Из-за отсутствия стабильного резания появляется нестабильная шероховатость обработанной поверхности за счет переноса физико-механических параметров абразивных зерен на геометрический микропрофиль заготовки. Для решения приведенной проблематики процесса гидроабразивной резки в диссертационной работе проведен анализ исследований по математическому моделированию данного способа. В рамках выполненного анализа исследований по управлению процессом гидроабразивной резки в диссертационной работе было предложено использовать метод управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости, так как в исследованиях ученые отмечают повышение режущей способности и производительности процесса резания. Использование данного способа позволяет закручивать гидроабразивную струю и за счет работы центростремительных сил осуществлять концентрацию абразивных частиц на оси струи, приводящей к увеличению кинетической энергии ударного

воздействия струи на материал, что приводит к увеличению производительности процесса.

С учетом описанной проблемы, задача по автоматизации процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости является актуальной в области резки материалов для повышения производительности и качества получаемых изделий.

Целью диссертационной работы является разработка программно-алгоритмического обеспечения по автоматизации процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости путем создания системы поддержки принятия решения (цифрового советника), обеспечивающей получение информации по расчету параметров резки без запуска физического процесса с выдачей рекомендаций оператору для достижения рациональных показателей по производительности процесса резки.

Задачи диссертационного исследования. Для выполнения цели диссертационного исследования требуется решить следующие задачи:

1. Анализ исследований по системам управления процессом гидроабразивной резки на основе моделей процесса вырезки заготовок из хрупких и пластичных толстолистовых металлов гидроабразивной струей.

2. Разработка аналитических зависимостей процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости на основе усталостного выкрашивания абразивных частиц с обрабатываемой заготовкой, позволяющих подбирать рациональные параметры обработки без запуска физического процесса резания.

3. Разработка модели формирования устойчивого профиля шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки с учетом неполных резов металла абразивными зернами для метода гидроабразивной резки с дополнительным колебательным движением (осцилляция) рабочей струи.

4. Разработка системы поддержки принятия решения (цифрового советника), обеспечивающей получение информации по расчету параметров гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости без запуска физического процесса

с выдачей рекомендаций оператору для достижения рациональных показателей по производительности процесса резки.

5. Экспериментальное подтверждение работоспособности разработанного программного обеспечения по поддержке принятия решения (цифрового советника) системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости путем проведения имитационного (компьютерного) моделирования.

6. Разработка практических рекомендаций по эксплуатации цифрового советника системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости.

Методология и методы исследования построены на знаниях технологии машиностроения, гидродинамики, методов системного и численного анализа, математического моделирования, механики деформированного твердого тела. Реализация цифрового советника выполнена в интегрированной среде разработки NetBeans, исходный код написан на объектно-ориентированном языке программирования Java Script.

Достоверность и обоснованность полученных рекомендаций и выводов в выполненном исследовании обеспеченно корректным использованием методов объектно-ориентированного программирования, проведением процедуры имитационного (компьютерного) моделирования.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические зависимости для определения глубины внедрения абразивной частицы, съема металла при гидроабразивной резке с закручиванием струи рабочей жидкости.

2. Модель формирования устойчивого профиля шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки с учетом неполных резов металла абразивными зернами для метода гидроабразивной резки с дополнительным колебательным движением (осцилляция) рабочей струи, которая увеличивает эффект режущих свойств абразивных зерен и повышает пятно контакта струи с заготовкой с помощью подбора частоты осцилляции к толщине материала.

3. Система поддержки принятия решения (цифровой советник), обеспечивающая получение информации по расчету параметров гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости без запуска физического процесса с выдачей рекомендаций оператору для достижения рациональных показателей по производительности процесса резки.

Научная новизна исследования состоит в том, что для процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости построена система поддержки принятия решения (цифровой советник), позволяющая на основе разработанных аналитических зависимостей, получать информацию по управлению процессом для достижения рациональных показателей по производительности без запуска физического процесса резки путем имитационного (компьютерного) моделирования. Получены аналитические зависимости для определения глубины внедрения абразивной частицы и съема металла при гидроабразивной резке с закручиванием струи рабочей жидкости, которые учитывают физико-механические свойства обрабатываемого материала, размеры абразивных частиц, расстояние до обрабатываемой детали, параметры гидроабразивной струи.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

1. Применение программного обеспечения по поддержке принятия решения (цифровой советник) системы управлению процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости позволит повысить производительность обработки на 12% по сравнению с обработкой традиционным способом.

2. Разработано программное обеспечение (цифровой советник), предназначенное для проведения расчета параметров гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости без запуска физического процесса резки, способствующих интенсификации процесса резки. Использование цифрового советника позволит снизить затраты на электроэнергию и закупку комплектующих (абразивный песок, гидроабразивное сопло, фильтра) за счет выдачи рекомендаций оператору гидроабразивного станка по достижению рациональных показателей по производительности процесса резки.

Реализация результатов работы. Основные практические результаты, полученные при разработке цифрового советника системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости, могут быть применены в машиностроительном производстве.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы обсуждались на Международных научно-практических конференциях: 75-е Дни науки студентов НИТУ «МИСиС» международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции» (Москва, 2020); «Молодежь и системная модернизация страны» (Курск, 2020); «Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике» (Курск, 2020); «Юность и Знания - Гарантия Успеха – 2019» (Курск, 2019); на Всероссийских научно-практических конференциях: «Современные инновации в науке и технике » (Курск, 2020); «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2019); а также на конкурсе «Конвейер молодежных проектов» на Всероссийском молодежном образовательном форуме «Территория смыслов на Клязьме» (Солнечногорск, 2019), конкурсе Всероссийский инженерный конкурс (Москва, 2021, 2024).

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 38 научных работах, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, 1 патент на изобретение, 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура, объем и краткая характеристика содержания работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Объем работы составляет 139 печатных страниц (включая 27 страниц приложений), 45 рисунков, 10 таблиц, библиографический список из 95 наименований.

В первой главе проведен анализ исследований по системам управления процессом гидроабразивной резки, включающий современное состояние вопроса гидроабразивной резки, основные направления по усовершенствованию метода обработки заготовок и деталей из различных материалов гидроабразивной струей,

анализ научных работ и публикаций, а также других литературных источников, посвященных подробному описанию путей совершенствования метода обработки.

Проведенный анализ научно-исследовательских работ по рассматриваемой тематике показал, что модели содержат мониторинг поведения отдельных аспектов технологической системы, обычно, режущего инструмента - струя жидкости, которая связана с узкой производственной целенаправленностью. Большинство зависимостей в математических моделях получено эмпирическим путем, что обуславливает возможность их реализации для конкретных (частных) параметров гидроабразивного резания, стоп - факторы на которые накладываются в математической модели процесса В рамках выполненного анализа исследований по управлению процессом гидроабразивной резки в диссертационной работе было предложено использовать метод управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости, так как в исследованиях ученые отмечают повышение режущей способности и производительности процесса резания.

Во второй главе представлены результаты аналитических зависимостей процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости на основе усталостного выкрашивания абразивных частиц с обрабатываемой заготовкой, которые позволяют подбирать рациональные параметры обработки без запуска физического процесса резания.

В третьей главе представлена разработка модели формирования устойчивого профиля шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки с учетом неполных резов металла абразивными зернами для метода гидроабразивной резки с дополнительным колебательным движением (осцилляция) рабочей струи.

Апробация разработанной модели была подтверждена проведенными исследованиями и установила, что резание представляет процесс шлифования, а не усталостное выкрашивание.

В четвертой главе представлена разработка системы поддержки принятия решения (цифрового советника), обеспечивающей получение информации по расчету параметров гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости без запуска физического процесса с выдачей рекомендаций оператору

для достижения рациональных показателей по производительности процесса резки.

В пятой главе описывается экспериментальное подтверждение работоспособности разработанного программного обеспечения по поддержке принятия решения (цифрового советника) системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости путем проведения имитационного (компьютерного) моделирования.

В шестой главе приведены практические рекомендации по эксплуатации цифрового советника системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости. Изложена инструкция по эксплуатации цифрового советника, приводятся архитектура программного продукта с описанием модулей программного обеспечения, требований по эргономике, надежности, требований к составу и параметрам технических средств

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при выполнении работы.

В Приложениях диссертационного исследования представлены:

- патент на изобретение;
- исходный код программного комплекса;
- свидетельства о регистрации программы для ЭВМ;
- инструкция пользователя по эксплуатации цифрового советника.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА РЕЗКИ МАТЕРИАЛОВ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУЕЙ

1.1. Применение гидроабразивной резки в различных отраслях промышленности

Используемые для резки традиционные способы очень трудоемки, не предоставляют требующуюся точность обработки деталей, малопроизводительны.

Кроме этого, все быстрее увеличивается тенденция применения материалов, обладающих специфическими физико-механическими и химическими свойствами (высокая удельная прочность, жаропрочность, коррозионная стойкость и т.д.), но использование традиционных способов обработки нецелесообразно, так как затрудняет их обработку резанием и приводит к износу режущего инструмента [3, 22, 26]

Вследствие этого формируется производственная потребность в создании и промышленном изучении способов резания современных конструкционных материалов, которые обеспечивают повышение производительности, точности и качества поверхностей резания. К таким многообещающим процессам раскроя материалов относится гидроабразивное резание, осуществляемое на основе процесса разрушения при воздействии сверхзвукового потока жидкости и абразива.

Гидроабразивная струя выполняет процесс резания при помощи ударного эффекта абразива об обрабатываемый материал, вследствие этого формируется последовательность данного процесса: срез, эрозия, эффект микромеханической обработки и разрушение под воздействием быстроизменяющегося поля местных напряжений [3, 59].

Данная технология применяется (рисунок 1.1):

- в машиностроительной промышленности (рисунок 1.1, а) при обработке большинства материалов, а также и специальных (титан, плексиглас, кевлар и т.д.) [8, 12, 18, 34, 35, 51];

- в автомобилестроении для разрезания материалов отделки салона автомобилей (рисунок 1.1, б) [55];

- в авиастроении при обработке материалов отделки салона летательных аппаратов, узлов из титана, алюминия (рисунок 1.1, в) [15, 46];

- в радиоэлектронике для резки плат, удаления облоя с микросхем (рисунок 1.1, г) [44];

- в строительстве для резки металлоконструкций, расчистки швов, плитки, стекла, бетона (рисунок 1.1, д) [19, 42, 43];

- в легкой промышленности для резки тканей, трикотажа, кож [1, 7, 39, 49, 50];

- в пищевой промышленности для резки мяса, овощей [21, 23, 24].

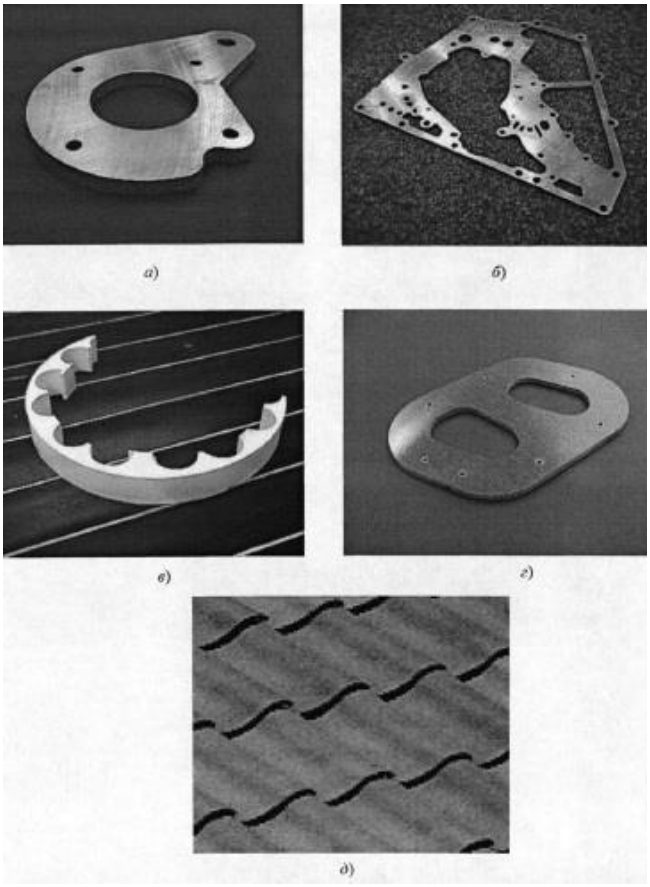


Рисунок 1.1. Примеры деталей разрезаемых гидроабразивной струей

Технология гидроабразивного резания совершенна для резки материалов, обладающих чувствительностью к температуре. После процесса резания не наблюдаются упрочнения и прижоги в зоне резания. Использование гидроабразивного резания на промышленных предприятиях связано с резкой

опасных материалов (асбест, стекловолокно), что позволяет в полной мере исключить вредные паровыделения и пыль. После резки струей не требуется применение дополнительной механической обработки.

Можно отметить принципиальные преимущества эффективного использования способа гидроабразивной резки:

- возможность резки любого материала;
- отсутствие теплового воздействия на обрабатываемую поверхность;
- точность сопоставима с лазерной резкой;
- резка материалов толщиной более 50 мм;
- отсутствие вредных паровыделений;
- простое обслуживание в эксплуатации гидроабразивного оборудования.

Одной из важных характеристик процесса обработки материалов является производительность.

Обзор производительности резки материалов для различных способов обработки выявил, что гидроабразивная резка допускает скорость резания, сопоставимую с производительными традиционными механическими способами обработки, с меньшими затратами энергии (рисунок 1.2) [37, 40, 56].

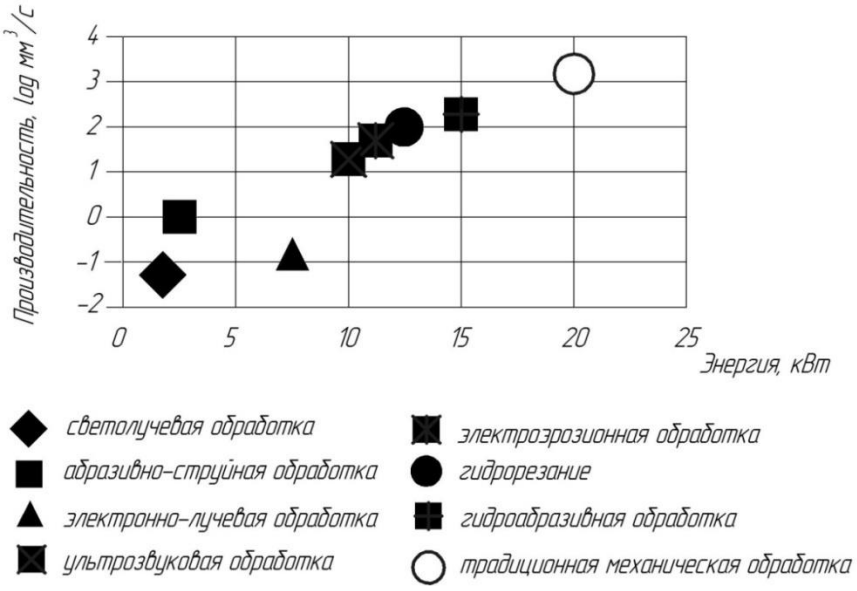


Рисунок 1.2. Производительность различных методов резания материалов

Оценка качества поверхностей после обработки резанием разнообразными способами по показателям отклонения от закона распределения по параметрам: R_{sk}

- асимметричность и R_{ku} - эксцесс (куртизиан) показала, что гидроабразивная резка может обеспечить качество поверхности, не уступающее любому из рассмотренных способов (рисунок 1.3) [82]. Достигаемые значения R_{sk} и R_{ku} присущи поверхностям со случайным Гауссовым распределением высотных характеристик [95].

При анализе результатов измерений шероховатости после обработки резанием разнообразными способами (рисунок 1.3) видно формирование грубой шероховатости после гидроабразивной резки. Однако следует учесть тот факт, что гидроабразивная резка реализует две цели: вырезание детали и окончательная обработка, т.е. после резки струей не нужно применение дополнительной механической обработки.

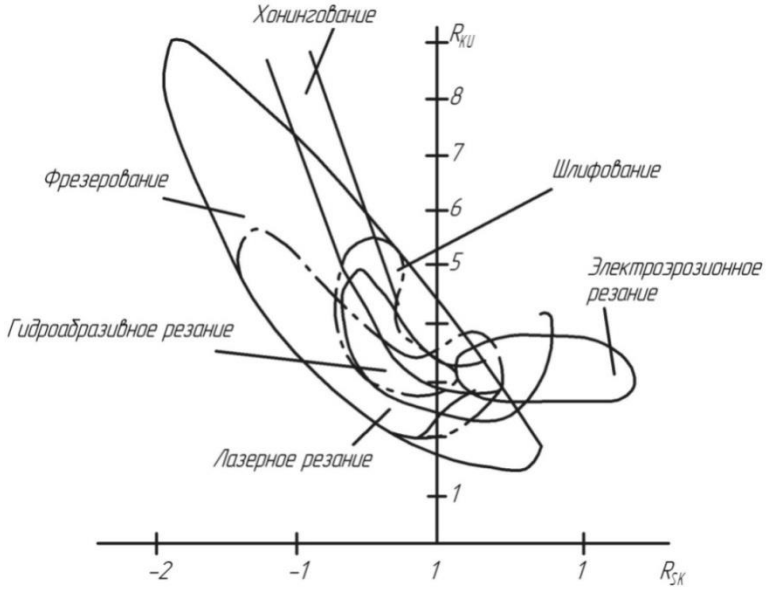


Рисунок 1.3. График оценки качества поверхностей после различных способов обработки материалов

Такие ученые, как D. Arola, M. Ramulu, N. Guo, G. Holland, и др. высоко оценивают то обстоятельство, что величина напряжений в 2 - 2,5 раза меньше и составляет 100 - 150 МПа по сравнению с традиционными способами обработки [36, 62, 71].

Результаты научных исследований Петухова Е.Н., Тихомирова Р.А., Kovacevic R. и др. подтверждают, что невысокие силовые нагрузки (1 - 100 Н) и

температура (+60 - 90°С) в области резки не приводят к возникновению деформации заготовки, пригоранию материала в прилегающих зонах [54, 80].

1.2. Сравнительная оценка применения гидроабразивного резания

Гидроабразивная струя имеет ряд технологических возможностей, а именно, производить следующие операции: резку листовых материалов, точение и фрезерование, пробивание отверстий, очистку и полировку поверхностей и т.д.

Подходя с позиции экономической рациональности, использование гидроабразивной резки наиболее результативно при резке хрупких (стекло, камень) материалов толщиной 40 - 100 мм, сплавов из алюминия - больше 5 - 6 мм, меди - больше 2 - 3 мм, листовой стали толщиной свыше 6 - 10 мм, композитных материалов в полном диапазоне допустимых толщин.

В таблице 1.1 представлен сравнительный обзор характеристик процесса и поверхностей обработки различными технологиями: кислородной, плазменной, лазерной и гидроабразивной резкой. При анализе лазерной, кислородной и плазменной резки можно отметить следующие недостатки: наличие термической закалки кромок, оплавление кромок, дополнительная механическая обработка, высокие требования к обрабатываемым материалам; достоинства: высокая скорость резания, низкая стоимость расходных материалов (газ).

Сравнительный анализ гидроабразивной резки по отношению к другим современным технологиям обработки поверхностей выявил ниже приведенные недостатки: необходимость постоянного поступления воды, высокая стоимость расходного материала (гранатовый абразив - garnet), теплое помещение; достоинства: кромки материала не подвержены оплавке и окаливанию, высокие геометрические параметры обработанной поверхности (не требуется дополнительная механическая обработка).

Таблица 1.1.

Сравнительный обзор различных методов обработки материала

Параметр	Вид резки			
	кислородная	плазменная	лазерная	гидроабразивная
Типичная область применения	металлы и их сплавы, кроме нержавеющей стали, алюминия, меди, латуни; бетон и железобетон, цветные металлы (кислородно-флюсовая резка)	металлы и другие электропроводные материалы (плазменно-дуговая резка); различные неэлектропроводные материалы (резка плазменной струей)	материалы, не отражающие и не пропускающие свет	почти любые материалы
Характерная толщина металла (мм)	до 1500 - 2000 и больше	до 100 - 150, обычно до 50 - 100	до 40, обычно до 6 - 20	до 300
Типичная ширина реза (мм)	до 10	2-7	0,1-1	от 0,5-1
Качество	Ra 40 - 80 мкм.	Ra 10 - 20 мкм.	Ra 2,5 - 10 мкм.	Ra 0,25 - 0,5 мкм.
Скорость резки металла (без пакетной резки)	6 - 800 мм/мин	до 25000 мм/мин	300 - 6000 мм/мин	1 - 2400 мм/мин
Зона термического влияния (мм)	3 - 6	0,5 - 0,8	0,3 - 0,5	Отсутствует
Стоимость оборудования	3000 - 70000€	30000 - 300000€	40000 - 500000€	160000 - 300000€
Стоимость обслуживания	низкая	высокая	высокая	высокая

1.3 Теоретические модели процесса гидроабразивной резки

Двумерные модели гидроабразивного резания в направлении подачи

Hashish предложил двумерную модель процесса гидроабразивного резания в направлении подачи (рисунок 1.4) по результатам макроскопического анализа, основанного на данных высокоскоростной съемки процесса гидроабразивного резания в прозрачном материале (плексиглас) [75, 77].

В предложенной модели Hashish устанавливает последовательную очередность процесса резания, в основу которой положены три режущих каскада: входного, основного режущего и выходного. В процессе гидроабразивного резания струя врезается в материал, увеличивая постепенно глубину реза. Это первый каскад - входной. Каскад основного резания формируется в процессе достижения максимальной глубины реза в области фронта разрушения. В дальнейшем струя отклоняется в обратную сторону от направления подачи, образуя на дне реза - треугольник, показанный на рисунке 1.4. Этот каскад получил название выходной.

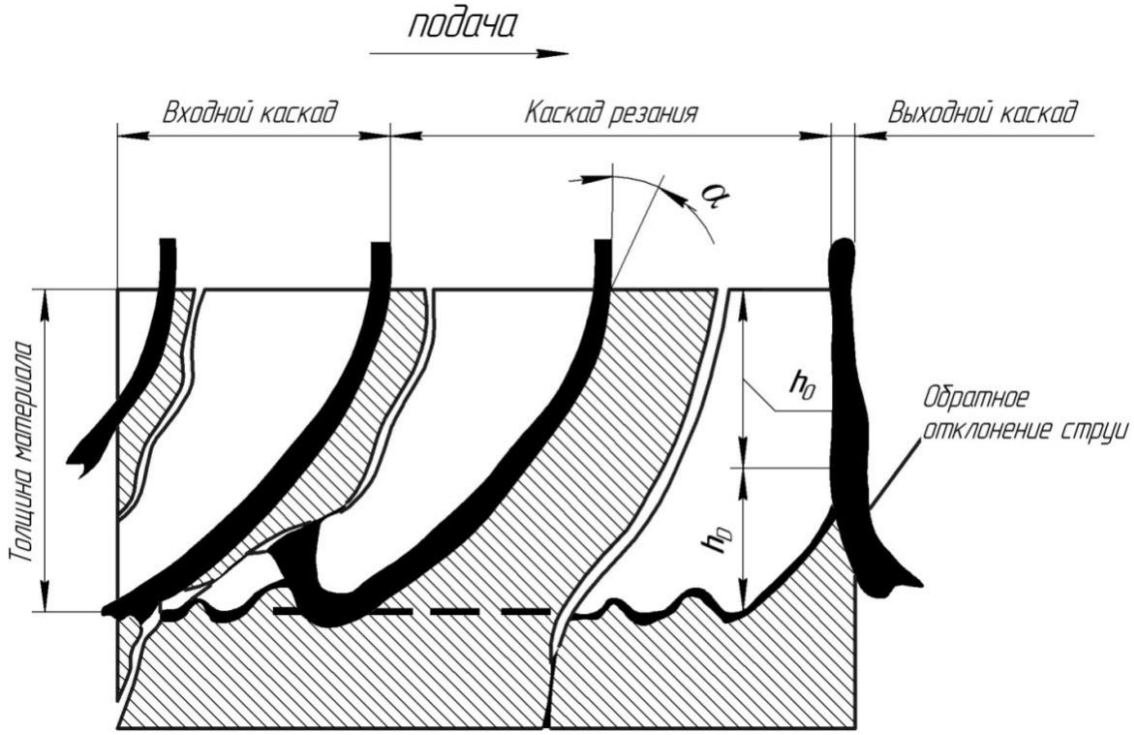


Рисунок 1.4. Схема прохождения процесса гидроабразивного резания

R. Kovacevic доказал при помощи инфракрасной термографии, что амплитуда зоны нагрева вокруг этого треугольника увеличивается, что подтверждает кумулятивный эффект теплообразования [81].

Mohan установил наличие гидродинамических явлений (турбулентность и кавитация) во входном и выходном каскадах в связи с наличием концентрации сигналов акустической эмиссии в этих зонах [87].

Используя теорию разрушения твердого материала, сформированную Bitter, Hashish разделяет цикл резания по глубине реза на две стадии [65, 66, 77].

Первая стадия режущего цикла представляет собой зону интенсивного износа h_0 (рисунок 1.4). На данной ступени процесс съема материала производится единичными абразивными зернами с малыми углами столкновения, что свойственно процессу микрорезания [67, 77].

Переход с первой ступени режима резания на вторую h_D характеризуется достижением некоторого угла столкновения. При проникновении в материал характер поведения гидроабразивной струи подчиняется корреляционной зависимости с уменьшающимся коэффициентом. Удаление материала производится различными видами эрозии, которое связано с многоходовой «бомбардировкой» абразивными зернами, формированием трещин и повышением твердости поверхности по причине пластической деформации. В этой зоне характерно образование волнистости штрихов обработки на поверхности резания. Процесс разрушения заканчивается по причине достижения критической глубины реза, а движение абразивных зерен происходит на дне реза под углом $\varphi \equiv 90°$.

Однако теоретических разъяснений наличия этих двух стадий резания материала Hashish не предоставляет [77]. Также отсутствуют экспериментальные исследования особенностей резания хрупких и пластичных материалов.

Для исследования режущего фронта Blickwedel производил обработку образцов с различными технологическими режимами, развивая концепцию двухступенчатой модели Hashish [67]. Применяя скоростную съемку, Blickwedel установил в области фронта реза наличие нескольких стадий разрушения, а именно, начало возникновения первой стадии («зона деформационного износа») с глубиной

реза 30 - 40% по сопоставлению с максимальной глубиной. Впоследствии, Ohlsson подтвердил процесс многостадийного возникновения режущего фронта [88]. Опираясь на измерение силы резания, Ohisson, разрабатывает феноменологическую модель образования штрихов обработки, которая сформирована на изменениях геометрии фронта реза.

Kim и Zeng продолжили процесс усовершенствования модели Hashish [94]. На первой стадии процесса резания, «зона прямого воздействия», абразивные зерна оказывают режущий эффект на заданную ширину реза. При углублении в материал, зона обработки позади гидроабразивной струи обнажается, что влечет изменение направления процесса резания. Главным моментом в модели Kim и Zeng является то, что процесс резания взаимосвязан с углом абразивных зерен в углах скольжения, не завися от выбора материала [94].

Ramulu и Arola создали трехступенчатую модель резания (рисунок 1.5) [63, 64], в которой ввели понятие «максимальная входная зона», характеризующуюся пластической деформацией под почти перпендикулярными воздействиями абразивных зерен. Позднее Kovacevic и Guo проводили описание этого процесса [72, 83]. Размер максимальной входной зоны находится в зависимости от интервала варьирования расстояния между обрабатываемым материалом и соплом.

Ramulu и Arola отметили в процессе гидроабразивной резки следующие зоны: зона чистового резания и зона чернового резания [63, 64]. Данные зоны указывают, что структура поверхности резания претерпевает изменение с увеличением глубины реза.

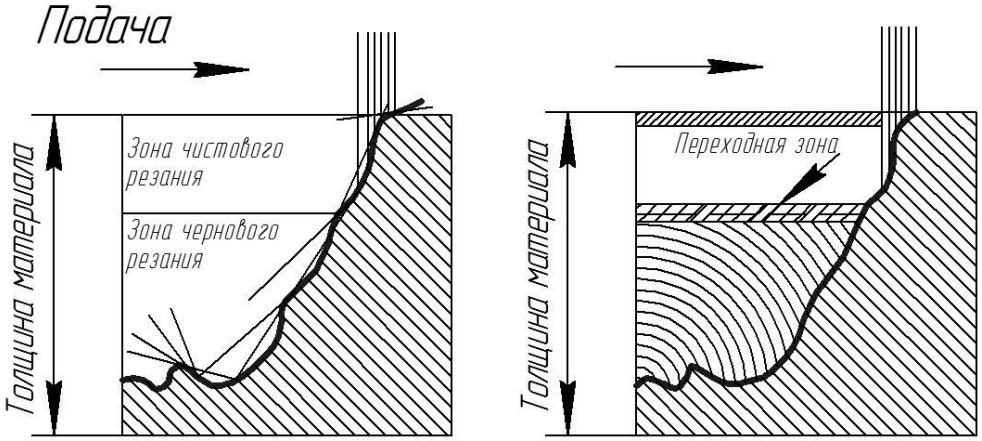


Рисунок 1.5. Моделирование перемещения фронтов реза

Ramulu и Arola доказали, что интенсивное разрушение материала приостанавливается с увеличением глубины реза [63]. Этот момент связан со значительной энергетической потерей на процесс резания в верхней зоне сечения. При резке хрупких материалов это приводит к уменьшению процесса возникновения трещин в глубинных областях. Однако при резке пластичных материалов происходит уменьшение кинетической активности абразивных зерен, что влечет аккумулирование энергии на некой критической глубине. Затем разработанная феноменологическая идея была расширена до механистической модели процесса резания, что позволило создать управляющие уравнения для определения значения глубины «гладкой зоны» и «черновой зоны» [89, 90].

Трехмерные модели гидроабразивного резания в направлении подачи

Guo рекомендовал трехмерную модель процесса гидроабразивной резки, основываясь на процессах разрушения в направлении подачи и перпендикулярно к подаче [72]. Эти явления наблюдаются при резании материалов типа алюминия, титана, стали и керамики (рисунок 1.6).

Микрорезание единичными абразивными зернами ведет к формированию микроструктуры поверхности резания, что свойственно верхней зоне поверхности резания. При конкретных требованиях такое качество шероховатости поверхности может быть достигнуто в глубинной зоне резания.

Не вполне стабилизирующееся реактивное колебание струи формирует трехмерное перемещение фронта обработки во время процесса резания, что ведет к образованию штрихов на поверхности.

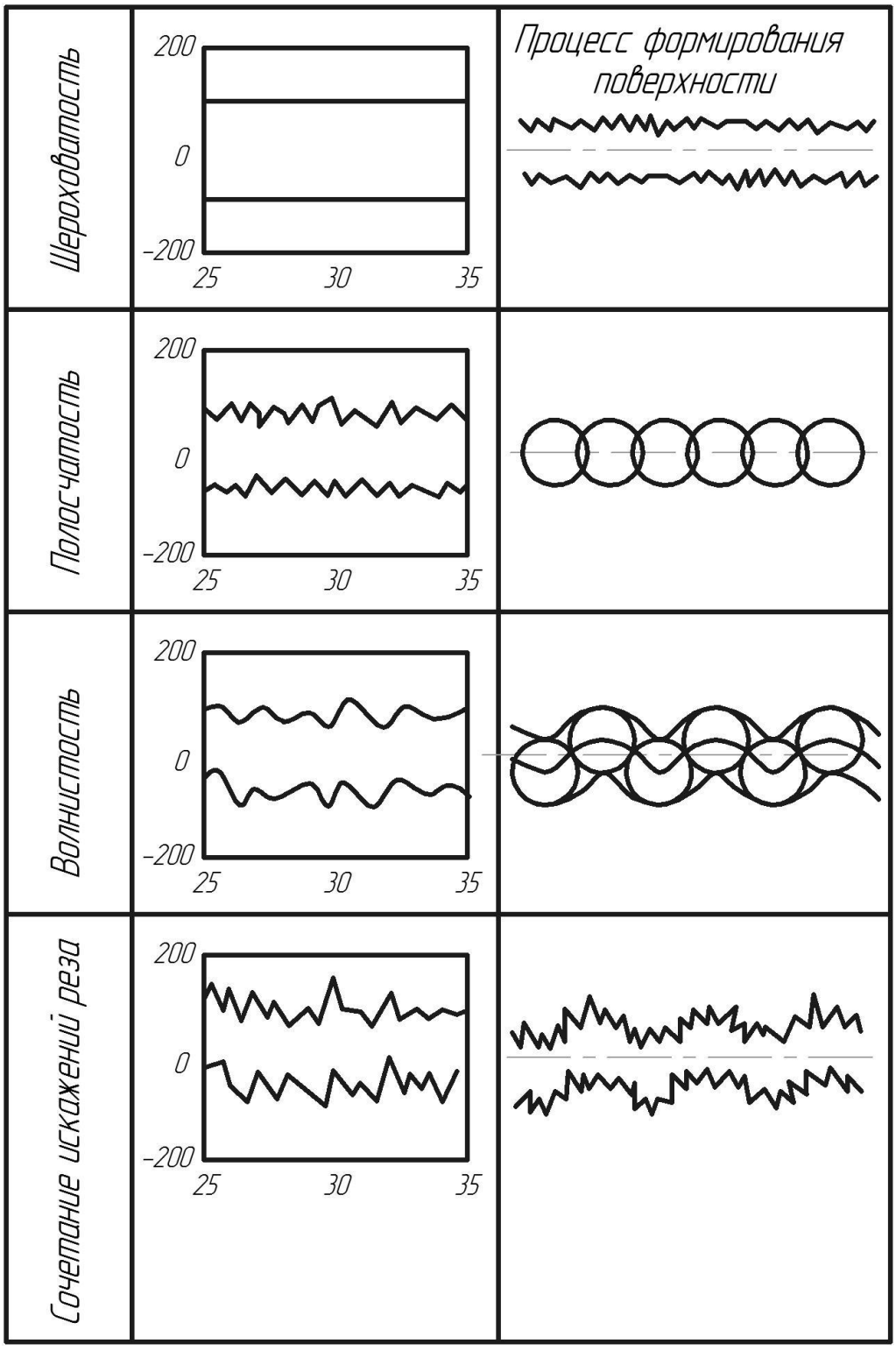


Рисунок 1.6. Трехмерные модели формирования поверхности резания

Данное явление свойственно «черновой зоне» резания (рисунок 1.7). Изучение различных явлений в режущем фронте основывалось Guo на обширном анализе поверхности резания [72].

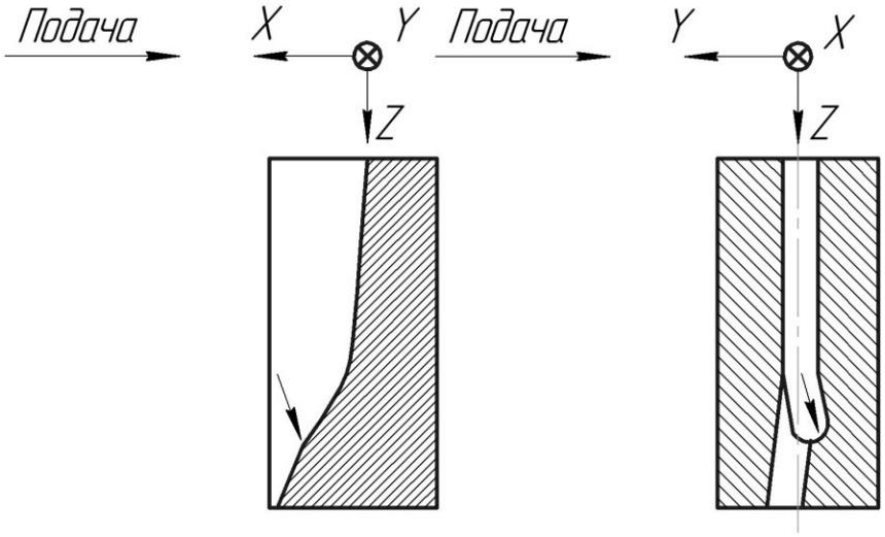


Рисунок 1.7. Схема колебаний струи в направлении подачи

Модель энергетического баланса гидроабразивного резания

Ramulu и Raju предложили гипотезу о постоянстве кинетической энергии гидроабразивной струи от длины обрабатываемого материала при переходе из «гладкой зоны» в «черновую зону» ($h_{sc} \rightarrow h_{Rc}$) (рисунок 1.8) [90].

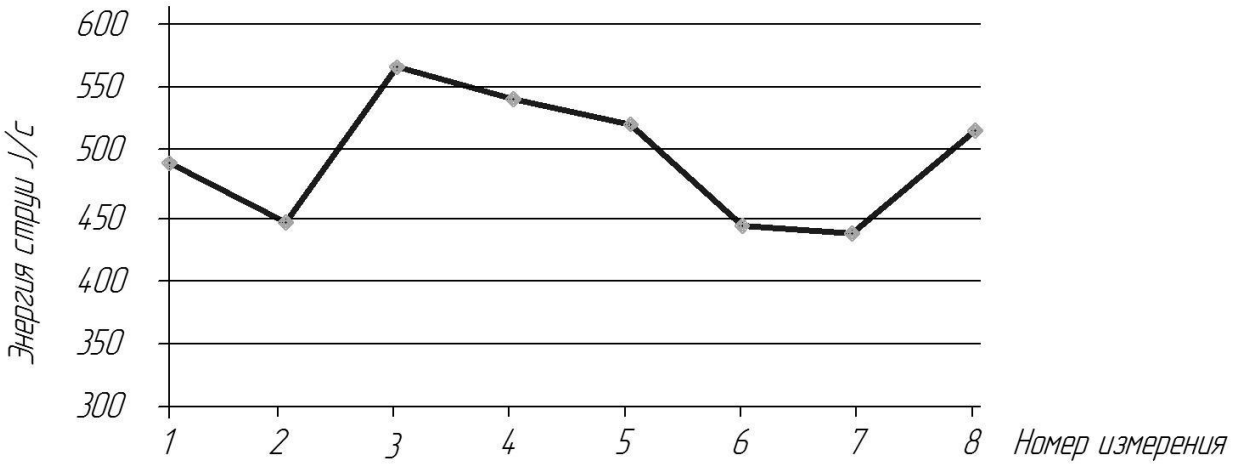


Рисунок 1.8. Энергия гидроабразивной струи

В таблице 1.2 представлены значения энергии струи в переходной точке. Эти значения подтверждают, что кинетическая энергия гидроабразивной струи оказывает влияние на образование штрихов обработки. Порядок варьирования

энергии гидроабразивной струи идеально коррелируется с технологическими показателями материала.

Таблица 1.2.

Кинетическая энергия гидроабразивной струи при переходе из «чистовой зоны» в «черновую» для разных материалов

Материал	Переходная энергия в J/s	
	Гранат 50	Гранат 80
Алюминий	600	800
Плексиглас	1,700	4,500
Сталь	500	700

Рисунок 1.8 иллюстрирует общее распределение энергии гидроабразивной струи по сечению резания.

Энергия, израсходованная гидроабразивной струей на резку:

$$E_{Diss} = E_A - E_{EX}, \tag{1.1}$$

где E_A - кинетическая энергия гидроабразивного потока;

E_{EX} - кинетическая энергия на выходе из материала.

$$E_A = \left(m_A + m_W\right) \cdot \nu_p^2 \cdot \frac{d_F}{2\kappa}, \tag{1.2}$$

где m_A - расход абразива;

m_W - расходы на потребление жидкости;

ν_p - скорость абразивного зерна;

d_F - диаметр гидроабразивного сопла;

κ - подача гидроабразивной струи.

Значительная часть теоретических и эмпирических опытов посвящена нахождению пороговой энергии (критическое давление насоса, критическая подача) требующейся для резания материала.

Значение критической энергии гидроабразивной струи, характеризующееся глубиной $h = h_{\max}$ при которой струя не оказывает разрушающего эффекта на материал:

$$E_{EX} = E_{thr}, \tag{1.3}$$

где E_{thr} - пороговая энергия сопротивления материала.

Подставляя уравнение (1.3) в (1.1) получаем:

$$E_{Diss}\left(h = h_{\max}\right) = E_A - E_{EX}, \tag{1.4}$$

Другое критическое требование для процесса гидроабразивного резания - $h = 0$. В данном случае, обрабатываемый материал не аккумулирует энергию, и общий итог кинетической энергии струи на входе и выходе из материала заготовки равен нулю.

Следовательно,

$$E_{Diss}\left(h = 0\right) = 0. \tag{1.5}$$

При вводе параметра $\chi(h)$, который подчиняется зависимости от глубины резания, тогда потери энергии струи для любой толщины материала определяются:

$$0 < h < h_{\max} : E_{Diss}\left(h\right) = \chi(h)\left[E_A - E_{thr}\right]. \tag{1.6}$$

Для уравнения (1.4), $\chi\left(h = h_{\max}\right) = 1$, а для выражения (1.5) $\chi\left(h = 0\right) = 0$ Функция $\chi(h)$ позволяет анализировать распространение энергии струи по глубине резания.

Уравнение (1.6) включает параметр χ, который отражает различные механизмы распространения энергии (рисунок 1.8):

- энергия, потраченная на начальный процесс эрозии χ_1;
- энергия, потраченная на вынос продуктов эрозии χ_2;
- энергия, потраченная в процессе резания χ_3;
- энергия, потраченная на нагрев обрабатываемого материала χ_4;
- энергия, потраченная на фрикцию по фронту реза χ_5;
- иные процессы, отвечающие за потерю энергии χ_6.

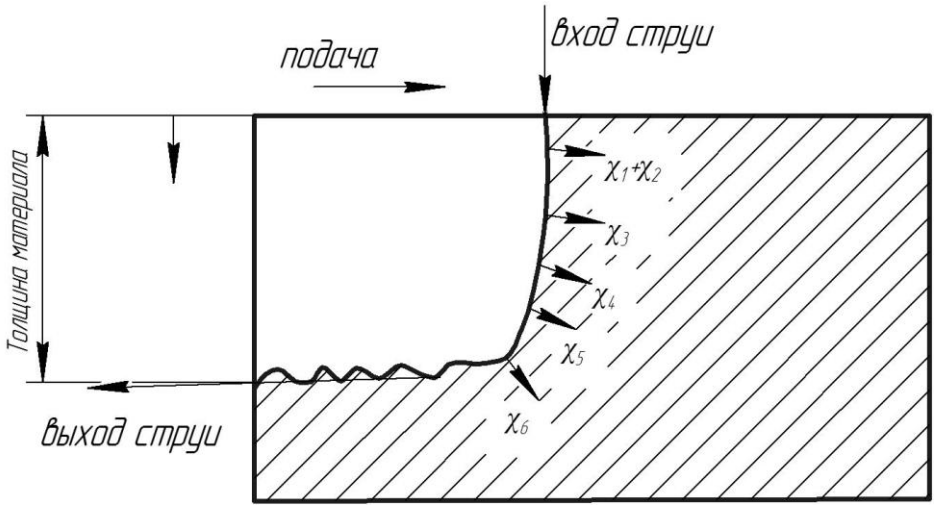


Рисунок 1.9. Распределение энергии гидроабразивной струи по режущему фронту

Поэтому, $\chi(h)$ примет вид:

$$\chi(h)=\sum_{i=1}^{N}\chi_i(h), \tag{1.7}$$

или

$$\chi(\Phi)=\sum_{i=1}^{N}\chi_i(\Phi), \tag{1.8}$$

где Φ - условная глубина резания, $\Phi = h/h_{\max}$.

Mohan вычислил решение выражения (1.6) для частного примера $h = h_{\max}\left(\chi = 1, \Phi = 1\right)$ [85, 86]:

$$E_{Diss} = \frac{\varphi^2 \mu^2 L_h \left(m_A + m_W\right)}{\kappa \rho_W \left(1 + \dfrac{m_A}{m_W}\right)^2} \cdot \left[\rho - \rho_{thr}\right], \tag{1.9}$$

где φ - угол падения гидроабразивной струи на материал;

μ - коэффициент, отвечающий за перенос количества движения;

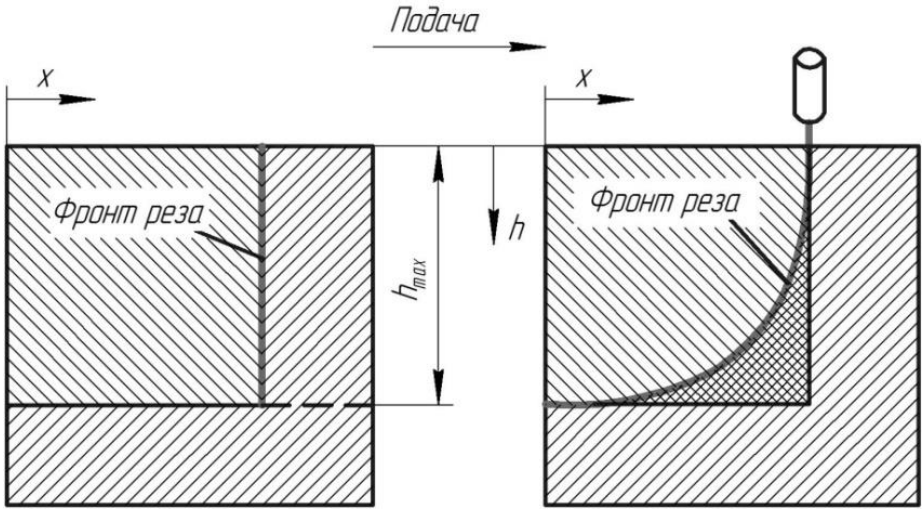
L_h - толщина обрабатываемого материала;

ρ_W - плотность жидкости.

Подвергая анализу полученные данные можно отметить:

- энергия, потраченная на процесс резания, составляет 60 - 90% от первоначальной, что свойственно процессу резания материалов;

- значение потери энергии находится в зависимости от глубины реза и начального значения энергии гидроабразивной струи.



а) б)

Рисунок 1.10. Схема сравнения гидроабразивной резки при идеальном (а) и реальном (б) процессе обработки

Например, при малом значении глубины резания потери энергии струи уменьшаются. Этот процесс описывается уравнением второго порядка (рисунок 1.10):

$$E_{Diss}\left(h_{\max}\right) = a_1 \cdot h_{\max}^2 + b_1 \cdot h_{\max} + c_1 . \tag{1.10}$$

Затем следует произвести решение задачи для $E_{Diss} = 0\ (\chi = 0,\ \Phi = 0)$.

Моделирование формы режущего фронта

При описании формы фронта реза $h(x)$, Zeng предложил параболическое уравнение [93]. Geskin и Chao при описании режущего фронта руководствуются полиномом второго порядка. Это предоставляет возможность определить зависимость влияния максимальной высоты штрихов и глубины реза при обработке [68]:

$$h(x) = a(x-b)^2 + c, \tag{1.11}$$

где $a, b\ и\ c$ - постоянные величины, полученные после измерений.

Для $c = h_{\max}\ и\ b = x_{\max}$

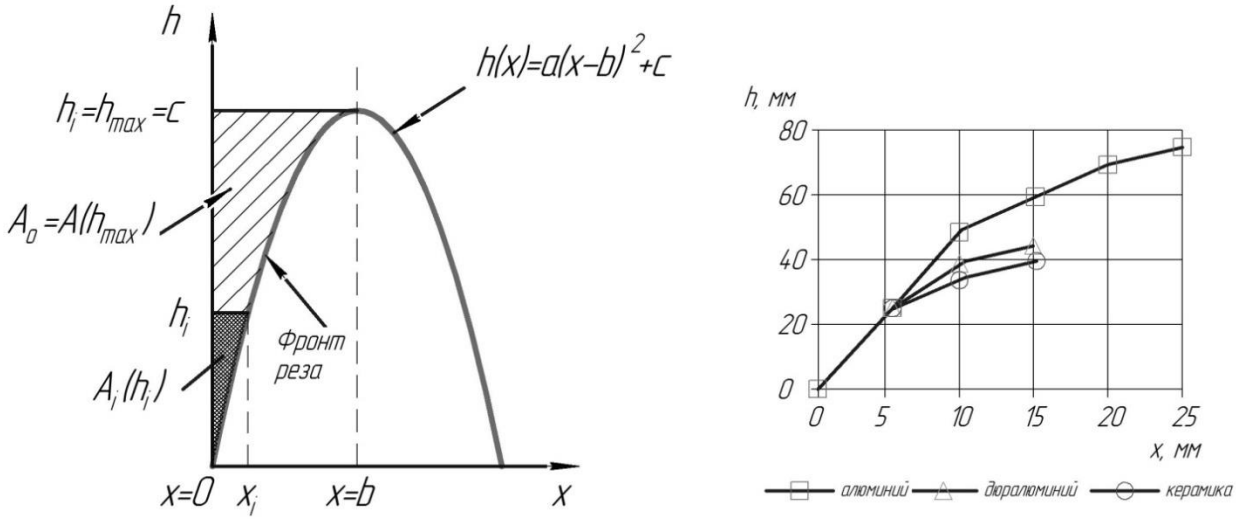
$$a = \frac{-c}{b^2} = \frac{-h_{max}}{x^2{}_{max}}, \qquad (1.12)$$

Оценку параметров x_{max} и h_{max} можно производить для любой поверхности процесса резания. Форма фронта реза гидроабразивной струи (таблица 1.3), полученная по модели, отвечающая параметрам уравнения регрессии представлена на рисунке 1.11, б.

Таблица 1.3.

Коэффициенты уравнения регрессии для определения формы фронта реза

Образец	Материал	Параметр		
1	Алюминий	-0,337	8,3	22,0
2	Алюминий	-0,336	8,0	20,8
3	Керамика	-0,200	15,0	45,0
4	Чугун	-0,173	13,4	41,6
5	Бетон	-0,221	25,0	75,0



а) б)

Рисунок 1.11. Моделирование фронта реза

Высота кривой находится в соответствии с глубиной реза. Значение максимальной глубины реза достигается в том случае, если параболическая функция, dh/dx, равна нулю.

Моделирование объема срезаемого слоя и глубины резания

Разработанная Hashish модель эрозии по определению объема удаляемого слоя материала при малых углах атаки абразива по режущему фронту [74] в основу, которой положена теория микрорезания Finnie [70]:

$$dV_M = \frac{7}{\pi}\left[\frac{R_f^3 \cdot dm_A}{\rho_p}\right]\cdot\left[\frac{\upsilon_P}{\upsilon_C}\right]^{2.5} \sin 2\varphi\sqrt{\sin\varphi}\,, \tag{1.13}$$

где R_f - параметр шероховатости;

ρ_p - плотность абразива;

υ_C - характеристическая скорость абразивного зерна;

$$\upsilon_C = \sqrt{\frac{3\sigma_f R_f^{3/5}}{\rho_p}}\,, \tag{1.14}$$

σ_f - предел твердости.

При малых углах атаки, уравнение (1.13) примет следующий вид:

$$dV_M = \frac{14dm_A}{\pi\rho_p}\cdot\left[\frac{\upsilon_P}{\upsilon_C}\right]^{2.5}\cdot\varphi^{1.5}. \tag{1.15}$$

Локальный коэффициент смещения объема обрабатываемого материала определяется, исходя, из геометрической модели процесса гидроабразивной резки:

$$dV_M = dh\cdot\kappa\cdot d_{jet}\,. \tag{1.16}$$

Учитывая, что $dm_A = m_A\dfrac{dx}{d_{jet}}$ (рисунок 1.12), глубина резания:

$$h_C = \frac{c_1 d_{jet}}{2.5}\cdot\left[\frac{14dm_A}{\pi\rho_p\kappa d_{jet}^2}\right]^{0.4}\cdot\left[\frac{\upsilon_P}{\upsilon_C}\right]. \tag{1.17}$$

Площадь соприкосновения гидроабразивной струи и материала (рисунок 1.12):

$$A_W = \frac{\pi d_{jet} h}{2}. \tag{1.18}$$

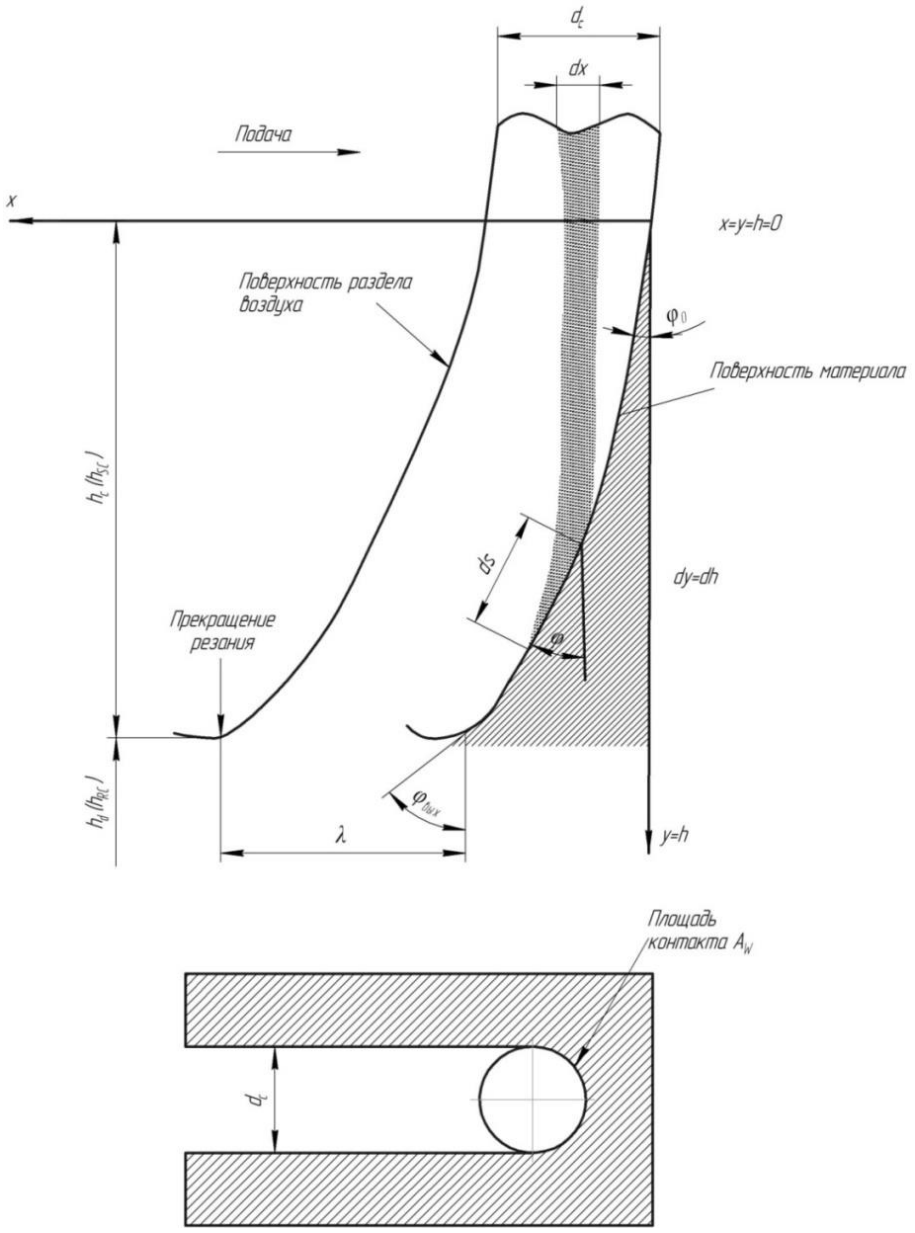


Рисунок 1.12. Геометрическая модель гидроабразивного резания

Скорость абразивного зерна по глубине резания:

$$\upsilon_P(h) = \upsilon_P - \left[\frac{\pi C_f}{4} \cdot \frac{d_{jet} \rho_{jet} v_P^2}{(m_A + m_W)} h \right]. \tag{1.19}$$

С ростом глубины резания происходит увеличение угла столкновения абразивного зерна с материалом. В связи с этим используется модель, разработанная Bitter [65,66].

Подставив υ_P в уравнение, полученное Bitter, получим:

$$dV_M = \frac{m_A}{2\varepsilon_M^{def}}\left[V_P\left(1-\frac{C_f}{d_{jet}}h\right)-\kappa_{thr}\right]^2, \tag{1.20}$$

где ε_M^{def} - удельная энергия процесса эрозии;

κ_{thr} - предельная подача.

При определении глубины резания dh Hashish предложил [84]:

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi d_{jet}\sigma_f\kappa}{2c_2 m_A\left(\upsilon_P-\kappa_{thr}\right)^2}+\frac{C_f}{d_{jet}}\cdot\frac{\upsilon_P}{\upsilon_P-\kappa_{thr}}}. \tag{1.21}$$

Таблица 1.4.

Параметры модели для определения глубины резания

Параметр	Физическое значении
$N_d = \frac{h_d}{d_{jet}}$	Коэффициент, отвечающий за глубину зоны резания, где слой удаляется при воздействии деформационного износа
$N_C = \frac{h_C}{d_{jet}}$	Показатель глубины зоны резания, где слой удаляется микрорезанием
$N_1 = \frac{\rho_P\kappa d_{jet}^2}{d_{jet}}$	Коэффициент, зависящий от подачи
$N_2 = \frac{\rho_P v_P^2}{\sigma_f}$	Коэффициент, отвечающий за давление единичного зерна на обрабатываемую поверхность
$N_3 = \frac{\rho_P\kappa_{thr}^2}{\sigma_f}$	Коэффициент, отвечающий за давление зерна на обрабатываемую поверхность
$N_4 = C_f$	Коэффициент, отвечающий за лобовое сопротивления
$N_5 = 3R_f^{3/5}$	Коэффициент, отвечающий за шероховатость поверхности
$N_6 = \frac{\kappa_{thr}}{\upsilon_P} = \frac{N_3}{N_2}$	Коэффициент критической скорости

Для определения глубины резания Hashish выделяет ряд коэффициентов (таблица 1.4) [76]. Таким образом, полная глубина реза:

$$h = h_c + h_d = d_F\left(N_C + N_d\right). \tag{1.22}$$

В предложенной группе уравнений, значения величин σ_f и κ_{thr} предварительно вычисляются.

Заметим, что σ_f и κ_{thr} взаимосвязаны. Материалы, имеющие высокий предел текучести, при обработке обладают высоким уровнем критической подачи. Аналогично обстоит дело с резкой материалов, обладающих низким пределом текучести. Коэффициент лобового сопротивления принимается равным $C_f = 0{,}002$. Данное значение коэффициента адекватно при глубине резания до 50 мм.

Алгоритм процедуры вычисления модели Hashish представлен на рисунке 1.13 [76]. Корреляция полученных результатов по модели и эксперименту сравнительно высокая.

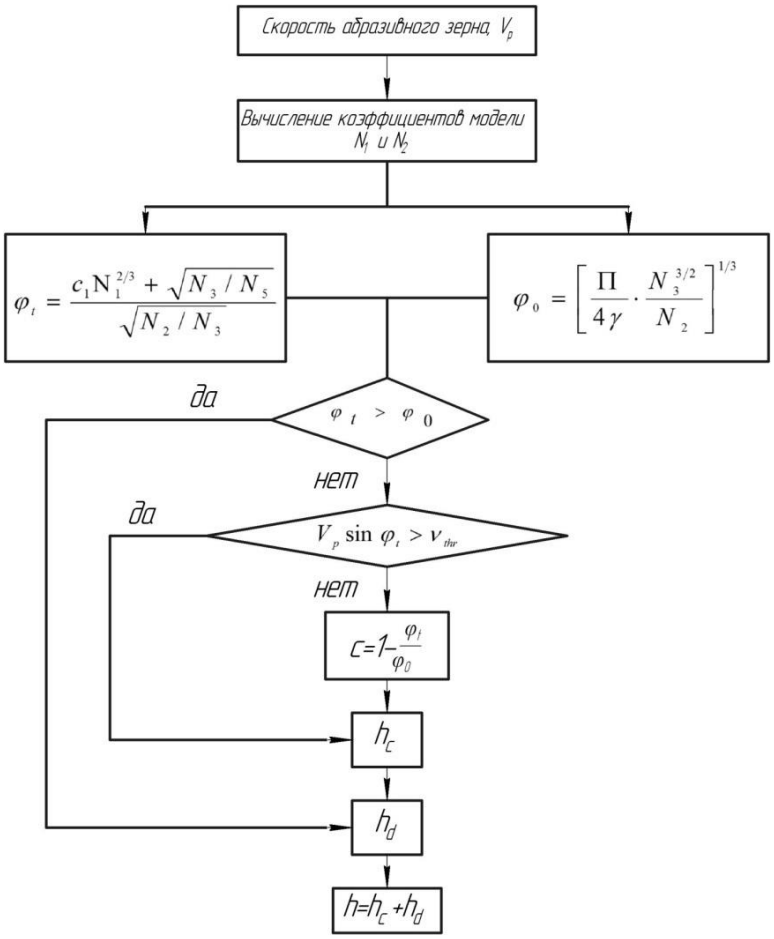


Рисунок 1.13. Алгоритм вычисления глубины реза

Модель Hashish используется только для глубины резания $h > 30$ мм, а наиболее точный результат может быть получен для небольшой глубины $h < 15$мм.

1.4 Состояние вопроса по гидроабразивному раскрою заготовок и пути совершенствования этого процесса

Развитие водоструйной резки направлено не только на расширение функциональных возможностей процесса, но и на повышение точности, производительности и эффективности всего процесса. Существует ряд основных областей, в которых ведутся работы по улучшению процесса водоструйной обработки материалов.

Большой вклад в изучение процесса гидроабразивного разрушения материалов внесли отечественные и зарубежные ученые: Р.А. Тихомиров И.И. Шапиро Ю.С. Степанов Г.В. Барсуков В.С. Гуенко Г.В. Барсуков В.А. Шманев А.А. Барзов С.П. Козырев И.В. Петко, Е.Н. Петухов, М. Хашиш, И. Финни, Р. Ковачевич, Р. Мохан, И. Хидео, Н. Бальк, А. Попан, М. Рамулу, С.Н. Го, Г.Л. Chahine, J. Chao, P. Berce, G. Fowler.

Следует также отметить, что одним из первых и наиболее очевидных способов улучшения водоструйной обработки является повышение рабочего давления насосов во время резки. Давление выше по потоку от водоструйного сопла влияет на скорость потока и, следовательно, скорость потока воды. Увеличение скорости истечения приводит к увеличению кинетической энергии потока и его режущей способности.

Увеличение рабочего давления в системах гидроабразивной резки было следующим: первоначально использовалось давление 200 МПа, а с развитием насосных агрегатов оно возросло до 400 МПа. В 2006 году компания Flow представила насос с рабочим давлением 600 МПа, который вывел технологию гидроабразивной резки на новый этап развития. А в 2012 году американская компания KMT объявила, что модернизировала свой насос, получив рабочий уровень давления 720 МПа, но такой насос еще не появился на рынке.

Однако не всегда повышение рабочего давления приводит к улучшению процесса резки. Это связано с повышенным износом основных расходных материалов, к которым относятся: уплотнения высокого давления, клапаны, форсунки, фокусирующая трубка и т. д. Время обработки материала при высоких давлениях сокращается, что приводит к повышению производительности и снижению затрат на единицу обрабатываемого материала. В то же время стоимость обслуживания оборудования увеличивается и из-за этого экономического эффекта от повышения рабочего давления может не быть. Следовательно, существует оптимальное значение рабочего давления, которое обеспечивает минимальное значение общей стоимости водоструйной обработки.

Декларация основных компаний-производителей оборудования для гидроструйной обработки (Flow, KMT, BHDT, Omax, Bystronic, Uhde и др.), о предложении насосов с рабочим давлением выше 500-600 МПа может быть объяснено только рекламным или маркетинговым ходом.

Энергия движущейся жидкости, создаваемой насосом, должна использоваться как обрабатывающий инструмент. Для этого используется струйная головка, в которой непосредственно создается режущий инструмент. Улучшение этого узла является еще одним направлением дальнейшего развития метода обработки. Поэтому большое количество работ было посвящено определению оптимального профиля сопла, формирующего гидроабразивный поток, для создания сверхзвукового потока с минимальными потерями. Весьма перспективным видится увеличение ресурсов основных элементов гидроабразивного потока: сопла и фокусирующей трубки, которые расходуются при механической обработке и интенсивно изнашиваются при формировании инструмента из-за постоянного контакта с водой и абразивными частицами.

Третье очень важное направление в развитии процесса гидроабразивной резки - это усовершенствование программного и математического обеспечения, адаптированного к специфике процесса. Существует ряд специфических характеристик, которые не присущи традиционным методам обработки материалов. Во-первых, это негибкость инструмента, что приводит к задержке

струи при выходе из материала, которая в основном зависит от физических и геометрических параметров материала, а также от скорости подачи относительно него. Во-вторых, это изменение режущих свойств струи вдоль ее оси вследствие того, что кинетическая энергия струи расходуется в процессе разрушения материала, при вымывании продуктов износа, при нагревании, при отводе тепла и кроме того происходит процесс расширения струи. В-третьих, это изменение режущих свойств инструмента из-за износа сопла и фокусирующей трубки. Кроме того, режущие свойства могут ухудшаться как долго, так и мгновенно. Поэтому совершенствование программно-математического обеспечения является перспективным направлением улучшения резки.

Другим способом улучшения резки является принудительное изменение свойств и параметров струи, которые влияют на прочность обрабатываемого материала: увеличение начального сечения потока, изменение характера воздействия гидроабразивной струи на материал и т. д.

Бурнашов М.А. в своей работе [6] предложил повысить эффективность резки неметаллических листов с помощью струй охлажденной воды под высоким давлением. Увеличение эффективности достигается добавлением жидкого азота в сверхзвуковой поток воды. В результате отдельные частицы воды замерзают и образуются мелкие частицы льда. Работа экспериментально показала, что использование струи ледяной воды в качестве режущего инструмента позволяет снизить рабочее давление струи в 2,6 раза, а энергопотребление при резке неметаллических листов на 50%, что обеспечивает увеличение срока службы гидрорежущих устройств.

Известно, что сверхзвуковая струя жидкости имеет тенденцию затухать с увеличением расстояния от сопла. Это связано с возникновением сил, которые действуют в результате разницы скоростей струи воды с окружающей средой в покое. В результате действия этих сил поверхность струи насыщается воздухом (аэрация), после чего воздух поступает в ядро струи. Благодаря этим взаимодействиям, когда расстояние от выхода из сопла увеличивается, струя представляет собой смесь отдельных частиц воды и воздуха. Часть потока

жидкости, в которой поддерживается непрерывный, не затухающий поток с постоянным давлением, скоростью и плотностью, называется начальным. Очевидно, что процесс разрушения материалов наиболее эффективен при взаимодействии именно в этой секции струи. Таким образом, способность эффективно резать материалы водоструйной струей ограничена длиной участка (при давлении 600 МПа она достигает 250-300 мм).

В своих исследованиях Кузьмин Р.А. [20], показывает, что длина начального участка струи может быть увеличена путем добавления водорастворимых полимеров в рабочую среду, а именно карбоксиметилцеллюлозы, глицерина, поливинилового спирта, полиоксиэтиленгликоля, полиакриламида, полиоксиэтилена. Автор показывает, что полимерные добавки значительно стабилизируют струю, в то время как угол конусности внешних границ струи уменьшается, длина начального участка увеличивается в 1,4-1,7 раза по сравнению с потоком чистой воды. В качестве одного из доказательств Кузьмин Р.А. показывает, что сила, действующая на материал струи с 0,01% -ным по массе раствором полиоксиэтилена, увеличивается в 1,6-1,7 раза по сравнению с потоком чистой воды, и это связано с увеличением незначительного расхода жидкости через сопло в 1,16-1, 28 раз, а расход рабочей жидкости в 1,16-1,17 раза.

Одним из методов повышения производительности процесса гидроабразивной резки материалов является использование пакетной резки. Суть метода состоит в том, чтобы разрезать материал на пластины, собранные определенным образом. Этот метод используется только для резки листового материала, сложенного в пачку, то есть листы размещаются один поверх другого. Таким образом, при прохождении контура можно получить количество штук, равное количеству листов в упаковке. Подробно этим методом занимался Михеев А.В. [27] в своей диссертации. Экспериментально подтвержденный прирост производительности в 1,5 раза. Кроме того, автор предлагает технологические рекомендации по выбору условий резания и конструктивных параметров пакета материала.

Другим способом повышения эффективности гидроабразивной резки материалов является использование многопроходной резки. Подобный метод рассматривается в работах [40, 56]. Предлагаемый способ состоит в резке материала не за один проход, а за несколько, но со скоростью, превышающей скорость, необходимую для сквозной резки. Например, можно разрезать сталь толщиной 16 мм со скоростью подачи 1 мм/с за 1 проход, и можно разрезать эту сталь за 2 прохода со скоростью подачи 2 мм/с или за 3 прохода со скоростью подачи 3 мм/с и т. д. В этом случае время воздействия на материал одинаково, но качество получаемой поверхности различается. Для каждого материала и каждой толщины существует оптимум, который определяется экспериментально.

Одним из основных недостатков гидроабразивной обработки является ее высокая стоимость и низкая производительность. Проанализировав стоимость резки, отметим, что она носит оценочный характер, поскольку удельная стоимость запасных частей, например, насоса, зависит от режимов работы насоса. Анализ показал, что стоимость песка (при режиме: давление 400 МПа, расход абразива 250 г/мин) составляет примерно 36% от стоимости резки, без учета стоимости оборудования. Таким образом, можно сделать вывод, что снижение расхода песка, поддержание качества получаемой поверхности, позволит снизить стоимость обработки, то есть повысить ее эффективность.

Во время обработки гидродинамические параметры гидроабразивной струи уменьшаются, то есть уменьшается ее скорость, увеличивается разбрызгивание струи, что приводит к увеличению площади контакта между струей и обрабатываемой поверхностью и уменьшению удельного давления струи. Это влияет на интенсивное увеличение энергозатрат процесса и снижению технологических параметров обработки при гидроабразивной резке. Эти причины являются предпосылками для снижения качественных показателей обрабатываемых материалов, которые во многих случаях имеют первостепенное значение при управлении процессом резки.

Для решения проблемы повышения гидродинамических параметров гидроабразивной струи необходимо установить рациональные параметры

обработки для контроля и организации наиболее эффективного технологического процесса гидроабразивной обработки. Необходимым условием для этой рабочей гипотезы стали результаты исследований таких ученых, как Решетников М.К., Шпилев В.В., Береда Н.Н. [13, 25, 33, 52, 61]. Они отмечают увеличение режущей способности и повышение производительности гидроабразивной резки путем закручивания струи рабочей жидкости за счет нарезания в смесительной трубке спиралеобразной канавки с шагом *h*. Авторы приводят результаты экспериментов, которые иллюстрируют уменьшение конусности закрученной струи по сравнению со стационарной.

Основными факторами, влияющими на интенсивность закрутки струи ω будут: скорость потока на оси υ_{m}; шаг спиралеобразной канавки h; внутренний радиус сопла *R* (рисунок 1.14).

Интенсивность закручивания струи можно рассматривать, как функцию от этих факторов:

$$\omega = f(\upsilon_m, R, h). \tag{1.23}$$

Согласно теории размерностей и подобия, одной из безразмерных комбинаций указанных факторов будет:

$$\omega = \frac{k\upsilon_m}{h}\left(\frac{r}{R}\right)^{\alpha}. \tag{1.24}$$

Если струйное движение поступательно, то условие сохранения количества движения для гетерогенной среды запишется в виде:

$$\int_0^{\text{F}} \rho_1 \upsilon^2 (1+\varphi)\text{dF} = \text{I}_0 . \tag{1.25}$$

где φ - местная весовая концентрация абразивных зерен;

υ – скорость в произвольной точке струи.

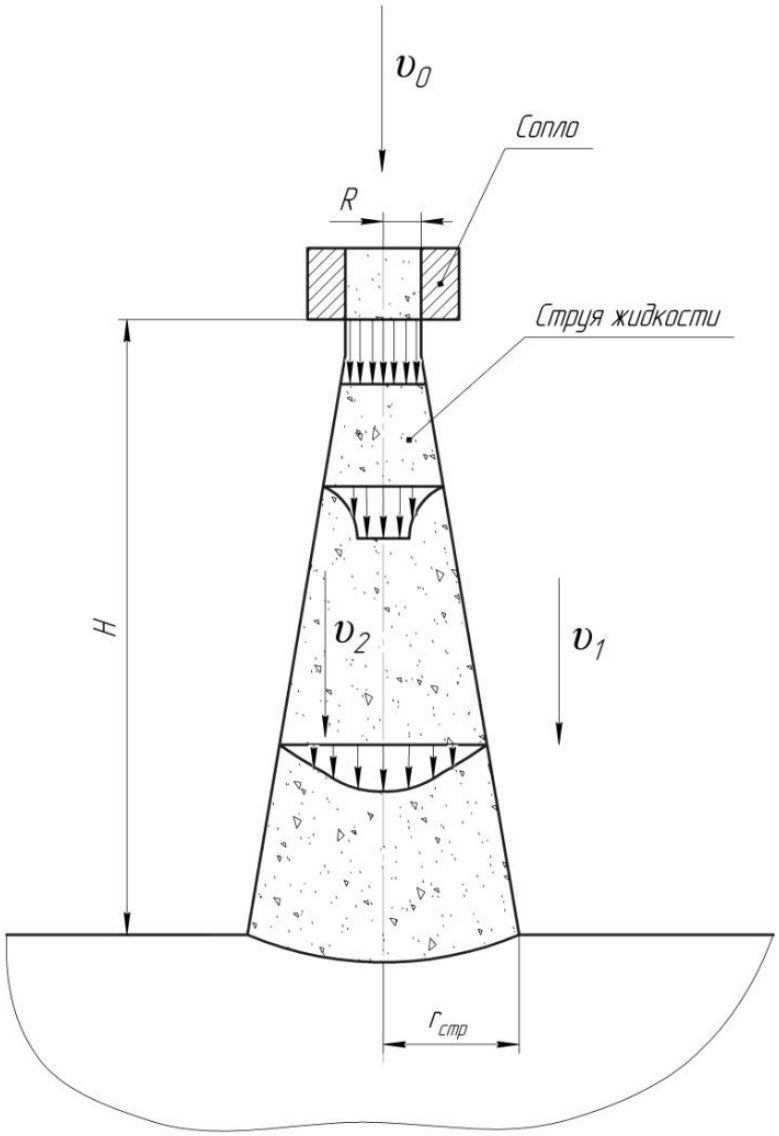


Рисунок 1.14. Гидроабразивная струя

С учетом закручивания струи уравнение (1.25) примет вид:

$$\int_0^F \rho_1[\upsilon^2 + (\omega r)^2](1+\varphi)dF = I_0 . \qquad (1.26)$$

Если $\rho_1 = \text{const}$, то уравнение (1.26) запишется в виде:

$$2\rho_1\upsilon_m^2 F\int_0^1\left[\left(\frac{\upsilon}{\upsilon_m}\right)^2 + \left(\frac{\omega r}{\upsilon_m}\right)^2\right](1+\varphi)\xi d\xi = I_0 . \qquad (1.27)$$

После некоторых преобразований и вычислений, предполагая, что скорость и концентрация абразивных зерен в поперечном сечении струи идентичны, как и в однофазных струях с учетом выражения (1.28):

$$\upsilon_{\mathrm{m}} = \upsilon_0 \left(\frac{1}{\rho_2 \mathrm{F}} \frac{\mathrm{I}_0}{\mathrm{A}_2 + \mathrm{D}_2 + (\mathrm{C}_2 + \mathrm{E}_2)} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{1.28}$$

Получаем формулу для определения скорости на оси гетерогенной закрученной струи круглого сечения:

$$\upsilon_m = \upsilon_0 \left(\frac{I_0}{\rho_1 F} \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{1.29}$$

где υ_0 – начальная скорость струи (рисунок 1.14);

φ_{m} – концентрация абразивных зерен на оси струи;

k – безразмерный поправочный коэффициент, определяется опытным путем.

Выражение (1.29) показывает, что скорость на оси струи увеличивается при увеличении начальной скорости струи, её импульса и шага канавки, и уменьшается при увеличении плотности жидкости и площади живого сечения потока.

Диаметр закрученной гетерогенной струи выражается зависимостью:

$$d_{стр} = 0{,}44(H - R) \frac{B_2 + 0{,}5 \left[\left(A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 \right) - \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right) \right] \kappa}{B_2 + (A_2 - C_2)\kappa}, \tag{1.30}$$

где $\kappa = \frac{Q_2 \upsilon_0}{I_0 g}$ – постоянная;

Н – расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности;

$d_{стр}$ – диаметр струи у поверхности обрабатываемой детали.

Формула (1.30) показывает, что начальная скорость, расход абразивных зерен, расстояние от обрабатываемой поверхности и радиус сопла будут влиять на увеличение диаметра струи, а диаметр струи будет уменьшаться с увеличением шага канавки. Это объясняется тем фактом, что гидроабразивная струя, которая проходит через спиралеобразную канавку, закручивается и благодаря действующим центростремительным силам абразив концентрируется на оси струи. После поток жидкости стабилизируется, а сужение диаметра сопла компенсирует потерю энергии из-за прохождения потока через спиральную канавку. В результате

увеличивается концентрация абразива в окрестностях оси, приводящей к увеличению кинетической энергии ударного воздействия струи на материал, что приводит к повышению её режущей способности.

Авторы только указывают на возможность применения закручивания гидроабразивного потока без указания технологических свойств и практических рекомендаций по управлению процессом.

Проведенный анализ научно-исследовательских работ по рассматриваемой тематике показал недостаточную эффективность существующих теоретических моделей процесса гидроабразивной обработки, а именно эти модели содержат мониторинг поведения отдельных аспектов технологической системы, обычно, режущего инструмента - струя жидкости, которая связана с узкой производственной целенаправленностью. Большинство зависимостей в математических моделях получено эмпирическим путем, что обуславливает возможность их реализации для конкретных (частных) параметров гидроабразивного резания, стоп - факторы на которые накладываются в математической модели процесса.

В рамках выполненного анализа исследований по управлению процессом гидроабразивной резки в качестве актуальной идеи было выбрано использовать процесс гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости, так как применение данного способа позволяет закручивать гидроабразивную струю и за счет работы центростремительных сил осуществлять концентрацию абразивных частиц на оси струи, приводящей к увеличению кинетической энергии ударного воздействия струи на материал, что приводит к увеличению производительности процесса.

Входными параметрами процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости будут являться: текущий внутренний радиус водяного сопла r, начальный весовой секундный расход жидкости Q_1, начальный весовой секундный расход абразива Q_2, начальная скорость струи в сопле υ_0, концентрация частиц абразива на оси струи φ_m, начальная скорость жидкости υ_1, начальная

скорость примеси υ_2, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности *H*, средний диаметр абразивных частиц d, плотность частиц абразива ρ_2, коэффициент несущей способности контактной поверхности, предел текучести материала детали σ_s, плотность материала детали $\rho_д$, толщина обрабатываемого материала *B*.

Выходными переменными будут: внутренний радиус смесительной трубки сопла R, площадь поперечного сечения сопла S, шаг канавки гидроабразивного сопла h, площадь струи круглого сечения F, нормированная координата ξ, коэффициенты A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, начальный импульс струи I_0, подача κ, угол наклона нарезаемой канавки α, число оборотов закручиваемой струи *f*, глубина нарезаемой канавки *G*, число нарезов *n*, скорость гидроабразивной струи круглого сечения υ_m, диаметр гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемой детали $d_{стр}$, глубина внедрения частицы абразива в материал $h_{\max}$ и величина съема обрабатываемого материла за один удар абразивной частицы q.

С учетом описанной проблемы, задача по автоматизации процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости путем создания системы поддержки принятия решения (цифрового советника), обеспечивающей получение информации по расчету параметров резки без запуска физического процесса с выдачей рекомендаций оператору для достижения рациональных показателей по производительности процесса резки является актуальной задачей.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ

На гидродинамические параметры гидроабразивной струи, обеспечивающие получение высокой производительности и точного реза в процессе гидроабразивной обработки материалов, значительное воздействие оказывает требования, отвечающие за механизм формирования струи в сопле. В гидроабразивном сопле происходит преобразование, а затем переход потенциальной энергии в кинетическую энергию потока струи, то есть переход статического давления рабочей жидкости в скоростное, и этот процесс происходит при минимальных потерях давления в сопле.

Режим работы и параметры гидравлической обработки, а также производительность процесса гидроабразивной резки, непосредственно взаимосвязано с изменение ее гидродинамических параметров и качеством струи, которая является режущим инструментом. Следовательно, получение струи с высокими показателями гидродинамических характеристик представляет важнейшую задачу успешного использования гидроабразивной резки.

В нашем случае, предпосылкой к изучению процесса являются результаты исследований ученых [25, 33, 61], которые отмечают увеличение режущей способности и повышение производительности гидроабразивной резки за счет закручивания струи рабочей жидкости путем нарезания в смесительной трубке спиралеобразной канавки, изображенной на рисунках 2.1 и 2.2.

Этот новый способ гидроабразивной резки, основанный на закручивании струи рабочей жидкости, позволяет гидроабразивной струе, дополнительно проходя по спиралеобразной канавке, закручивается и за счет работы центростремительных сил происходит концентрация абразивных частиц на оси струи, приводящей к увеличению кинетической энергии ударного воздействия струи на материал. Кроме того, закручивание струи придает ей «сверлильный» эффект, что приводит к повышению режущей способности гидроабразивной струи, а значит и производительности обработки [25, 33, 61].

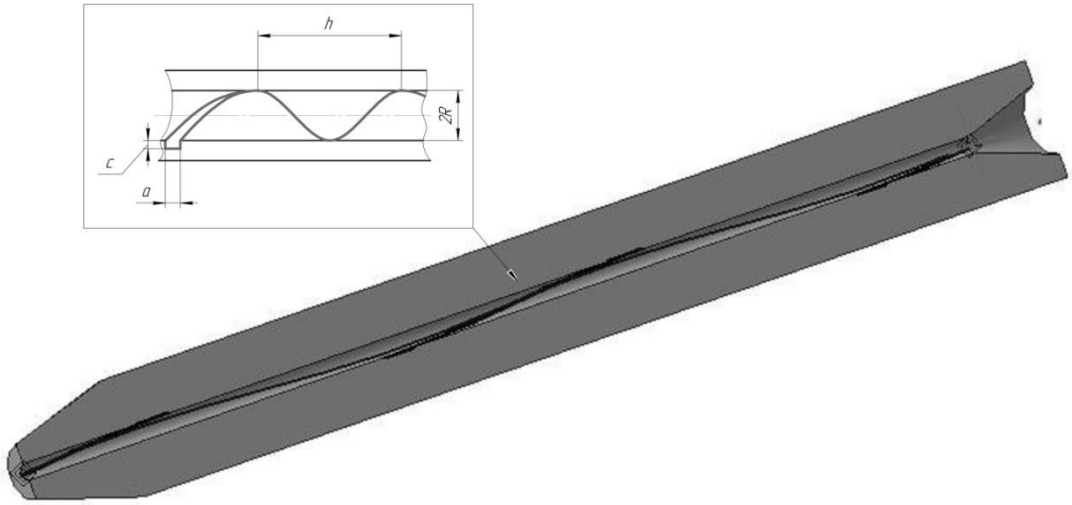


Рисунок 2.1. 3D –модель гидроабразивного сопла с канавкой в продольном разрезе: d - диаметр сопла, *R* - внутренний радиус смесительной трубки сопла, a - ширина канавки, *h* - шаг спиралеобразной канавки сопла, c - глубина канавки

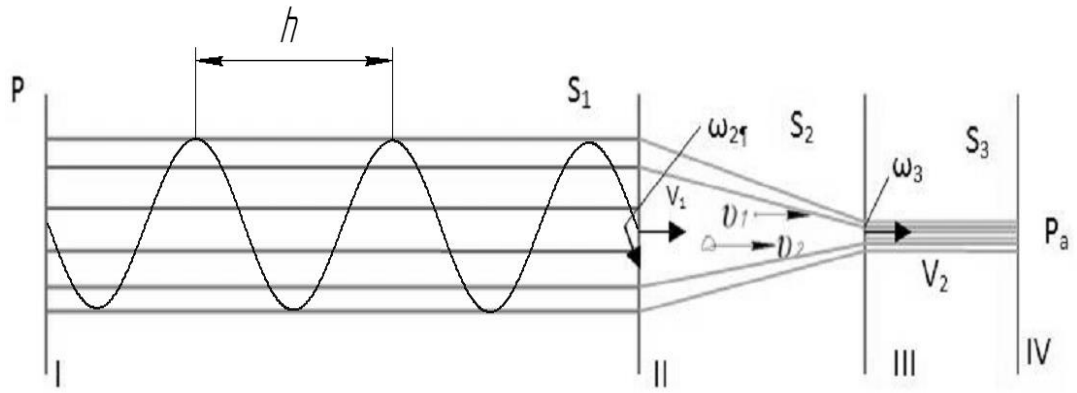


Рисунок 2.2. Схема гидроабразивного сопла со спиралеобразной канавкой

В основу разработки аналитических зависимостей процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости взята модель усталостного выкрашивания абразивных частиц с обрабатываемой заготовкой, т.к. данная модель является фундаментальной в методе гидроабразивной резки.

Совмещение данной модели, способа закрутки гидроабразивной струи с исследованиями Тихонова А.А. про глубину внедрения абразивных зерен в обрабатываемую поверхность заготовки, получим [57]:

$$h_{\max} = 2k_m^{0.5}\upsilon_m R_{абр} \sin\beta \sqrt{\frac{\rho_2}{3k_d c\sigma_s}}, \qquad (2.1)$$

где h_{max} – максимальная глубина внедрения зерна, ρ_2 – плотность материала частицы, $R_{абр}$ - радиус частицы, β - значение угла между обрабатываемой поверхностью и гидроабразивным соплом, k_d - коэффициент влияния шероховатости заготовки на площадь контакта, υ_m - скорость закрученной гидроабразивной струи, k_m - коэффициент влияния соседних зерен при резании, σ_s - предел текучести заготовки, c - коэффициент несущей способности заготовки.

Учитывая, что скорость закрученной гидроабразивной струи определяется из выражения [4, 27, 33, 60]:

$$\upsilon_m = \upsilon_0 \left(\frac{I_0}{\rho_1 F} \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{2.2}$$

где υ_0 - начальная скорость струи;

ρ_1 - плотность жидкости;

h - шаг спиралеобразной канавки;

φ_m - концентрация абразивных частиц на оси струи;

k - безразмерный поправочный коэффициент;

F - площадь струи круглого сечения;

$$F = \pi \cdot r^2, \tag{2.3}$$

где r -текущий внутренний радиус водяного сопла;

A_2, C_2, D_2, E_2 - коэффициенты вычисляются:

$$A_2 = 2\int_0^1 \left(\frac{\upsilon}{\upsilon_m} \right)^2 \xi \, d\xi = 2\int_0^1 \left(\left(1 - \xi^{1,5} \right)^2 \right)^2 \xi \, d\xi, \tag{2.4}$$

$$C_2 = 2\varphi_m \int_0^1 \left(\frac{\upsilon}{\upsilon_m} \right)^2 \varphi_m \xi \, d\xi = 2\varphi_m \int_0^1 \left(1 - \xi^{1,5} \right)^2 \varphi_m \xi \, d\xi, \tag{2.5}$$

$$D_2 = 2\int_0^1 \left(\frac{\upsilon}{\upsilon_m} \right)^2 \xi^3 d\xi = 2\int_0^1 \left(\left(1 - \xi^{1,5} \right)^2 \right)^2 \xi^3 d\xi, \tag{2.6}$$

$$E_2 = 2\int_0^1 \left(\frac{\upsilon}{\upsilon_m}\right)^2 \frac{\varphi}{\varphi_m}\xi^3 d\xi = 2\int_0^1 \left(\left(1-\xi^{1,5}\right)^2\right)^2 \left(1-\xi^{1,5}\right)\xi^3 d\xi, \quad (2.7)$$

где υ - скорость в текущем сечении струи;

υ_m - скорость на оси струи;

$\xi = \frac{r}{R}$ - нормированная координата;

R - внутренний радиус смесительной трубки сопла.

$$\left.\begin{aligned} \frac{\upsilon}{\upsilon_m} &= \left(1-\xi^{1,5}\right)^2 \\ \frac{\varphi}{\varphi_m} &= 1-\xi^{1.5} \end{aligned}\right\} \quad (2.8)$$

I_0 - импульс струи:

$$I_0 = \frac{Q_1}{g}\upsilon_1 + \frac{Q_2}{g}\upsilon_2, \quad (2.9)$$

где Q_1 - начальный весовой секундный расход жидкости;

Q_2 - начальный весовой секундный расход частиц;

g - ускорение свободного падения;

υ_1, υ_2 - начальная скорость жидкости и примеси.

Для улучшения математической модели процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости на основе усталостного выкрашивания абразивных частиц с обрабатываемой заготовкой требуется вычислить величину шага спиральной канавки h в смесительной трубке гидроабразивного сопла, который повышает режущую способность и производительность процесса резания. Смесительная трубка сопла имеет на своей поверхности нарезы, в виде желобков, вьющихся вдоль поверхности канала сопла по спиралеобразной линии. Промежутки между нарезами (выступы) называются полями. Боковые стенки нарезов - гранями, которые заставляют струю вращаться. Нарезы характеризуются следующими параметрами: формой, шагом, глубиной и углом наклона нарезки; шириной и числом нарезов; шириной полей (рисунок 2.3). Для определения шага

спиральной канавки использовалась теория баллистики [2], а именно длина нарезаемой части сопла использует начальную скорость струи с учетом перемещения рабочей жидкости в канале сопла:

$$h = \frac{\upsilon_{01} \cdot S^2}{332000 \cdot l}, \tag{2.10}$$

где υ_{01} - начальная скорость струи в смесительной трубке сопла;

S - площадь поперечного сечения сопла;

l - длина сопла.

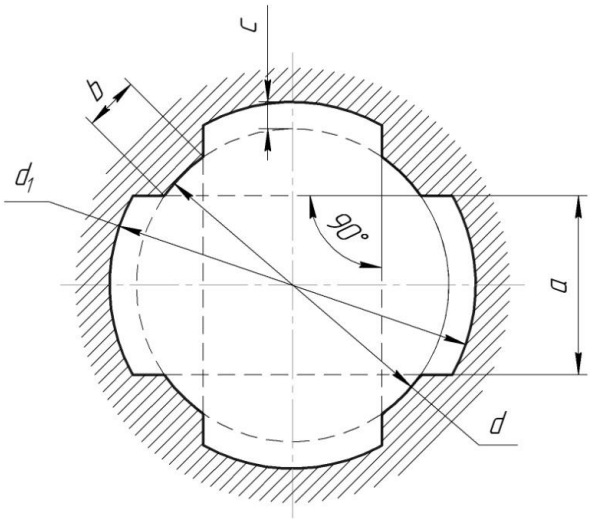


Рисунок 2.3. Поперечный разрез смесительной трубки сопла: *a* - ширина нареза, *b* - ширина поля нареза, *c* - глубина нареза, *d* - диаметр сопла, d_1 - диаметр сопла по нарезам

Выражение (2.10) можно применять для вычисления диаметра гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемого материала [60]:

$$d_{стр} = 0{,}44(H - R)\frac{B_2 + \left[0{,}5 \cdot \left(A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2\right) - \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2\right)\right]\kappa}{B_2 + (A_2 - C_2)\kappa}, \tag{2.11}$$

где H - расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности материала;

коэффициент B_2:

$$B_2 = 2\int_0^1 \frac{\varphi}{\varphi_m}\frac{\upsilon}{\upsilon_m}\xi d\xi = 2\int_0^1 \left(1 - \xi^{1.5}\right)\left(1 - \xi^{1.5}\right)^2 \xi \, d\xi, \tag{2.12}$$

κ - подача:

$$\kappa = \frac{Q_2 \cdot \upsilon_0}{I_0 \cdot g}. \qquad (2.13)$$

Механизм образования гидроабразивной струи основанной на способе закручивания рассматривается при угле между соплом и обрабатываемой поверхностью в процессе обработки β=90^0 и после подстановки выражений (2.10), (2.2) в уравнение (2.1), получим значение глубины внедрения абразивной частицы в материал при гидроабразивной резке с закручиванием струи рабочей жидкости:

$$h_{\max} = k_m^{0.5} \upsilon_0 d \sqrt{\frac{\rho_1}{3k_d c\sigma_s} \cdot \frac{I_0}{\rho_2 F} \cdot \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)}}, \qquad (2.14)$$

где ρ_2 - плотность частиц абразива;

d - средний диаметр частицы абразива.

Фактически $h_{\max}$ будет являться максимальной высотой профиля R_{max} обработанной поверхности, что позволяет прогнозировать максимальную шероховатость обрабатываемой поверхности. Выражение (2.14) показывает, что на увеличение значения глубины внедрения частицы абразива в обрабатываемый металл наибольшее влияние окажут диаметр абразивной частицы, её плотность, начальные скорость и импульс струи, а при увеличении предела текучести материала детали, плотности жидкости, площади живого сечения потока, концентрации частиц абразива — это значение уменьшится.

Уравнение для определения величины съема металла за один удар частицы абразива при гидроабразивной резке с закручиванием струи рабочей жидкости примет вид:

$$q = 1.9 k_c \frac{d^3}{k_d^{3/4}} \left(k_m^{0.5} \upsilon_0 \sqrt{\frac{\rho_1}{3c\sigma_s} \cdot \frac{I_0}{\rho_2 F} \cdot \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)}} \right)^{\frac{5}{2}} \cdot \rho_\partial, \qquad (2.15)$$

где ρ_∂ - плотность материала обрабатываемой детали;

k_c - коэффициент стружкообразования.

Анализируя выражение (2.15), установлено, что на увеличение съема металла за один удар абразивной частицы оказывают влияние плотность частицы абразива, её диаметр, начальные скорость и импульс струи, плотность материала детали, а увеличение значений предела текучести материала, плотности жидкости, площади живого сечения соответственно снизят съем металла.

Глубина внедрения частицы абразива в материал и величина съема металла за один удар элементарной частицы абразива при резке влияют на производительность технологического процесса гидроабразивной обработки и поэтому данные параметры будут являться выходными переменными при управлении процессом гидроабразивной обработки с закручиванием струи рабочей жидкости.

Полученные итоговые технологические параметры в уравнениях (2.14) и (2.15) оказывают влияние на производительность процесса резания при подборе параметров, входящих в данные уравнения, что позволит обеспечить стабильные геометрические показатели качества (шероховатость, волнистость) получаемых деталей и повысит производительность процесса резания.

На основании аналитических линейных уравнений была построена имитационная модель процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости, которая позволяет получать информацию по управлению процессом для достижения рациональных показателей по производительности без запуска физического процесса.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ

В разделе приведена разработка модели формирования шероховатости путем единичного взаимодействия абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью при гидроабразивном резании. На основании приведенной модели исследуется механизм процесса гидроабразивной резки с дополнительным движением рабочей струи.

3.1. Анализ обработанных поверхностей на основании единичного взаимодействия абразивных частиц

Главный интерес представляет регулирование технологической системы гидроабразивного резания по установлению зависимостей основных технологических параметров от выходных параметров (шероховатость полученной поверхности, ширина реза и т.д.).

Для рационального подхода, направленного на создание математической модели регулирования процесса гидроабразивного резания требуется изучение механизма разрушения материала при воздействии абразивных частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью.

Известно, что абразивная частица представляет собой тело сложной формы, имеющее неровности (вершины). При изучении под микроскопом на выступах в свою очередь можно выделять микрорельеф и субмикрорельеф, обусловленные кристаллическим строением абразива. Соответственно, при различных видах абразивного воздействия с поверхностью детали могут контактировать как вершины, так микрорельеф и субмикрорельеф отдельных частиц.

Для учета этого обстоятельства предложены различные модели описания абразивных частиц. Одна из наиболее совершенных моделей представлена в работе [16], в которой при помощи теории случайных функций абразивная частица представлена в виде тела, поверхность которой образуется набором гармоник

различного порядка, составляющих неровности абразивных частиц, а его полярный радиус является случайной величиной, описываемой конечным набором гармоник. Гармоники 1 и 2 порядка описывают форму частицы и её вершин. Гармоники более высоких порядков описывают форму микровыступов и субмикровыступов поверхности абразивной частицы, что позволяет получить модель наиболее близкую к реальной поверхности абразивов. При этом распределение радиальных и диаметральных размеров частиц подчиняется нормальному закону.

В работе [16] показано также, что абразивные частицы не имеют постоянных радиусов скругления вершин. Радиус режущей части частиц зависит не только от их материала, но и от высоты, а иначе от глубины внедрения частиц в обрабатываемую поверхность детали. Это объясняется тем, что абразивные частицы имеют шероховатую поверхность и при царапании полированной поверхности от одной частицы может образоваться несколько рисок. Естественно, что радиус округления одной риски очень мал. С увеличением глубины царапины отдельные малые риски сливаются в одну большую, вследствие чего средний радиус округления увеличивается. А если, например, абразивная частица внедрилась бы в поверхность на половину своего размера, то средний радиус округления царапины приблизился бы к радиусу частицы.

Учитывая, что все вышеуказанное можно отнести к любому абразивному инструменту, в том числе и применяемому при обработке свободными абразивами.

Как при обработке связанным абразивом (шлифование, хонингование и т.п.), так и при гидроабразивной обработке, описание процесса резания возможно при использовании методов теории вероятности.

Гидроабразивной обработке соответствует определенное число контактов абразивных частиц с поверхностью детали в единицу времени. При этом число и характер таких контактов определяют производительность процесса и качество обработанной поверхности. Изменяя режимы обработки можно в значительной мере влиять на результаты обработки.

Для создания эффективной теоретической модели гидроабразивной обработки необходимо с высокой точностью определить количественные

характеристики процесса единичного взаимодействия частицы рабочей среды с поверхностью обрабатываемой детали, что в свою очередь требует четкого представления о механизме формирования абразивной царапины.

Анализ существующих моделей и теорий раскроя деталей гидроабразивной струей позволит подробно изучить причины разрушения материалов. Несмотря на развитие вычислительной техники, в настоящее время смоделировать процесс истечения сверхзвуковой струи с абразивом с достаточной адекватностью сложно. Связано это с целым рядом особенностей присущих данному процессу. Во-первых, это хаотичность движения абразивных частиц в струе, их взаимное упруго-пластичное столкновение, а, следовательно, влияние на движение друг друга, причем нелинейным образом. Решение дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих динамику трехфазной струи, смешанной с пузырьками воздуха и твердыми абразивными частицами, не представляется возможным ввиду неопределенности начальных условий в сочетании с нелинейностью предлагаемых уравнений. Существуют модели и гипотезы, направленные на имитацию сверхзвуковой струи с абразивом с применением вычислительной жидкостной механики [91, 92]. В итоге задача моделирования сводится к определению скорости абразивных частиц на выходе из фокусирующей трубки. Так как одной из основных функций воды при гидрорезании является придание абразивным частицам высокой скорости, необходимо знать скорость истечения смешанной струи из фокусирующей трубки. Несмотря на то, что существует возможность теоретического определения скорости струи после сопла, найти расчетным методом скорость истечения струи с песком не представляется возможным ввиду влияния на процесс смешения многих факторов. Поэтому в настоящее время процесс определения скорости носит экспериментальный характер. Ведущими школами по гидроабразивным технологиям приложены большие усилия по разработке методов экспериментального измерения скорости струи с абразивными частицами [91, 92]. Описанные способы включают магнитные и индуктивные методы, оценки глубины кратера в материале, измерение силы удара или применение сверхскоростного фотографирования. Также существует

направление по определению скорости абразива с помощью лазерно-индуцированной флюоресценции [73]. Все описанные выше методы имеют погрешности измерений, трудности в различии жидкости и абразивных частиц, более того, они обнаруживают только среднее поведение абразива и жидкости после фокусирующей трубки, не учитывая осевое и радиальное распределение абразива в струе. Кроме того, все абразивные частицы имеют неправильную форму (не шарообразную), что влечет за собой их вращение в процессе разгона и взаимодействия с материалом, следовательно, дополнительное усложнение моделей и соответственно вносит дополнительную неопределенность.

В процессе гидроабразивного резания расход песка в среднем составляет 600 гр./мин, то есть порядка 10 гр./сек. Для частицы размером 80 mesh средний диаметр составляет 0,18мм (приближая форму песчинки к шарообразной форме), следовательно, в секунду происходит порядка $1.3 \cdot 10^6$ микроударов. При скорости удара частички в 500 м/с процесс вдавливания и отскока песчинки составляет доли миллисекунды. При диаметре фокусирующей трубки в 1 мм существует примерно 30 мест для одного удара частицы. Скорость перемещения гидроабразивной головки относительно заготовки несущественна по сравнению со скоростью воздействия частиц на материал. Из этого расчета можно рассматривать гидроабразивную обработку как последовательное воздействие отдельной разогнанной частички абразива на материал. Результатом резания можно считать геометрическую суперпозицию кратеров, полученных от воздействия каждой частицы отдельно. Отметим, что предложенная модель имеет некоторые допущения: принимается, что размер, форма и скорость частичек одинаковые, абразивные частицы как не сталкиваются друг с другом при разгоне, так и не встречают сопротивления отскочивших от материала «отработавших» абразивных частиц, воды и микростружки.

В связи с описанной неопределенностью можно лишь спрогнозировать и описать какую-то среднюю модель воздействия абразива на материал. Не все материалы одинаково реагируют при ударе, не обошел этот эффект и воздействие разогнанных абразивных частиц на различные материалы. Существует два полярно

разных эффекта: абсолютно упругий удар и абсолютно неупругий удар. Первый имеет место при обработке способных к пластической деформации материалов (металлы, пластик, резина и др.), второй - при воздействии на хрупкие материалы, такие как стекло, керамика, камень и др. Следует сразу отметить, что эти процессы идеализированы и в чистом виде не встречаются. В одних случаях преобладает один эффект, в других - другой, а окончательный результат следует рассматривать как сумму этих процессов. Таким образом, по реакции материала на воздействие можно судить о пластичной или хрупкой его эрозии при действии гидроабразивной струи. В пользу этой теории говорят и основные результаты работы [78], представленные на рисунке 3.1.

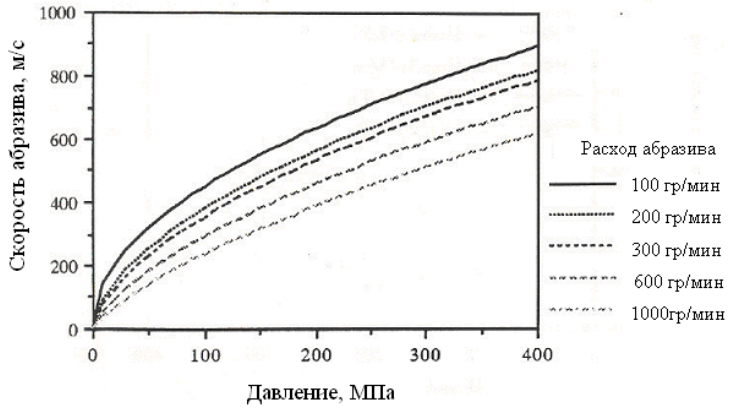


Рисунок 2.1. Зависимость скорости частиц от давления и расхода абразива

3.2. Геометрическая схема образования профиля установившейся шероховатости

Правильное построение геометрической формы, отражающей механизм взаимодействия свободных абразивов с поверхностью детали, позволяет установить качественное влияние различных факторов на процесс формирования шероховатости обработанной поверхности и получить адекватные теоретические зависимости.

В процессе обработки происходит перекрытие царапин, оставленных абразивными частицами, в результате чего ширина контакта каждой частицы с обрабатываемой поверхностью неодинакова, а края царапин расположены на

различном уровне, представленные на рисунке 3.2. Схема образования профиля установившейся шероховатости при обработке свободными абразивами, с учетом неполных срезов металла совершаемых абразивными частицами, аналогична схемам образования шлифованной поверхности, предлагаемым Ящерицыным П.И. [95], Королевым А.В. [16].

Таким образом, глубина внедрения соседних частиц также неодинакова. Это обуславливает сложность описания функции распределения глубин внедрения частиц в обрабатываемую поверхность. В работах Королева А.В. [16] установлено, что небольшая доля частиц от их общего числа, которая участвует во взаимодействии, будет оставлять следы глубиной близкой к h_{max}. Аппроксимируем их функцию распределения степенной зависимостью:

$$z_i = 0{,}5 z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k, \quad при\ 0 \le h_i \le H_0, \tag{3.1}$$

где h_i - число лунок на уровне l_i от отпечатка наибольшей глубины h_{max};

z_0 - номинальное количество взаимодействующих частиц над квадратом упаковки рабочей среды;

H_0 - разность глубин следов;

k - показатель распределения глубины отпечатков.

Величина H_0 соответствует глубине залегания половины из всех царапин, измеренной от дна наиболее глубокой царапины, при условии, что функция распределения глубин царапин в начальной части была справедлива для слоя царапин.

В работе [16], для описания процесса образования профиля шероховатости поверхности при шлифовании и других видах абразивной обработки, в качестве критерия предлагается параметр H_{yc}, названный «условная высота неровностей обрабатываемой поверхности», и рассматривается методика определения стандартных параметров шероховатости поверхности при его использовании.

Учитывая общие особенности взаимодействия абразивного инструмента с поверхностью детали, введем аналогичный критерий для гидроабразивной

обработки. Пусть в процессе обработки через нормальное сечение профиля шероховатости поверхности детали прошло некоторое количество абразивных частиц. Каждая *i*-ая частица оставляет царапину глубиной a_i, и шириной b_i. Царапины от частиц частично перекрывают царапины от предыдущих частиц, при этом частицы осуществляют неполные срезы. При этом происходит постепенное смещение профиля, в процессе которого удаляются выступы исходной шероховатости. При формировании профиля установившейся шероховатости (рисунок 3.2) его впадины представляют собой дно наиболее глубоких царапин, а выступы образуются пересечением боковых сторон царапин от отдельных частиц.

Под условной высотой микронеровносгей обработанной поверхности будем понимать расстояние от средней линии AM, проведенной между вершинами неровностей в нормальном сечении детали, до уровня самых глубоких впадин, имеющихся на этой поверхности CD. При этом, учитывая, что края царапин от частиц примерно равномерно смещаются вверх и вниз от линии AM, за глубину внедрения зерен в данном поперечном сечении будем принимать глубину, отсчитанную от этой линии.

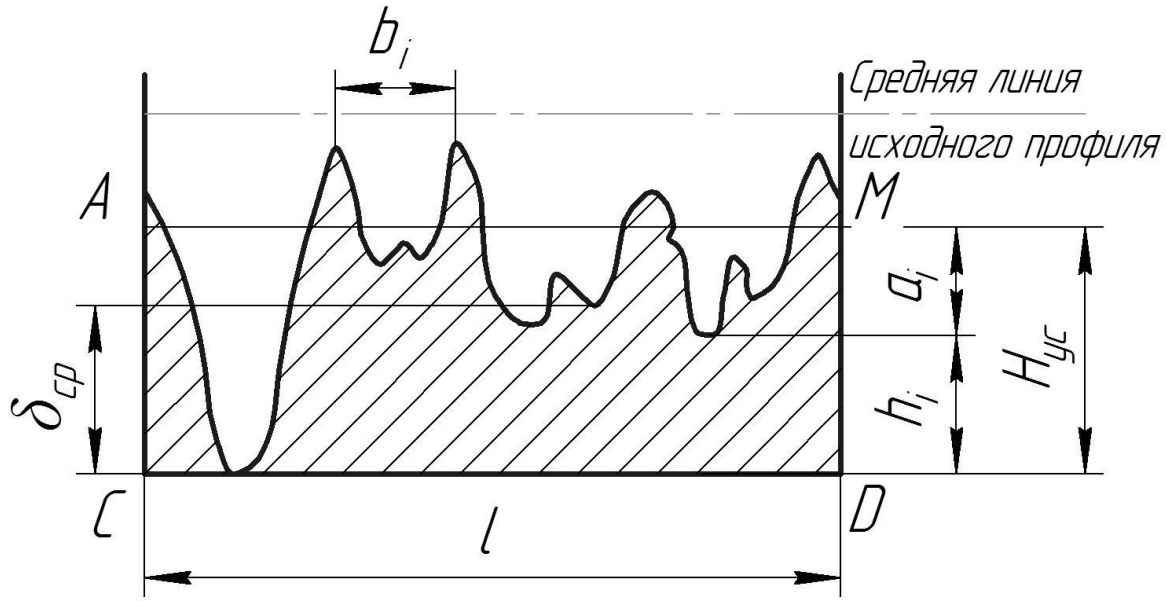


Рисунок 3.2. Схема образования профиля шероховатости поверхности при обработке свободными абразивами

3.3. Определение параметров установившейся шероховатости

Учитывая экспоненциальный характер изменения высотных параметров шероховатости поверхности детали при обработке свободными абразивами, можно разработать математическую модель изменения значений этих параметров в зависимости от времени обработки. Для получения такой модели необходимо, прежде всего, разработать методику расчета установившейся шероховатости для конкретных значений исходных данных (технологических факторов), что позволит определить асимптоту экспоненциальной функции $R_a = f(t)$.

Как показано выше, нормальное сечение шероховатости поверхности детали после обработки свободными абразивами представляет собой совокупность абразивных царапин, оставленных частицами. При этом царапины частично наложены друг на друга и поэтому имеют неровные края (рисунок 3.3), однако, если бы частицы делали только полные срезы, то на некотором уровне нормального сечения детали сумма ширины всех полных срезов была бы равна ширине обрабатываемого участка:

$$\sum_{i=1}^{Z_{сеч}} b_i = L_{ед}, \tag{3.2}$$

где $z_{сеч}$ - количество зерен, оставивших свой след в данном нормальном сечении детали, а вершины всех неровностей в сечении AMCD располагались бы на одной линии (аналогично процессу шлифования при глубине резания большей $H_{ус}$ [16]).

В действительности за счет перекрытия царапин по ширине, вершины неровностей смещаются вверх и вниз от линии AM, а так как они смещаются от этой линии примерно равномерно вверх и вниз, то эту линию можно рассматривать как среднюю между вершинами всех неровностей.

Таким образом, средняя линия между вершинами всех неровностей в данном нормальном сечении детали находится на том уровне, где сумма ширины всех частиц, прошедших через данное сечение детали, равна ширине обрабатываемого участка. Дальнейшие расчеты будем производить на единице длины нормального сечения детали, так как величины $z_{сеч}$ и $L_{ед}$ связаны между собой.

Величину $H_{ус}$ определим при условии, что именно на этой высоте выполняется равенство (3.2). Учитывая соотношение, для уровня $H_{ус}$ можно записать:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} b_i = \sum_{i=1}^{z_{сеч}} 3{,}8a_i = 3{,}8\sum_{i=1}^{z_{сеч}} a_i = L_{ед}, \tag{3.3}$$

Для нахождения глубины царапины a_i в рассматриваемом нормальном сечении детали обратимся к форме единичного следа при обработке свободными абразивами (см. рисунок 3.3).

За расчетную глубину внедрения a_i, частицы можно взять произведение максимально возможной глубины $(h_{\max} - h_i)$ на вероятность $P_{вн}$ внедрения частицы с этой глубиной. Исходя из геометрической вероятности случайного события, искомая вероятность равна отношению площади, ограниченной продольной траекторией данной частицы при ее внедрении, к площади, ограниченной продольной траекторией движения частицы с максимальной глубиной внедрения:

$$P_{вн} = \frac{l_{сп}(h_{\max} - h_i)}{l_{сп} h_{\max}} = \frac{h_{\max} - h_i}{h_{\max}},$$

$$a_i = \frac{(h_{\max} - h_i)^2}{h_{\max}}; \; a_i = h_{\max}\left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2. \tag{3.4}$$

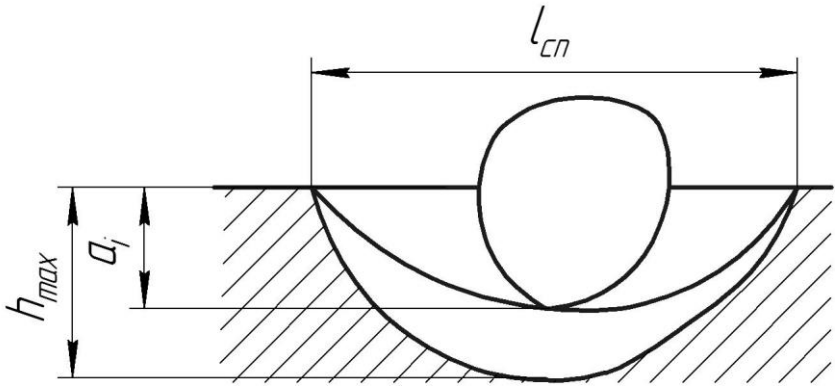


Рисунок 3.3. Схема продольного сечения единичного следа абразивной частицы

Тогда сумма глубин всех царапин, оставленных частицами в нормальном сечении АМСД:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} a_i = h_{\max} \sum_{i=1}^{z} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2, \tag{3.5}$$

где $z_{сеч}$ - общее число всех зерен, контакт которых возможен с данным нормальным сечением детали.

При достаточно большом значении $z_{сеч}$ (при прохождении нескольких частиц через данное нормальное сечение детали) от суммирования можно перейти к интегрированию. Для этого выразим величину h_i, через соответствующее число зерен z_i контакт которых возможен с сечением AMCD) на глубине h_i. При этом воспользуемся зависимостью (3.1). После преобразований получим:

$$h_i = H_0 \left(2\frac{z_i}{z_0}\right)^{\frac{1}{k}}, \tag{3.6}$$

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 = \int_0^1 \left(1 - \frac{H_0}{h_{\max}} \left(2\frac{z_i}{z_0}\right)^{\frac{1}{k}}\right)^2 dz_i \tag{3.7}$$

Проведем замену:

$$\frac{H_0}{h_{\max}} \left(2\frac{z_i}{z_0}\right)^{\frac{1}{k}} = \psi, \tag{3.8}$$

где z_0 - число зерен проходящих через единичную длину в единицу времени.

После проведения соответствующих преобразований получим:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 = k z_{сеч} \int_0^1 (1-\psi)\psi^{k-1} d\psi \tag{3.9}$$

Интеграл представляет собой бэта-функцию. Выразим ее через гамма-функцию получим:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 = k z_{сеч} \frac{\Gamma_{(э)}\Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+э)}} = 2k z_{сеч} \frac{\Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+э)}}$$

Подставив полученное выражение в (3.5) получим:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} a_i = 2kz_{сеч}h_{\max}\frac{\Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+э)}}, \qquad (3.10)$$

С учетом ранее полученных зависимостей:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} b_i = 7{,}6kz_{сеч}h_{\max}\frac{\Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+э)}} = L_{ед} \qquad (3.11)$$

При этом, на уровне АМ (см. рисунок 3.2) определится $z_{сеч}$ следующим образом:

$$z_{сеч} = 0{,}5z_0\left(\frac{H_{ус}}{H_0}\right)^k$$

Подставив полученное выражение в (3.11) получим:

$$3{,}8kz_0\left(\frac{H_{ус}}{H_0}\right)^k\frac{\Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+э)}} = L_{ед}$$

Учитывая, что значение показателя степени для всех видов абразивной обработки лежит в переделах $1 \le k \le 3$ [16], сделаем допущения, что при гидроабразивной обработке можно принять $k = 2$. При этом получим:

$$7{,}6z_0\left(\frac{H_{ус}}{H_0}\right)^2\frac{\Gamma_{(2)}}{\Gamma_{(5)}}h_{\max} = L_{ед}$$

После соответствующих преобразований получим зависимость:

$$H_{ус} = H_0\sqrt{\frac{L_{ед}}{0.32h_{\max}z_0}} \qquad (3.12)$$

Зная величину $H_{ус}$ можно определить относительную опорную длину профиля. Установлено [16], что для различных видов абразивной обработки опорная кривая профиля обработанной поверхности хорошо описывается уравнением:

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{ус}}\right)^{f_0}}, \qquad (3.13)$$

где δ_i - уровень сечения профиля от линии впадин;

$\sum L_i$ - сумма длин отрезков, отсекаемых на уровне δ_i, в материале профиля линией, эквидистантной средней линии, в пределах базовой длины.

$$f_0 = k + m + 0{,}5 \;\; при\; t_{рез} > H_{ус}, \qquad (3.14)$$

$$f_0 = k + m + 1{,}5 \;\; при\; t_{рез} < H_{ус},$$

где $t_{рез}$ - глубина резания.

При обработке свободными абразивами, когда $t_{рез} = h_{\max} > H_{ус}$, для профиля установившейся шероховатости уравнение опорной кривой будет иметь вид:

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{ус}}\right)^{k+m+0{,}5}}. \qquad (3.15)$$

Учитывая принятое допущение *k=2* и приняв в среднем, для гидроабразивной обработки *m = 0,54*, можно записать:

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{ус}}\right)^{3}}. \qquad (3.16)$$

Теперь можно перейти к определению величины среднего арифметического отклонения профиля R_a при гидроабразивной обработке. Установлено [16], что параметры R_a *и* $H_{ус}$ характеризуют вид опорной кривой шероховатости поверхности. Действительно, согласно (3.13):

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{ус}}\right)^{f_0}}.$$

Известны данные [16], о получении адекватных теоретических зависимостей, для описания кривых опорных поверхностей после шлифования, точения, суперфиниширования, хонингования при помощи (3.13), а также таблица значений отношения $H_{ус}/ R_a$ в зависимости от f_o (таблица 3.1).

Таблица 3.1.

Значения соотношения $\frac{H_{ус}}{R_a}$ в зависимости от f_o

f_o	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$\frac{H_{ус}}{R_a}$	3,25	4,26	5,36	6,36	7,32	8,12	9,0	10,1	10,9

Распространив эту зависимость на процесс гидроабразивной обработки при f_o = 3, можно принять $\frac{H_{yc}}{R_a} = 6{,}4$. Используя соотношение (3.5), после преобразований получим зависимость для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости:

$$R_a = \frac{H_0}{3{,}6}\sqrt{\frac{L_{ed}}{h_{\max} z_0}}. \qquad (3.17)$$

Для проведения расчетов по зависимостям (3.12) и (3.17) необходимо определить величину разновысотности активных зерен H_0. При гидроабразивной обработке значение H_0 не может быть определено экспериментально. Однако, величина H_0 зависит от зернистости абразивных частиц, режимов обработки и механических свойств материала обрабатываемой детали, т.е. от тех же параметров, что и $h_{\max}$. При этом, согласно определению, ее значение должно быть меньше $h_{\max}$. Для проведения теоретических расчетов, учитывая данные, приведенные в работах [16], сделаем допущение, что при гидроабразивной обработке:

$$H_0 = \frac{h_{\max}}{3}, \qquad (3.18)$$

Тогда зависимости для расчёта условной высоты и среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости будут выглядеть следующим образом:

$$H_{yc} = 0{,}58\sqrt{\frac{h_{\max} L_{ed}}{z_0}},$$

$$R_a = 0{,}09\sqrt{\frac{h_{\max} L_{ed}}{z_0}}.$$

Так как z_o это число зерен проходящих через единичную длину в единицу времени, а λ это число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата

упаковки, то через сторону квадрата упаковки *2R* будет проходить $\sqrt{\lambda}$, а через единичную длину будет проходить в $\frac{L_{ед}}{2R}$ больше частиц:

$$H_{ус} = 0{,}84\sqrt{\frac{h_{\max} R}{\sqrt{\lambda}}}, \tag{3.19}$$

$$R_a = 0{,}13 k_a^{R_a} \sqrt{\frac{h_{\max} R}{\sqrt{\lambda}}}\,. \tag{3.20}$$

где $k_a^{R_a}$ - коэффициент, учитывающий угол падения струи.

Полученная модель формирования шероховатости обработанной поверхности, может быть использована для разработки методики определения и исследования выбора рациональных параметров гидроабразивной обработки с закручиванием струи рабочей жидкости, оказывающих влияние на повышение производительности и качества процесса гидроабразивной резки.

Гидроабразивной резке в силу ее специфичности присущи некоторые особенности, которые отчетливее проявляются при раскрое заготовок.

Весомое время при обработке толстых листовых материалов занимает первоначальный сквозной прокол (так называемый «пирсинг»). Делается прокол для того, чтобы начать резать заданный контур и у струи был выход из материала, и осуществляется он путем выдержки гидроабразивной головки в неподвижном состоянии в течение некоторого времени. Для металлов толщиной порядка 100 мм и труднообрабатываемых материалов толщиной свыше 40-50 мм (титан, нержавеющие стали, сверхтвердые сплавы и др.) время сквозного прокола может достигать 40 минут и более. Связано это не только с трудно обрабатываемостью материалов и с тем, что энергия струи с увеличением расстояния от сопла падает, но и с тем, что сила воздействия струи уменьшается из-за необходимости преодоления противотока отработанного абразива с водой, как показано на рисунке 3.4.

Очевидно, что чем больше толщина материала *H*, тем большими потерями сопровождается процесс сквозного прокола. С целью уменьшения времени пирсинга толстостенных материалов некоторые установки имеют возможность

циркуляционного воздействия. Оно осуществляется путем кругового движения головки около точки врезки. Обычно радиус вращения не превышает 1 мм. Посредством вращения сокращается сопротивление основной струе с абразивом, и экспериментальным образом установлено, что время прокола при циркуляционном пирсинге может быть в 3 и более раз меньше, чем при стационарном проколе. Однако такой способ прокола материалов изучен поверхностно, практически нет экспериментальных данных по рекомендуемым режимам (количество и частота оборотов) для материалов различной толщины. Кроме того, программное обеспечение и программа для оборудования в этом случае усложняются, хотя и не существенно.

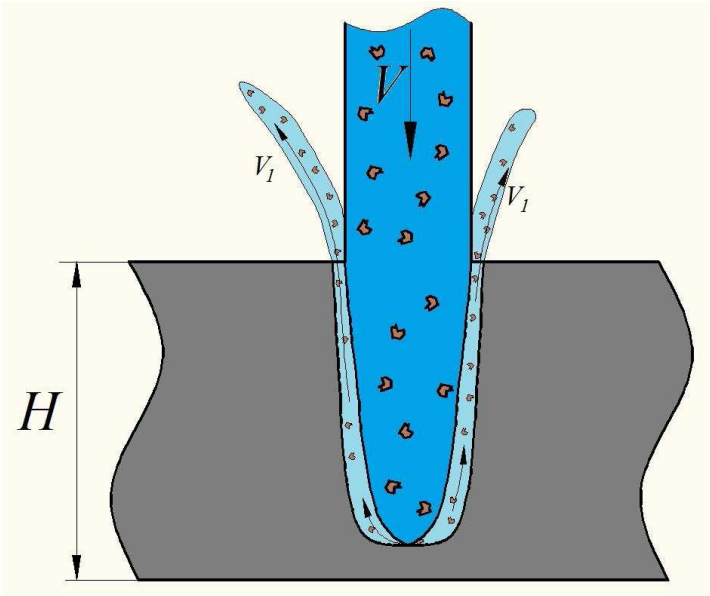


Рисунок 3.4. Схема сквозного прокола материала гидроабразивной струей

Расход абразива оказывает влияние на скорость струи. По закону сохранения импульса скорость струи будет падать, так как часть ее энергии будет расходоваться на разгон абразивных частиц. То есть чем больше частиц внедряется в струю, тем большее количество энергии необходимо затратить для их разгона. Режущая способность струи в большей степени принадлежит абразивным частицам, которые входят в ее состав. С увеличением количества частиц в струе происходит рост режущей способности инструмента. Это приводит к возможности раскроя материалов или большей толщины при аналогичной скорости подачи сопла, или с увеличенной скоростью подачи при обработке тех же толщин

материалов. Однако наращивание количества абразива в струе не всегда сказывается положительно на режущих свойствах инструмента. Дальнейшее увеличение концентрации абразивных частиц после некоторого значения (назовем его оптимумом) не приведет к повышению производительности обработки, так как это приведет к торможению струи и, соответственно, потере необходимой для эрозионного разрушения энергии.

В связи с этим предлагается ввести в технологический процесс гидроабразивной резки дополнительное движение рабочей струи, а именно процесс гидроабразивной резки будет состоять из следующих движений: направление реза, продольная осцилляция, поперечная осцилляция.

Дополнительное движение рабочей струи будет положительно влиять на процесс образования микронеровностей, который будет состоять из 2-х стадий:

- первичная - непосредственное воздействие единичных зерен на обрабатываемую поверхность в соответствии с кинематикой и динамикой процесса (формирование микропрофиля);

- вторичная - воздействие на микронеровности обработанной поверхности зерен, отразившихся от поверхности резания (следы от рикошета). Данная стадия процесса формирует субмикронеровности микропрофиля путем применения дополнительного движения рабочей струи.

Данный способ был запатентован и получен объект интеллектуальной собственности (Патент №2688007 Способ гидроабразивной обработки с осцилляцией струи [32]), который представлен в приложении П.1. Разработанный способ был совмещён с моделью формирования устойчивого профиля шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки с учетом неполных резов металла абразивными зернами, аналогичная схемам образования шлифованной поверхности, предлагаемым Ящерицыным П.И., Королевым А.В.

Апробация разработанной модели была подтверждена проведенными исследованиями и установила, что резание представляет процесс шлифования, а не усталостное выкрашивание.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Для управления процессом гидроабразивной обработки на основе имитационного моделирования было разработано программное обеспечение, в котором использовались разработанные аналитические зависимости процесса гидроабразивного резания с закручиванием струи рабочей жидкости [14, 45]. Аналитические зависимости, а именно зависимость максимальной глубины внедрения абразивной частицы в обрабатываемый материал, зависимость скорости закрученной гидроабразивной струи, зависимость глубины внедрения частицы абразива в материал и зависимость величины съема обрабатываемого материла за один удар абразивной частицы, позволяют рассчитывать основные параметры процесса при известных начальных значениях.

Блок-схема алгоритма программного продукта для управления процессом гидроабразивной обработки с закручиванием струи рабочей жидкости показана на рисунке 4.1.

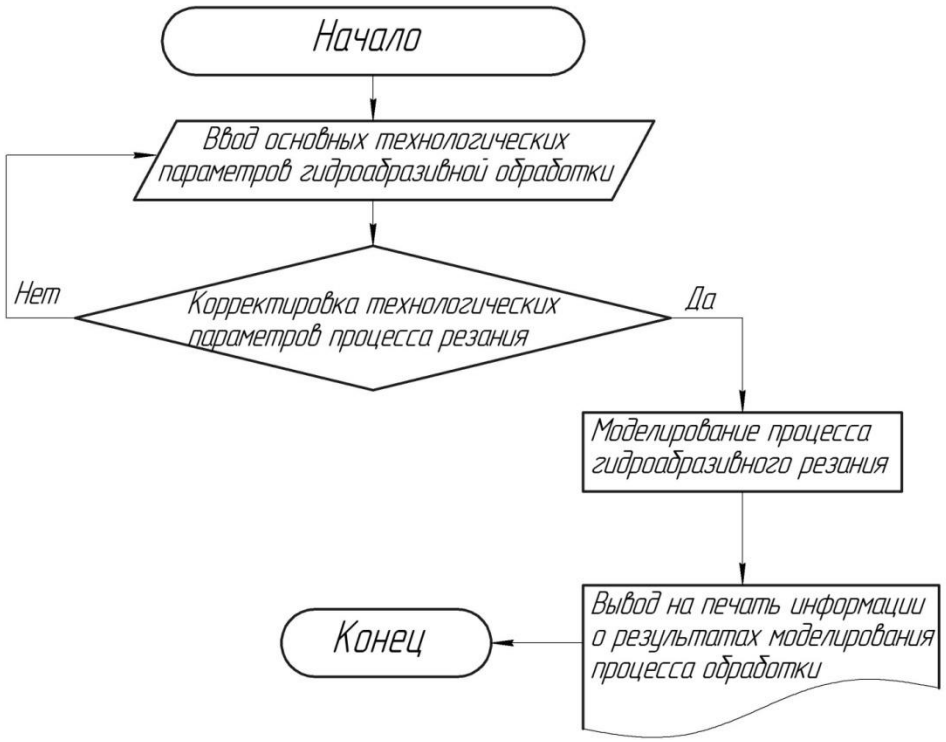


Рисунок 4.1. Блок-схема алгоритма программного продукта

В процессе разработки системы поддержки принятия решения (цифрового советника), обеспечивающей получение информации по расчету параметров гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости без запуска физического процесса с выдачей рекомендаций оператору для достижения рациональных показателей по производительности процесса резки были использованы следующие инструментальные средства: платформа Java, среда разработки NetBeans 6.8, язык программирования - Java Script [28, 31, 58,].

Обоснованный выбор инструментов разработки программного обеспечения в области информационных технологий обусловлен следующими причинами.

В качестве платформы разработки была выбрана Java, поскольку она предназначена для транспортировки и выполнения высоко интерактивных, динамических и безопасных апплетов и приложений в сетевых компьютерных системах. Основное качество платформы Java, отличающей ее от других, заключается в том, что она находится на самом высоком уровне по сравнению с другими платформами, что позволяет ей компилировать в байтовые коды, которые не связаны ни с одной из физических машин и представляют инструкции виртуальных машин.

Преимущества выбора платформы Java в качестве инструмента для разработки цифрового советника:

- обеспечение поддержки оперативного и интерактивного контента посредством своевременного доступа к программным ресурсам. Приложения, разработанные на платформе Java, легко доступны во всех операционных системах одновременно, что освобождает пользователя от необходимости выбирать операционную систему в зависимости от доступности приложений;

- простая в освоении система, оснащенная всеобъемлющим набором API.

Свободная интегрированная среда NetBeans была выбрана в качестве среды разработки по следующим критериям [28]:

- среда программирования NetBeans - это гибкий инструмент, который предоставляет удобные механизмы для быстрой разработки распределенных приложений;

- среда разработки NetBeans предоставляет широкий спектр компонентов для доступа к данным, что упрощает создание приложений, работающих с базами данных.

При создании программных систем часто используются различные парадигмы программирования: процедурные, модульные, объектно-ориентированные. Наиболее удобный подход к проектированию сложных программ - объектно-ориентированный [17, 38, 41]. Согласно концепции объектно-ориентированного программирования (ООП), программа рассматривается не как последовательность последовательно выполняемых инструкций, а как серия объектов со схожими свойствами и серия действий, которые могут быть выполнены с ними. Объекты - это экземпляры классов, в которых важна инкапсуляция. Внутреннее представление объекта скрыто и все возможные изменения его данных локализованы в одном месте. При таком подходе можно изменить реализацию класса, не влияя на интерфейс, т.е. не требуя смены класса клиента.

Объектно-ориентированный подход предлагает разработчикам возможность создавать надежные и устойчивые программные продукты. Широко распространены так называемые объектно-ориентированные модели проектирования, которые упрощают повторное использование успешных проектных и архитектурных решений. Используя модели, можно улучшить качество документации и обслуживания существующих систем, что позволит подробно описать взаимодействие объектов и классов [38].

В связи с этим в качестве языка программирования была выбрана Java по следующим причинам:

- универсальность языка Java поддерживает возможность запуска приложений Java под управлением различных операционных систем;

- возможность создания приложений веб-сервера на основе технологии страниц JSP;

- наличие большого количества документации по работе в среде;

- универсальность и производительность на различных платформах: Windows, Linux, Unix, Solaris, MacOS.

При разработке цифрового советника применялись следующие технологии:

- HTML4 (англ. HyperText Markup Language, версия 4) является четвертой версией основного языка разметки для веб-страниц. HTML - версия языка, которая полностью соответствует стандарту XML [79];

- CSS (Cascading Style Sheets) - технология для описания внешнего вида документа, написанного на языке разметки. CSS используется создателями веб-страниц для определения цветов, шрифтов, макетов и других аспектов представления документа. Основной целью разработки CSS было разделение контента (написанного на HTML или другом языке разметки) и представления документа (написанного на CSS). Такое разделение может повысить доступность документа, обеспечить большую гибкость и возможность контролировать его представление, а также снизить сложность и повторяемость структурного содержимого [69];

- JavaScript - объектно-ориентированный скриптовый язык программирования. JavaScript обычно используется как встроенный язык для программного доступа к объектам приложения. Он широко используется в браузерах в качестве языка сценариев для добавления интерактивности на веб-страницы [5, 9].

Для достижения поставленной задачи, разрабатываемая система поддержки принятия решения (цифровой советник) должна обладать следующими свойствами [9]:

- дискретностью (алгоритм разбит на отдельные шаги - команды). В блоке «Ввод основных технологических параметров гидроабразивной обработки» производится ввод исходных данных процесса гидроабразивного резания, затем производится следующая команда «Корректировка технологических параметров процесса резания». В данном блоке осуществляется корректировка данных или при неверных действиях, неверных форматах или

недопустимых значениях входных данных система выдает соответствующие сообщения с описанием ошибки с возвратом в рабочее состояние;

- однозначностью (каждая команда определяет единственно возможное действие исполнителя). Блок «Моделирование процесса гидроабразивного резания» осуществляет процесс имитационного моделирования без запуска физического процесса гидроабразивного резания;
- понятностью (все команды алгоритма входят в систему команд исполнителя), а именно в блоке «Вывод на печать информации о результатах моделирования процесса обработки» осуществляется единственное действие – вывод на печать информации о результатах процесса гидроабразивного резания;
- результативностью (исполнитель должен решить задачу за конечное число шагов), а именно разработанный алгоритм осуществляется за шесть шагов (команд).

В блоках «Ввод основных технологических параметров гидроабразивной обработки» и «Корректировка технологических параметров процесса резания» осуществляется возможность корректировки и ввода следующих технологических параметров:

- текущий внутренний радиус водяного сопла r (от 0,127 до 0,2285 мм);
- начальный весовой секундный расход жидкости Q_1 (от 1,92 до 6,23 л/мин);
- начальный весовой секундный расход абразива Q_2 (от 270 до 1100 г/мин);
- начальная скорость струи в сопле V_0 (от 900 до 1250 мм/мин);
- концентрация частиц абразива на оси струи φ_m (от 10 до 50 обрат. куб. м);
- начальная скорость жидкости V_1 (от 900 до. 1200 м/с);
- начальная скорость примеси V_2 (от 1до 50 м/с);
- начальная скорость струи V (от 3 до 12000 мм/мин);
- расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности H (от 0,5 до 5 мм);
- средний диаметр частиц абразива d (от 0.075 до 0.25 мм);
- плотность частиц абразива ρ_2 (от 0.0041 до 0.0043 г / куб. мм);

- коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности *k* (от 1 до 1,2);

- толщина обрабатываемого материла *B* (от 0,5 до 300 мм);

- предел текучести материала детали σs (МПа);

- плотность материала детали $\rho_д$ (кг / куб. мм);

В блоке «Моделирование процесса гидроабразивного резания» использованы аналитические зависимости процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости на основе усталостного выкрашивания абразивных частиц с обрабатываемой заготовкой в сочетании с методами объектно-ориентированного и структурного программирования.

После в блоке «Вывод на печать информации о результатах моделирования процесса обработки» производиться генерация и отображение информационного блока о результатах моделирования процесса гидроабразивного резания в виде массива данных, который может использоваться пользователем для дальнейшей обработки, передачи по цифровым каналам, сохранению на цифровой носитель.

Разработанный цифровой советник предназначен для проведения прогноза и поиска альтернативных вариантов по управлению процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости.

Структурная схема программного продукта, представлена на рисунке 4.2. Это программное обеспечение, которое состоит из следующих модулей: ввода исходных данных, визуального редактора (графическо-пользовательский интерфейс), моделирования и вывода отчетов.

Рисунок 4.2. Структурная схема программного продукта

1) В модуле по вводу исходных данных пользователь осуществляет возможность процесса импорта (ввода) основных технологических параметров процесса гидроабразивного резания с закручиванием струи рабочей жидкости.

2) Модуль визуального редактора (графическо-пользовательский интерфейс) осуществляет прием данных и проведение процесса по проверке ограничений на вводимые данные с последующим проведением алгоритма по процессу обработки управляемой информации и статусом предоставления доступа к отчетам, которые построены на архитектуре трех уровней.

3) В модуле моделирования используется алгоритм, основанный на системе аналитических уравнений, которые отображает процесс гидроабразивной обработки с закручиванием струи рабочей жидкости.

4) Модуль генерации отчетов применяется пользователем для осуществления процедуры по выполнению и предоставлению информационного блока для просмотра выходных переменных процесса гидроабразивной резки.

Основными целями разработки цифрового советника являются:

- выбор оптимального количества факторов;
- выявление латентной факторной модели;
- приведение полученных аналитических зависимостей процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости к простейшему алгоритмическому виду;
- исключение ошибок при проектировании (обеспечение охвата всех основных технологических параметров гидроабразивной обработки);
- ускорение процесса проектирования путем программной реализации.

Разработанный программный комплекс обеспечивает следующий ряд выполнения функций:

- ввод, процесс обработки, корректировка и хранение поступающей информации;
- выбор технологических параметров, предварительная обработка данных;
- визуализация и генерирование отчёта.

Программный комплекс предоставляется пользователю в интуитивном понятном интерфейсе, имеет механизм по прогнозированию результатов и проведению организации процесса гидроабразивной обработки с закручиванием струи рабочей жидкости, что избавить пользователя от проведения дополнительных действий, которые он не всегда в состоянии провести.

Процесс взаимодействия пользователя с программным продуктом осуществляется путем визуально-графического интерфейса. Разработанные элементы навигации были созданы в удобной для пользователя форме с использованием оконной системы. Ячейки представлены в виде прямоугольников с закругленными краями, в которые вводятся исходные данные (технологические параметры гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости). Средства для адаптации информации должны соответствовать принятым соглашениям относительно использования функциональных клавиш, различных режимов работы, поиска и использования оконной системы. Ввод / вывод данных программы и отображение результатов расчетов происходит в интерактивном режиме. Применяемый интерфейс соответствует современным эргономическим требованиям и обеспечивает легкий доступ к реализации основных функций и операций программы.

Интерфейс программного продукта разработан для использования манипулятора мышиного типа, поскольку программное обеспечение управляется рядом экранных меню, кнопок, значков и других элементов. Режим ввода с клавиатуры в основном используется при заполнении или редактировании текстовых и числовых полей экранных форм.

Субтитры для экранных форм и сообщений, отправляемых пользователю (кроме системных сообщений), представлены на русском языке.

Экранные формы разработаны и отвечают требованиям унификации:

- внешнее поведение аналогичных элементов интерфейса (реакция при наведении курсора мыши, переключение фокуса, нажатие кнопки) реализовано одинаково для элементов одного типа.

- все формы экрана пользовательского интерфейса выполнены в едином графическом оформлении, с той же компоновкой, что и основные элементы управления и навигации;

- для обозначения аналогичных операций использовались похожие графические значки, кнопки и другие элементы управления (навигации). Термины, используемые для обозначения типичных операций (добавления информационного объекта, редактирования поля данных) и выполнения последовательности действий пользователя во время их выполнения, унифицированы;

- внешнее поведение аналогичных элементов интерфейса (реакция при наведении курсора мыши, переключение фокуса, нажатие кнопки) реализовано одинаково для элементов одного типа.

При первом запуске программного комплекса перед пользователем открывается главная форма, представленная на рисунке 4.3, на которой расположено основное меню и панель для просмотра результатов вычислений.

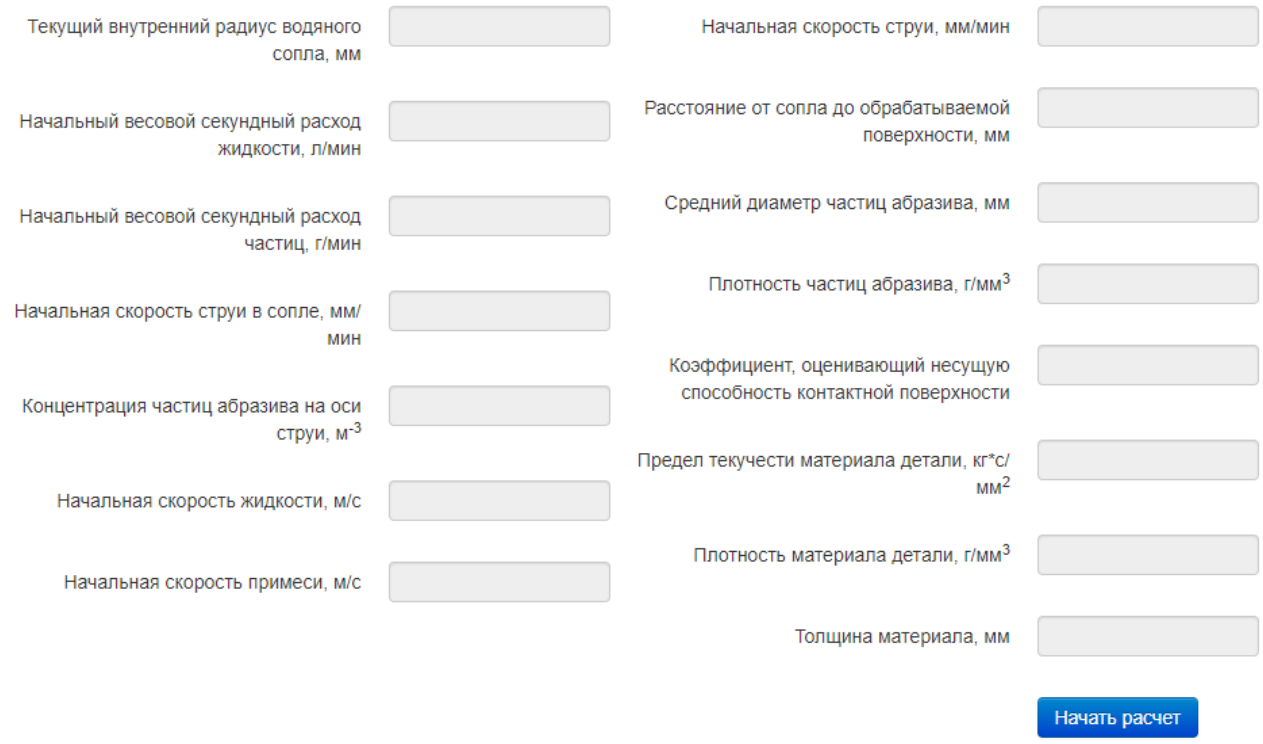


Рисунок 4.3. Главная форма программного комплекса

При нажатии на кнопку «Начать расчет», появляется диалоговое окно, представленное на рисунке 4.4, в которое вводиться текущий внутренний радиус

водяного сопла в диапазоне $r = 0{,}127 \ldots 0{,}2285$ *мм* , после чего нужно нажать кнопку «ОК».

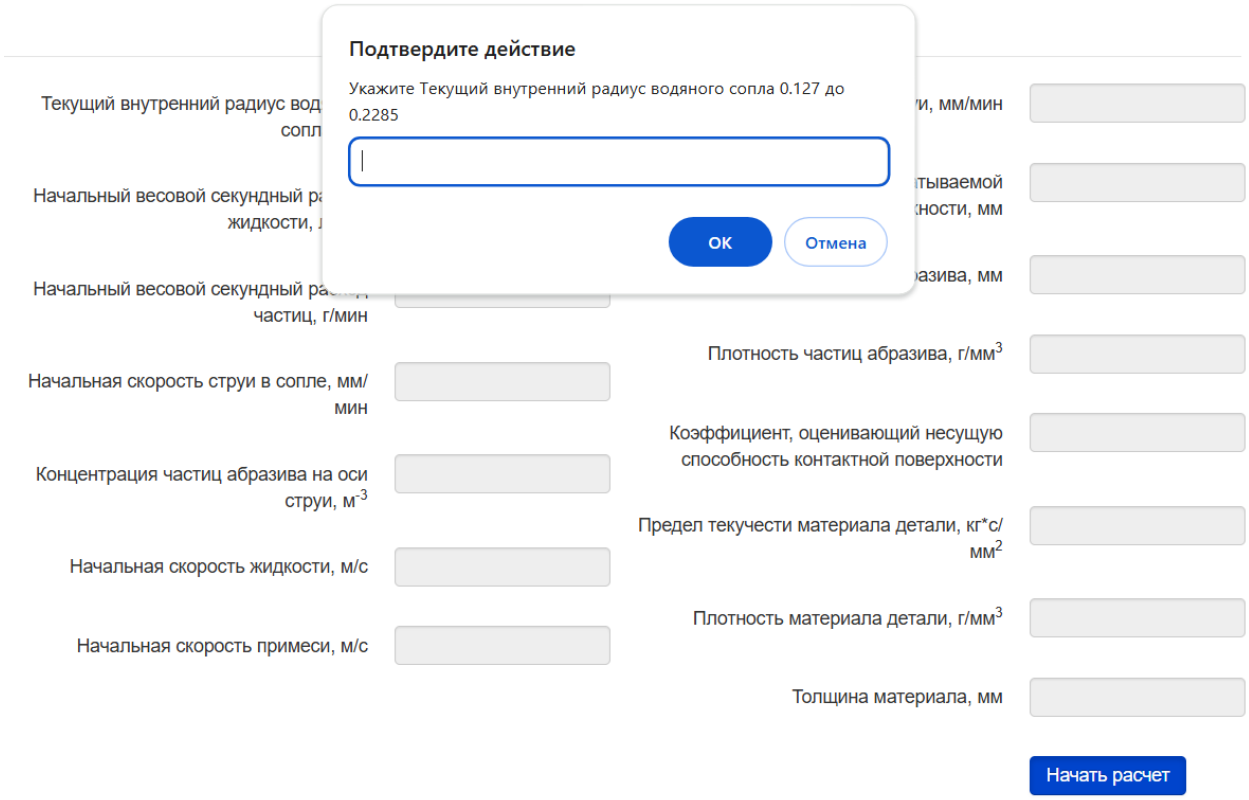


Рисунок 4.4. Ввод в программный комплекс значение текущего внутреннего радиуса водяного сопла r

При выборе значения текущего внутреннего радиуса водяного сопла появляется сообщение «Заполните все поля значениями из указанного диапазона», показанное на рисунке 4.5, после чего пользователь производит закладывание исходных (входных) данных - основные технологические параметры гидроабразивной обработки: текущий внутренний радиус водяного сопла r, начальный весовой секундный расход жидкости Q_1, начальный весовой секундный расход абразива Q_2, начальная скорость струи в сопле υ_0, концентрация частиц абразива на оси струи φ_m, начальная скорость жидкости υ_1, начальная скорость примеси υ_2, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности H, средний диаметр абразивных частиц d, плотность частиц абразива ρ_2, коэффициент несущей способности контактной поверхности, предел текучести материала детали σ_s, плотность материала детали ρ_o, толщина обрабатываемого материала B.

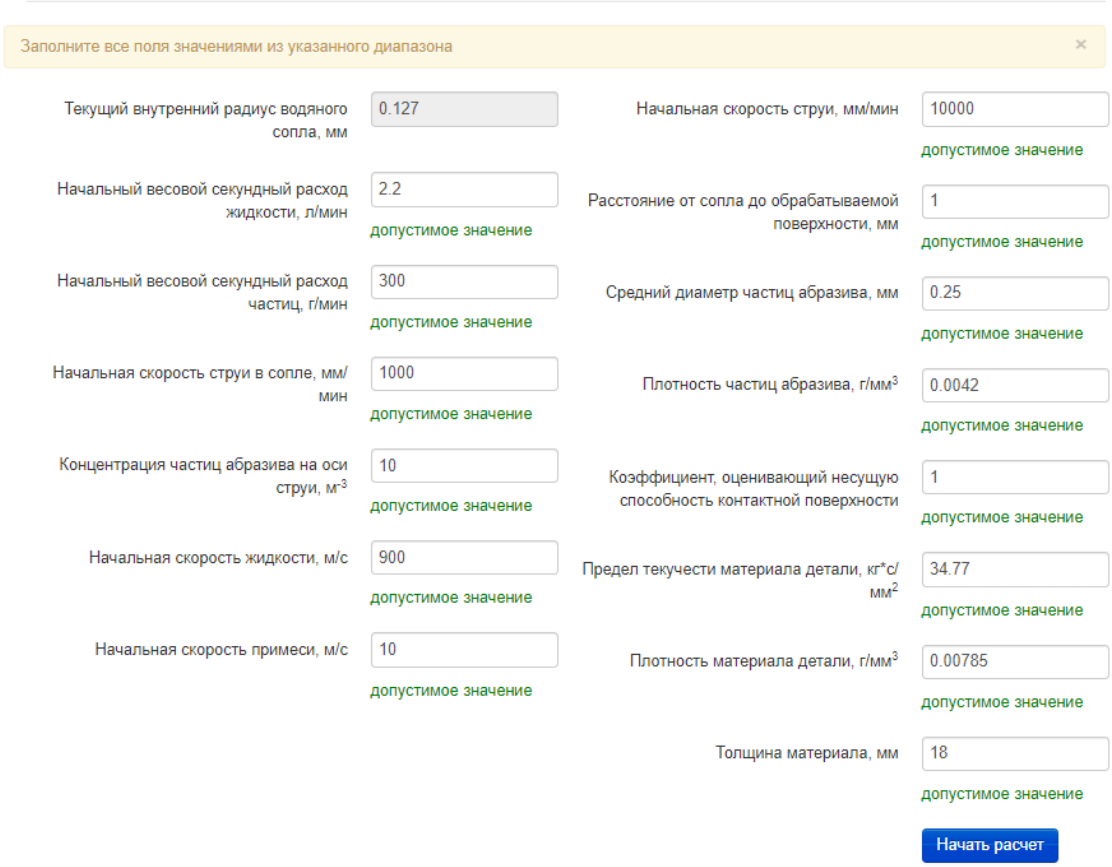


Рисунок 4.5. Ввод исходных данных в программном комплексе

При некорректных действиях пользователя, неверных форматах или ввода недопустимых значений входных данных, система выдаст пользователю соответствующие сообщения с описанием ошибки, после этого она возвратиться в исходное рабочее состояние, которое предшествовало неверной (недопустимой) команде или некорректному вводу данных, а именно отобразится ячейка ввода исходного значения параметра с указанием диапазона варьирования. При вводе значения параметра и повторном нажатии кнопки «Начать расчет» под ячейкой появляется надпись: «Допустимое значение». В случае некорректного ввода производиться повторная процедура, описанная выше.

При нажатии кнопки «Начать расчет» осуществляется процесс расчета параметров процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости. После проведения вычислений пользователю предоставляется доступная форма результатов, представленная на рисунке 4.6, на которой предоставляется информация о результатах моделирования процесса гидроабразивного резания, а именно промежуточные выходные переменные:

внутренний радиус смесительной трубки сопла R, площадь поперечного сечения сопла S, площадь струи круглого сечения F, нормированная координата ξ, коэффициенты A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, начальный импульс струи I_0, подача κ, угол наклона нарезаемой канавки α, число оборотов закручиваемой струи f, глубина нарезаемой канавки G, число нарезов n; основные: скорость гидроабразивной струи круглого сечения υ_m, диаметр гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемого материала детали $d_{стр}$, глубина внедрения абразивной частицы в обрабатываемый материал детали h_{max} и величина съема обрабатываемого материла детали за один удар абразивного зерна q, общее количество частиц, пролетающих через поперечный срез гидроабразивного сопла n_0, количество частиц участвующих в процессе резания n, что позволяет возможность пользователю более подробно изучать результаты имитационных вычислений процесса гидроабразивного резания с закручиванием струи рабочей жидкости.

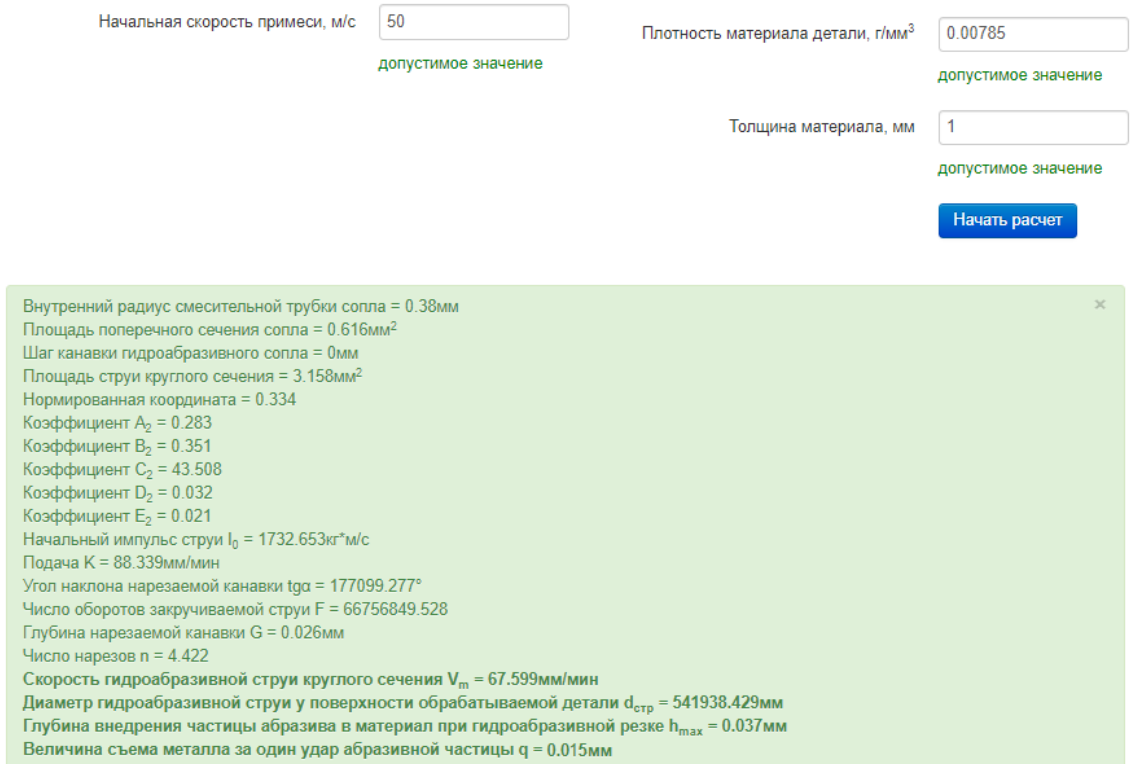


Рисунок 4.6. Отчет о результатах моделирования в программном комплексе

В программном комплексе существует возможность корректировки технологических параметров гидроабразивной обработки с возможностью продолжения расчета при повторном нажатии кнопки «Начать расчет».

Полученный результат моделирования процесса гидроабразивного резания в виде массива данных может использоваться пользователем для дальнейшей обработки, передачи по цифровым каналам, сохранению на цифровой носитель.

В таблице 4.1 представлен пробный расчет гидроабразивной резки без закручивания струи и с закручиванием струи. Расчет проведен при условиях: расстояния до поверхности обрабатывающего материала 3 мм, текущий радиус водяного сопла 0,127 мм, начальный весовой секундный расход жидкости расход воды 2 л/мин, начальный весовой секундный расход абразива 350 гр/мин.

Таблица 4.1.

Пробные расчеты

Гидроабразивная резка	Скорость гидроабразивной струи круглого сечения υ_m, мм/мин	Глубина внедрения частицы абразива в материал при гидроабразивной резке $h_{\max}$, мм	Величина съема металла за один удар абразивной частицы q, мм
без закрутки струи	84,587	0,2	0,0007
с закруткой струи	75,583	0,217	0,0008

Структурная схема системы управления процессом гидроабразивной резки представлена на рисунке 4.7.

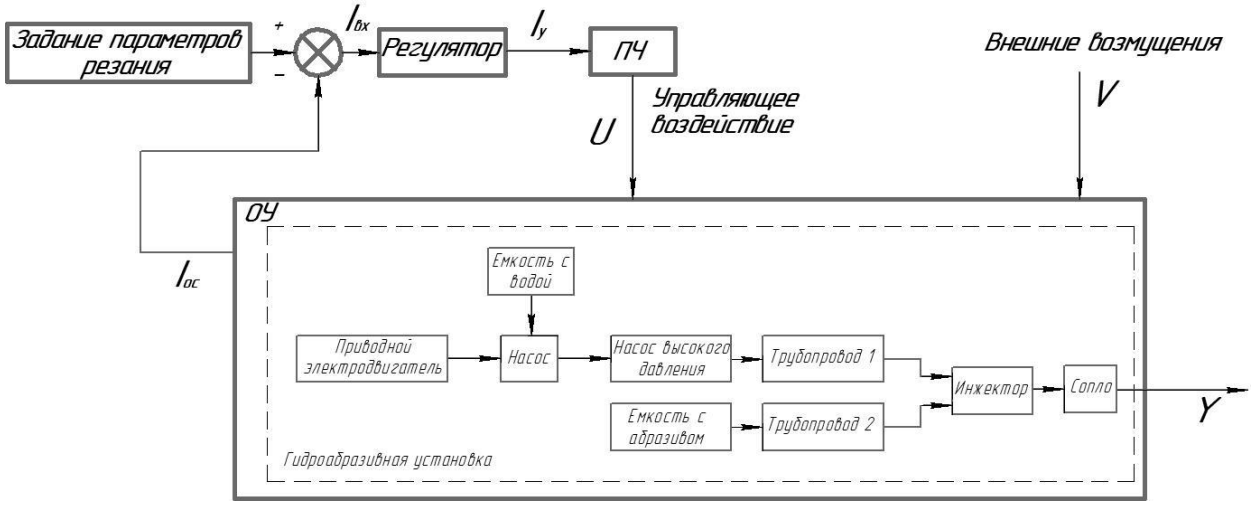


Рисунок 4.7. Структурная схема системы управления процессом гидроабразивной резки

Структурная схема системы управления процессом гидроабразивной резки состоит из задатчика параметров резания, который необходим для ввода параметров резки, блока сравнения, требуемого для расчёта рассогласования между заданием и текущим значением параметров резания, регулятора, преобразователя частоты, объекта управления (гидроабразивная установка), управляющего воздействия (U), внешнего возмущения (V), информация обратной связи о текущем состоянии объекта управления (ОУ) ($I_{ос}$), управляющая информация (I_y), входная информация ($I_{вх}$).

Функциональная схема разработанной системы управления с цифровым советником, представлена на рисунке 4.8, где есть лицо принимающее решение (ЛПР), входное воздействие в цифровой советник ($I_{вх\ цс}$), выходная рекомендация к принятию решения ($I_{вых\ цс}$).

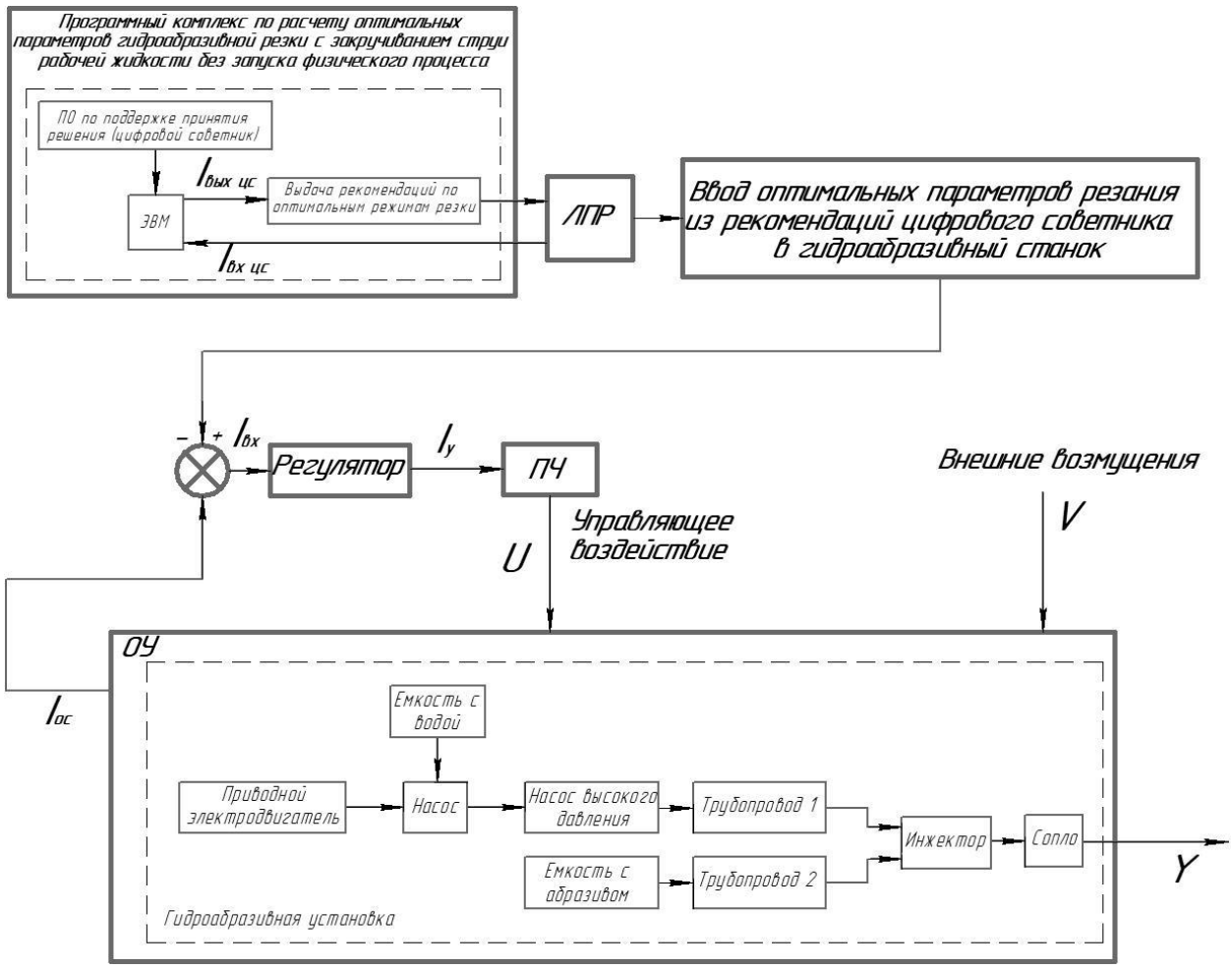


Рисунок 4.8. Функциональная схема разработанной системы управления

В разработанной системе управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости был установлен блок, а именно: программный комплекс (цифровой советник) по расчету параметров гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости без запуска физического процесса, функционирующий за счет разработанных аналитических зависимостей процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости на основе усталостного выкрашивания абразивных частиц с обрабатываемой заготовкой и выбирающий режимные параметры резания в соответствии с поставленными технологическими задачами, что позволяет повысить качество управления и достигнуть рациональных показателей по производительности процесса резки.

В ходе проведения исследования была произведена доработка программного продукта, а именно блока «Модуль моделирования» (рисунок 4.2).

В расчетный код программного продукта были заложены следующие расчетные уравнения:

- уравнение для определения общего количества абразивных частиц, пролетающих через поперечный срез гидроабразивного сопла [27]:

$$n_0 = \frac{Q_2}{V_{ср} \cdot \rho_1}, \qquad (4.1)$$

где Q_2 - начальный секундно-весовой расход абразивных зерен, г/мин;

$V_{ср}$ - средний объем одной частицы $V_{ср}$ *=0,2 мм*^{3};

ρ_1 - плотность абразивных частиц, *г/мм*^{3}.

- выражения для расчета количество частиц на периферии струи участвующих в процессе резания [27]:

$$n = \frac{0.5 \cdot \pi \left(\left(\frac{d_{cmp}^2}{2} \right)^2 - r^2 \right) + \left(\frac{d_{cmp}^2}{2} \right)^2 \cdot \left[2 \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{d}{d_{cmp}} \right) - \sin\left(2 \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{d}{d_{cmp}} \right) \right) \right]}{\pi \cdot \left(\frac{d_{cmp}^2}{2} \right)^2} \cdot n_0, \qquad (4.2)$$

где d_{cmp} - диаметр гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемого материала, *мм*;

r - текущий внутренний радиус водяного сопла, *мм*;

d - средний диаметр частиц абразива, *мм*.

- расчет значения подачи гидроабразивного сопла [27]:

$$S = \frac{h_{\max} \cdot n}{2b_{м} \cdot \left(\frac{d_{стр}}{2} \right)}, \tag{4.3}$$

где $d_{стр}$ - значение диаметра гидроабразивной струи у обрабатываемой поверхности материала, *мм*;

$b_{м}$ - значение толщины обрабатываемого материала, *мм*;

$h_{\max}$ - значение глубины внедрения абразивного зерна в обрабатываемую поверхность материала детали, *мм*;

n - значение количества зерен, участвующих в процессе резки на периферии струи.

- максимальное давления струи при контакте в момент резки заготовки [10]:

$$P_K = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_{стр}^2} = \frac{1{,}27 \cdot \rho \cdot S \cdot \upsilon_m}{d_{стр}^2}, \tag{4.4}$$

где F - усилие гидродинамического воздействия струи на преграду, *Н*; $d_{стр}$ - диаметр гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемого материала, *мм*; υ_m - скорость гидроабразивной струи круглого сечения, *мм/мин*; S - подача при сквозном прорезании материала, *мм/мин;* ρ - плотность жидкости, $\rho = 1000\ Н \cdot с^2 / м^4$

- сила воздействия струи на заготовку [11]:

$$F = 120 \cdot \left(\frac{P_K}{100} \right)^{1.15} \cdot d_{стр}^{1.75} \tag{4.5}$$

- значение шероховатости поверхности после резки по показателю Ra [57]:

$$Ra = 0.13 \cdot k_{\alpha}^{Ra} \cdot \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot F_{стр}}{n}} \tag{4.6}$$

где $h_{\max}$ - значение глубины внедрения абразивного зерна в обрабатываемую поверхность материала детали, *мм*; n - значение количества зерен участвующих в процессе резки на периферии струи, *шт*; $F_{стр}$ - площадь гидроабразивной струи круглого сечения, *мм*^{2}; k_{α}^{Ra} - коэффициент, учитывающий угол падения струи, $k_{\alpha}^{Ra} = 1$

Разработанный программный комплекс был запатентован и получены объекты интеллектуальной собственности – свидетельства на программное обеспечение для ЭВМ, которые представлены в приложении П.2.

Исходный код программы представлен в приложении П.3.

ГЛАВА 5. ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПО ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ (ЦИФРОВОГО СОВЕТНИКА)

5.1. Объект и условия проведения исследований

После доработки проводилась экспериментальное подтверждение работоспособности программного обеспечения путем моделирования процесса гидроабразивной резки в разработанном программном комплексе с выдачей рекомендаций оператору для достижения рациональных показателей по производительности процесса резки и последующим закладыванием режимов обработки в гидроабразивный станок, согласно разработанной функциональной схеме системы управления, представленной на рисунке 4.7. Также параллельно для подтверждения работоспособности программного комплекса проводился многофакторный эксперимент на гидроабразивном станке по структурной схеме на рисунке 4.8 с получением уравнений регрессий, которые использовались в симплексном методе решения задач линейного программирования для поиска оптимальных значений резки. Применение симплекс метода для решения задач линейного программирования требовалось для подтверждения работоспособности аналитических зависимостей процесса гидроабразивного резания на основании, которых было разработано программное обеспечение по поддержке принятия решения (цифровой советник) системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости.

5.2. Условия выполнения исследований

Экспериментальные исследования проводились на установке гидроабразивной резки ЧПУ (CNC) с осями X-Y, тип WJxxyyB-nZ-D (рисунок 5.1), которая представляет собой координатный режущий станок, несущий технологические головки водной струи сверхвысокого давления или водоабразивной струи сверхвысокого давления.

Рисунок 5.1. Станок с ЧПУ- X-Y WJxxyyB-nZ-D

В обоих методах (разработанная система управления с цифровым советником и натурный эксперимент на гидроабразивном станке) за исследуемые факторы были взяты: расход абразивных зерен $Q_{аб}$, подача режущей головки S, значение твердости заготовки $T_{заг}$. Сочетание оптимальных значений исследуемых факторов позволило достигнуть рациональных показателей по производительности процесса резки и получить значение требуемой шероховатости обработанной поверхности R_a, величины твердости $T_Д$, отклонения от овальности $Δ_{ов}$, конусообразность обработанной поверхности $\Delta_{кон}$.

Объектом исследований выступали: лист заготовки стали 20 ГОСТ 1050-88 (толщина листа H=18 мм, длина L=100 мм, ширина B=50 мм), гранатовый абразив Blastrite Microblast Garnet (фракция песка 120 Mesh) (рисунок 5.3). Отклонение

формы (овальность и конусность обрабатываемых поверхностей заготовок) определялось: кругломером КД мод. 290 (рисунок 5.4), микрометром цифровой 0-25, 0.001 (рисунок 5.5), профилометром «SURTRONIK-3» (рисунок 5.6), индикатором ИЧ-50 (рисунок 5.7), значение твердости определялось твердомером модели НВ-3000В (рисунок 5.8). Исследования выполнялись на АО «Саратовский агрегатный завод» на промышленной гидроабразивной установке тип WJxxyyB-nZ-D.

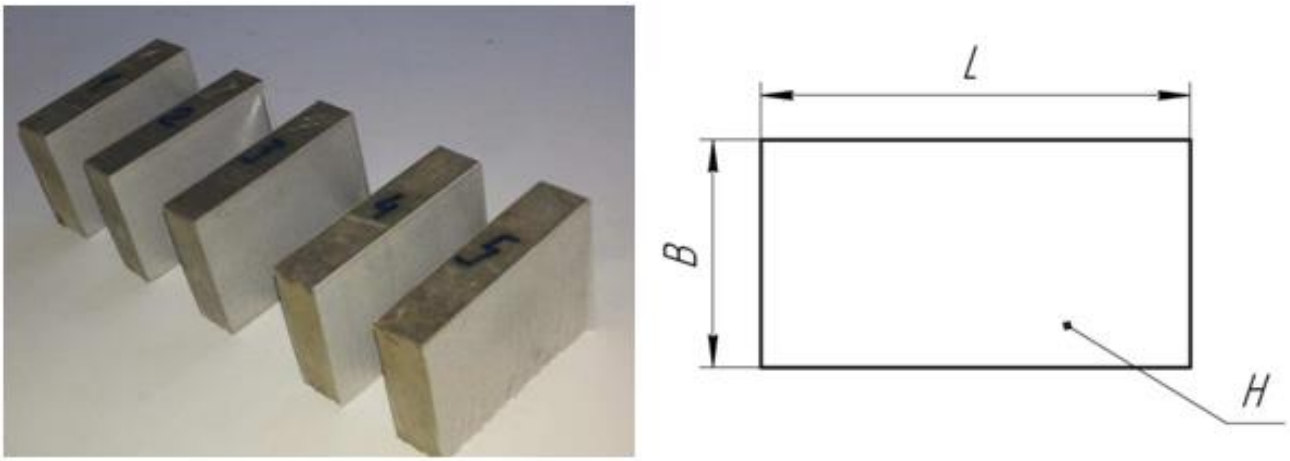


Рисунок 5.2. Опытные образцы из стали 20 ГОСТ 1050-88,

Рисунок 5.3. Гранатовый абразив Blastrite Microblast Garnet

Рисунок 5.4. Кругломер КД мод. 290

Рисунок 5.5. Микрометр цифровой 0-25, 0.001

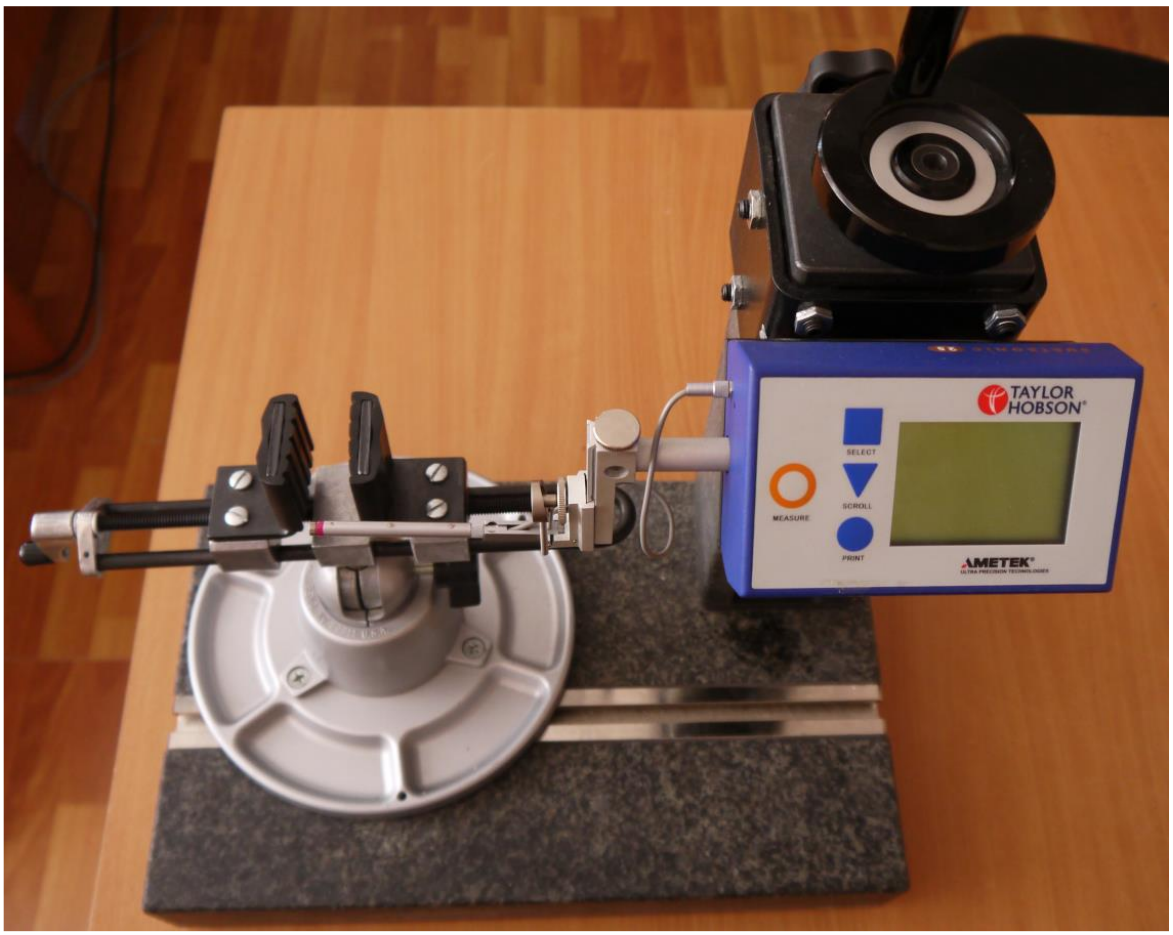


Рисунок 5.6. Профилометр SURTRONIK-3

Рисунок 5.7. Индикатор часового типа ИЧ-50

Рисунок 5.8. Твердомер модель НВ-3000В

Химический состав и механические свойства стали 20 занесены в таблицы 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1.

Химический состав стали 20, %

C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Cu
0,17-0,24	0,35 - 0,65	0,045.265 - 0,06	≤ 0,08	0,17 - 0,37	≤ 0,25	≤ 0,3	≤ 0,3

Таблица 5.2.

Механические свойства стали 20

Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σв, МПа	Относительный изгиб φ,%	Относительное удлинение δ, %	Твердость НВ
250	420	55	25	163

Исследования по определению параметров оптимизации проводились при следующих режимах обработки: концентрация частиц абразива на оси струи 10 $м^3$, начальная скорость жидкости 900 м/с, начальная скорость примеси 10 *м/с*, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности 1 *мм*, средний диаметр частиц абразива 0,25 *мм*, плотность частиц абразива 0,0042 $г/мм^3$, коэффициент несущей способности контактной поверхности 1 и механические свойства стали 20. Закладывание режимов обработки процесса гидроабразивного резания производилось на разработанном программном комплексе, а также параллельно на установке гидроабразивной резки ЧПУ (CNC) с осями X-Y, тип WJxxyyB-nZ-D (рисунок 5.2) производился раскрой образцов. Краткие технические данные станка приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3.

Технические характеристики станка гидроабразивной резки ЧПУ (CNC) с осями X-Y, тип WJxxyyB-nZ-D

Наименование параметра	Единица измерения	Величина параметра
Рабочая зона резки:	-	-
ось X	мм	1500
ось Y		3000
ось Z		150
Внешние размеры станка:	-	-
ось X	мм	2250
ось Y		4320
ось Z		1850
Мощность	кВт	11
Масса	кг	3800

5.3. Планирование эксперимента и обработка экспериментальных данных

Для проведения исследования по подтверждению работоспособности цифрового советника был проведен полный факторный эксперимент типа 2^3 [29, 31, 47, 48].

Результаты вычислений эксперимента подвергались регрессионному и дисперсионному анализам, что позволило оценить влияние исследуемых факторов (варьируемых параметров) на параметры оптимизации.

Варьируемыми параметрами были:

- X_1 - расход абразивных зерен Q, г/мин;

- X_2 - твердость заготовки T, НВ;

- X_3 - подача режущей головки S, мм/мин.

Параметрами оптимизации являлись:

- шероховатость обработанной поверхности R_a, мкм;

- конусообразность обработанной поверхности $\Delta_{кон}$, мм;

- величину твердости заготовки $T_Д$, НВ;

- отклонения от овальности $\Delta_{ов}$, мм.

Зависимости параметров оптимизации от варьируемых параметров, согласно методике [47], можно представить уравнениями степенного вида:

$$\left.\begin{aligned} R_a &= k_{R_a} \cdot Q^{\alpha_{R_{a3}}} \cdot T^{\beta_{R_{a2}}} \cdot S^{\gamma_{R_{a1}}} \\ \Delta_{кон} &= k_{\Delta_{кон}} \cdot Q^{\alpha_{\Delta_{кон3}}} \cdot T^{\beta_{\Delta_{кон2}}} \cdot S^{\gamma_{\Delta_{кон1}}} \\ T_Д &= k_T \cdot Q^{\alpha_{T_3}} \cdot T^{\beta_{T_2}} \cdot S^{\gamma_{T_1}} \\ \Delta_{ов} &= k_{\Delta_{ов}} \cdot Q^{\alpha_{\Delta_{ов3}}} \cdot T^{\beta_{\Delta_{ов2}}} \cdot S^{\gamma_{\Delta_{ов1}}} \end{aligned}\right\} \quad (5.1)$$

где $k_{R_a}, k_{\Delta_{ов}}, k_{\Delta_{кон}}, k_T, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ - постоянные величины.

Уравнения 5.1 в результате логарифмирования линеаризуется:

$$\left.\begin{aligned} \ln R_a &= \ln k_{R_a} \cdot \alpha_{R_{a3}} \cdot \ln Q \cdot \beta_{R_{a2}} \ln T \cdot \gamma_{R_{a1}} \ln S \\ \ln \Delta_{кон} &= \ln k_{\Delta_{кон}} \cdot \alpha_{\Delta_{кон3}} \ln Q \cdot \beta_{\Delta_{кон2}} \ln T \cdot \gamma_{\Delta_{кон1}} \ln S \\ \ln T_Д &= \ln k_T \cdot \alpha_{T_3} \ln Q \cdot \beta_{T_2} \ln T \cdot \gamma_{T_1} \ln S \\ \ln \Delta_{ов} &= \ln k_{\Delta_{ов}} \cdot \alpha_{\Delta_{ов3}} \ln Q \cdot \beta_{\Delta_{ов2}} \ln T \cdot \gamma_{\Delta_{ов1}} \ln S \end{aligned}\right\} \quad (5.2)$$

После уравнения записаны полиномами вида:

$$Y_1 = b_0^1 + b_1^1 X_1 + b_2^1 X_2 + b_3^1 X_3 + b_{1,2}^1 X_1 X_2 + b_{1,3}^1 X_1 X_3 + b_{2,3}^1 X_2 X_3 + b_{1,2,3}^1 X_1 X_2 X_3; \quad (5.3)$$

$$Y_2 = b_0^1 + b_1^1 X_1 + b_2^1 X_2 + b_3^1 X_3 + b_{1,2}^1 X_1 X_2 + b_{1,3}^1 X_1 X_3 + b_{2,3}^1 X_2 X_3 + b_{1,2,3}^1 X_1 X_2 X_3; \quad (5.4)$$

$$Y_3 = b_0^1 + b_1^1 X_1 + b_2^1 X_2 + b_3^1 X_3 + b_{1,2}^1 X_1 X_2 + b_{1,3}^1 X_1 X_3 + b_{2,3}^1 X_2 X_3 + b_{1,2,3}^1 X_1 X_2 X_3; \quad (5.5)$$

$$Y_4 = b_0^1 + b_1^1 X_1 + b_2^1 X_2 + b_3^1 X_3 + b_{1,2}^1 X_1 X_2 + b_{1,3}^1 X_1 X_3 + b_{2,3}^1 X_2 X_3 + b_{1,2,3}^1 X_1 X_2 X_3; \quad (5.6)$$

где $Y_1 = \ln R_a$, $Y_2 = \ln \Delta_{кон}$, $Y_1 = \ln T_Д$, $Y_1 = \ln \Delta_{ов}$, b_i - коэффициенты регрессии, X_1, X_2, X_3 – кодированные значения факторов Q, T, S.

Принятые в исследовании уровни варьирования факторов и их обозначения указаны в таблице 5.4.

Таблица 5.4.

Уровни факторов

Уровни	Кодированное обозначение	Натуральные уровни факторов		
		верхний +1	основной +1	нижний -1
Расход абразивных зерен Q	X_1	1100	685	270
Твердость заготовки T	X_2	167	134	101
Подача режущей головки S	X_3	300	170	40

Кодированные значения факторов X_1, X_2, X_3, согласно методике [29, 30, 31, 47], получили следующий вид:

$$\left.\begin{aligned} X_1 &= \frac{2(\ln Q - \ln 1100)}{\ln 1100 - \ln 270} + 1 \\ X_2 &= \frac{2(\ln T - \ln 167)}{\ln 167 - \ln 101} + 1 \\ X_3 &= \frac{2(\ln S - \ln 300)}{\ln 300 - \ln 40} + 1 \end{aligned}\right\} \quad (5.7)$$

Для оценки коэффициентов уравнений 5.3 – 5.6 был проведен полный факторный эксперимент типа 2^3 с построением матрицы планирования по методике [29, 47].

После определения коэффициентов уравнений 5.3 – 5.6 была проведена проверка гипотезы адекватности [29, 47] линейной части данных полиномов, которая установила адекватность уравнений. Затем вычислялась дисперсия

воспроизводимости эксперимента, проводилась проверка на статистическую значимость коэффициентов уравнений регрессии по критерию Стьюдента путем сравнения абсолютного значения коэффициентов с их доверительными интервалами, проверялась однородность дисперсий по критерию Кохрена и проводилась проверка адекватности модели по критерию Фишера [29, 31, 47].

По результатам проведенных исследований на основании теоретических представлений об объекте выполнена линеаризация нелинейных уравнений и были получены оценки уравнений регрессии:

$$\left.\begin{aligned} R_a &= 1.99Q^{-0.04}T^{-0.06}S^{0.03} \\ \Delta_{кон} &= 1.68Q^{-0.03}T^{-0.07}S^{0.014} \\ T_Д &= 1.73Q^{-0.029}T^{-0.07}S^{0.05} \\ \Delta_{ов} &= 1.04Q^{-0.06}T^{-0.05}S^{0.27} \end{aligned}\right\} \quad (5.8)$$

Полученные оценки уравнений регрессии (5.8) были записаны в систему технических ограничений, за критерии оптимизации были взяты расход абразивных зерен $Q_{аб}$, подача режущей головки S, за целевую функцию для оптимизации по двум параметрам (критериям оптимизации) была взята величина характеризующая минимальные затраты для выполнения резки:

$$F = \min \frac{S}{Q}, \quad (5.9)$$

На критерии оптимизации были введены ограничения с учетом технических параметров гидроабразивного станка WJxxyyB-nZ-D:

$$\begin{gathered} 270\ г/мин \le Q \le 1100\ г/мин, \\ 40\ мм/мин \le S \le 300\ мм/мин. \end{gathered} \quad (5.10)$$

Перепишем систему (5.8) с помощью подстановки принятых ограничений, в том числе ограничений определяемых условиями экспериментальных исследований:

$$\begin{cases} Q^{-0.04} \cdot S^{0.03} \geq \dfrac{R_a}{1.99 \cdot T^{-0.06}}; \\ Q^{-0.03} \cdot S^{0.014} \geq \dfrac{\Delta_{кон}}{1.68 \cdot T^{-0.07}}; \\ Q^{-0.029} \cdot S^{0.05} \geq \dfrac{T_Д}{1.73 \cdot T^{-0.07}}; \\ Q^{-0.06} \cdot S^{0.27} \geq \dfrac{\Delta_{ов}}{1.04 \cdot T^{-0,05}}; \\ Q \geq 270; \\ Q \leq 1100; \\ S \geq 40; \\ S \leq 300; \end{cases} \tag{5.11}$$

Таким образом были получена математическая модель процесса гидроабразивной резки, которая состоит из системы неравенств, ограниченной условиями и значениями показателей процесса резания, которые задают значение целевой функции, которая характеризует минимальные затраты при оптимальном подборе критериев оптимизации (расход абразивных зерен *Q*, подача режущей головки *S*). После проведения математических преобразований и логарифмирования получена математическая модель, представляющая классическую модель задачи линейного программирования в стандартной форме:

$$\begin{cases} -0.04X_1 + 0.03X_2 \geq b_1; \\ -0.03X_1 + 0.014X_2 \geq b_2; \\ -0.029X_1 + 0.05X_2 \geq b_3; \\ -0.06X_1 + 0.27X_2 \geq b_4; \\ X_1 \geq b_5; \\ X_1 \leq b_6; \\ X_2 \geq b_7; \\ X_2 \leq b_8; \end{cases} \tag{5.12}$$

$$\mathrm{G} = \min(X_2 - X_1),$$
$$X_1, X_2 \geq 0$$

Значения величин свободных членов b_1=-0.39, b_2=-0,176, b_3=-0.205, b_4=0.206, b_5=5.59, b_6=7, b_7=3.69, b_8=5.7 и коэффициентов у неизвестных учитывалась условиями обработки. Задача (5.12) была решена методом линейного программирования. Симплекс-метод использовали для поиска оптимальных значений резки (расход абразивных зерен $Q_{аб}$, подача режущей головки *S)* путем

вычисления координат $X_{1опт}$ и $X_{2опт}$. Графическая интерпретация определения достижимых значений представлена на рисунке 5.9.

Найдя координаты $X_{1\ опт}$ и $X_{2\ опт}$ определили оптимальные значения расхода абразивных зерен $Q_{аб}$, подачи режущей головки S:

$$Q_{опт} = e^{X_{1опт}} = e^{6.98} = 1078 \ \ г/мин;$$

$$S_{опт} = e^{X_{2опт}} = e^{3.69} = 40 \ мм/мин.$$

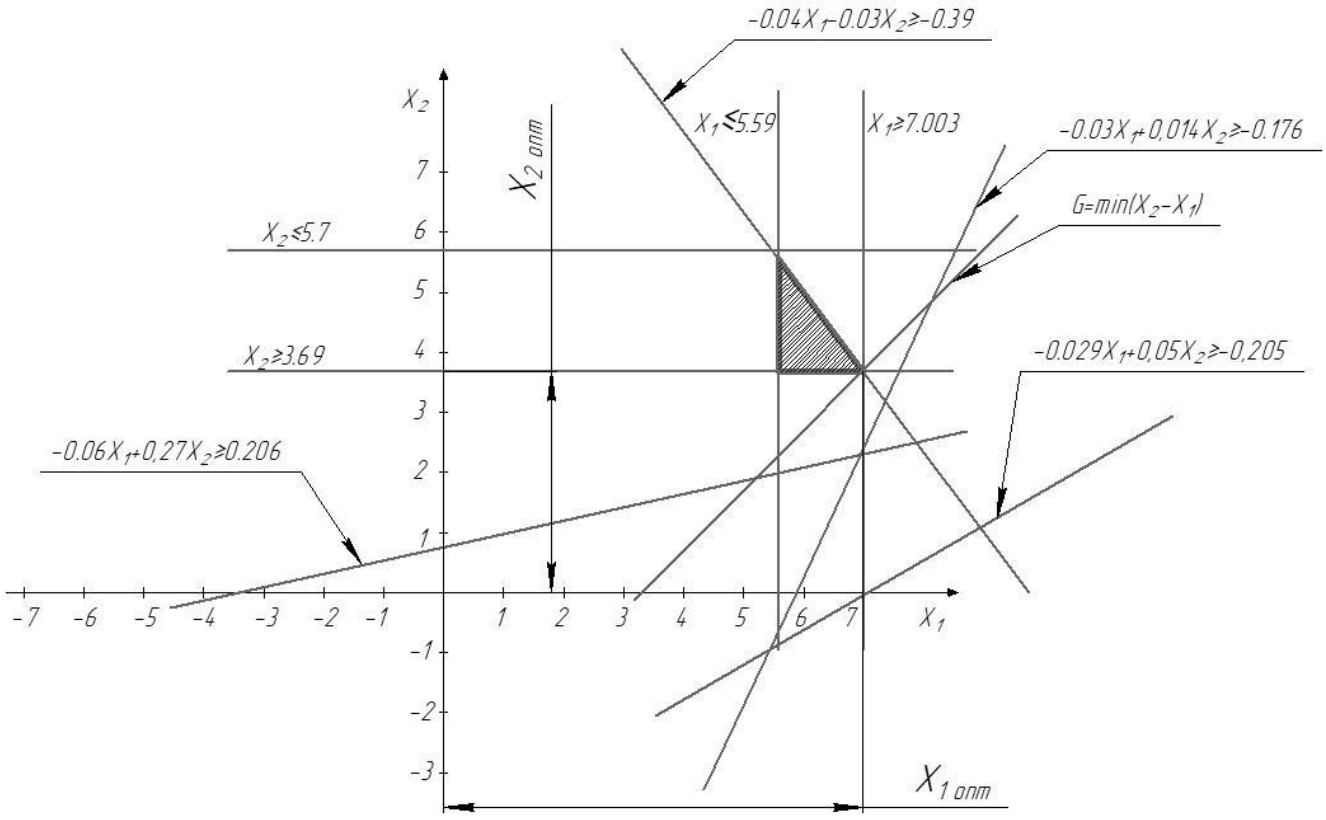


Рисунок 5.9. Графическая интерпретация симплекс - метода

По результатам программного комплекса и решением задачи симплекс методом было установлено, что для обработки заготовок из стали 20 требуется следующие оптимальные режимы резания: расход абразива *Q=1078 г/мин* и подача режущей головки *S=40 мм / мин* для получения показателей обработанной поверхности заготовки: значение шероховатости R_a=1.91 мкм, величины конусности реза 0.18 мм, величины отклонения от овальности 0.12 мм. Сравнение

двух методов показало, что расхождение значений результатов незначительно и не выходит за пределы 5%.

Значения шероховатости обработанных поверхностей по параметру R_a измеряли на профилометре «SURTRONIK-3 (рисунок 5.10). Величину твердости измеряли на твердомере модели НВ-3000В. Отклонение формы (от овальности и конусности обрабатываемых поверхностей заготовок) определяется следующими измерительными устройствами, а именно: кругломером КД мод. 290, микрометром цифровой 0-25, 0.001 и индикатором часового типа ИЧ-50.

Измерения проводились по Бринеллю с точностью ± 15: НВ участок 1 = 100, НВ участок 2 = 140, НВ участок 3 = 165.

Полученные детали были измерены с использованием программы профилометра с шестью поверхностями.

Диаграммы, полученные с помощью профилометра, представлены на рисунках 5.10 – 5.15.

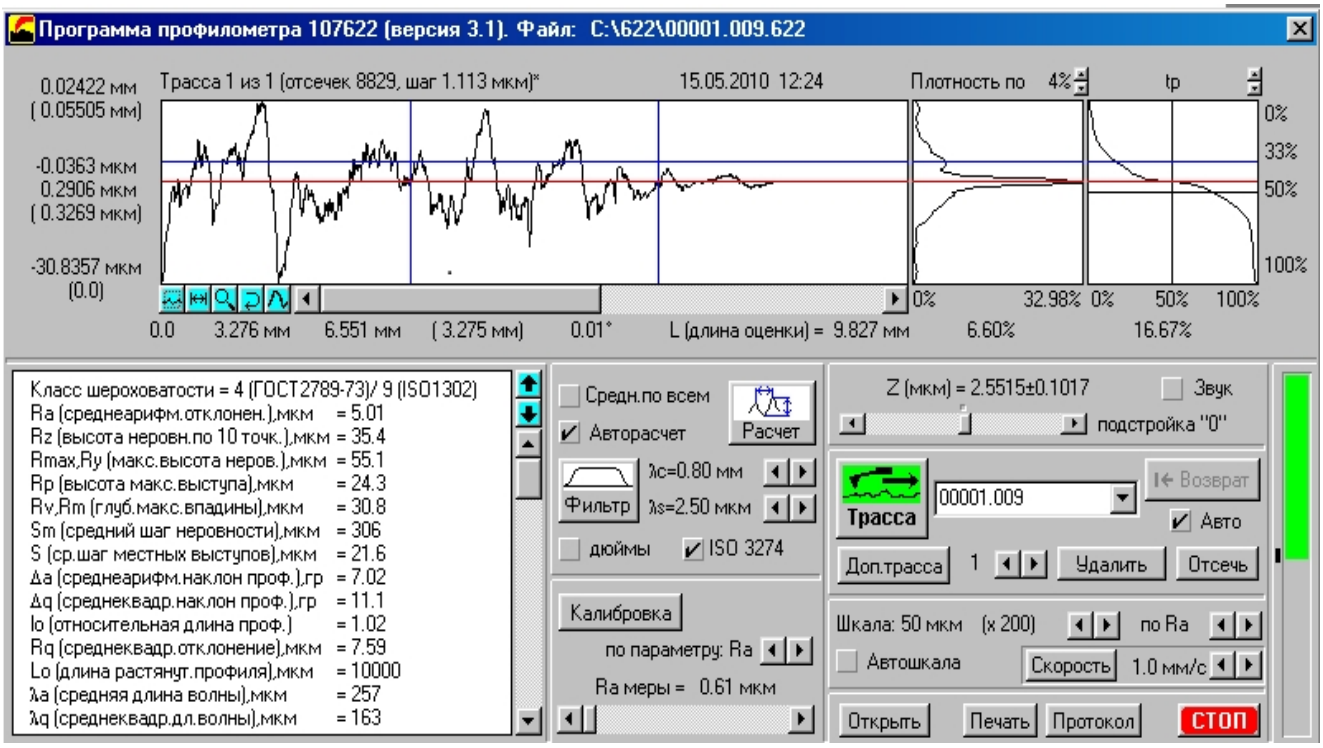


Рисунок 5.10. Показания профилометра исследуемой детали

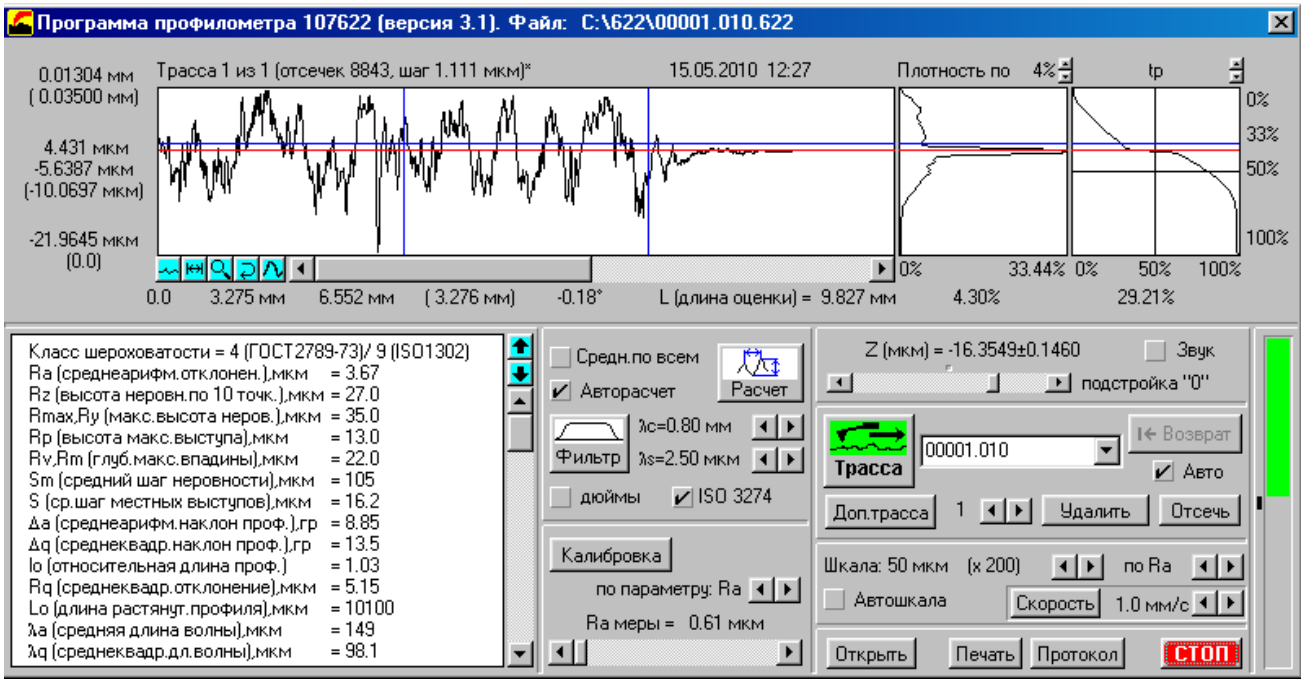


Рисунок 5.11. Показания профилометра исследуемой детали

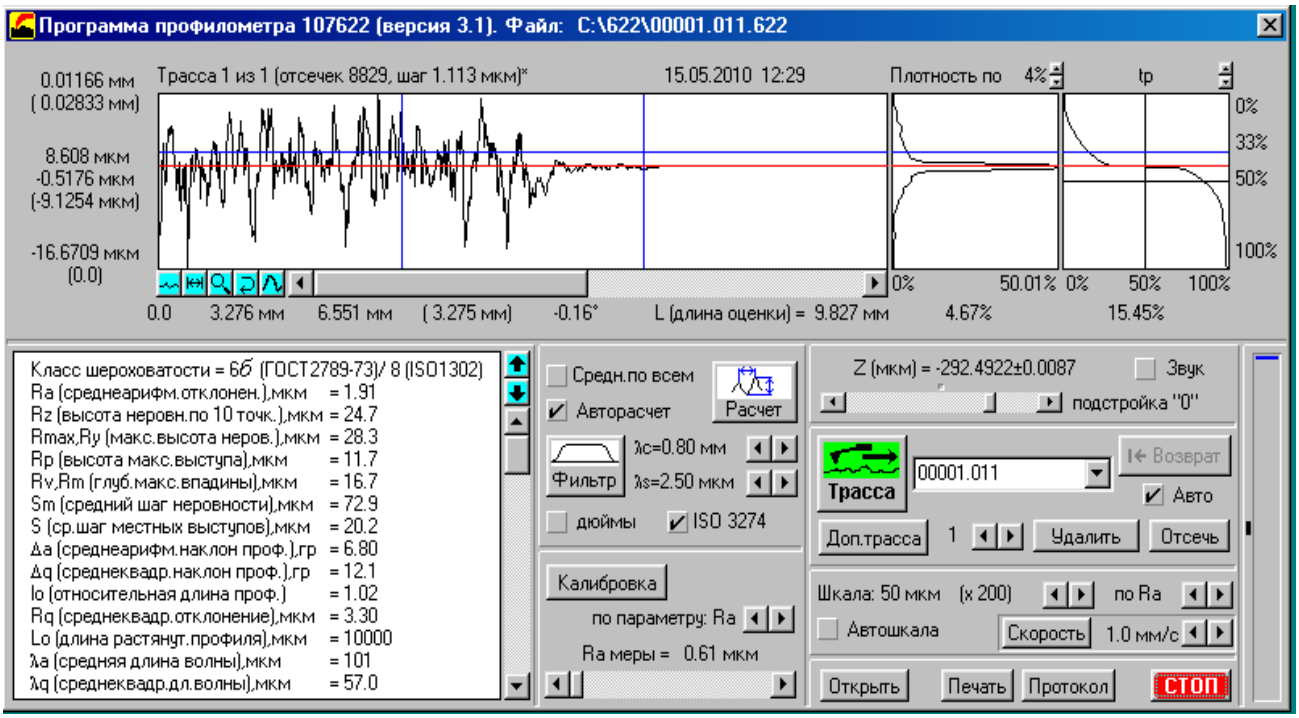


Рисунок 5.12. Показания профилометра исследуемой детали

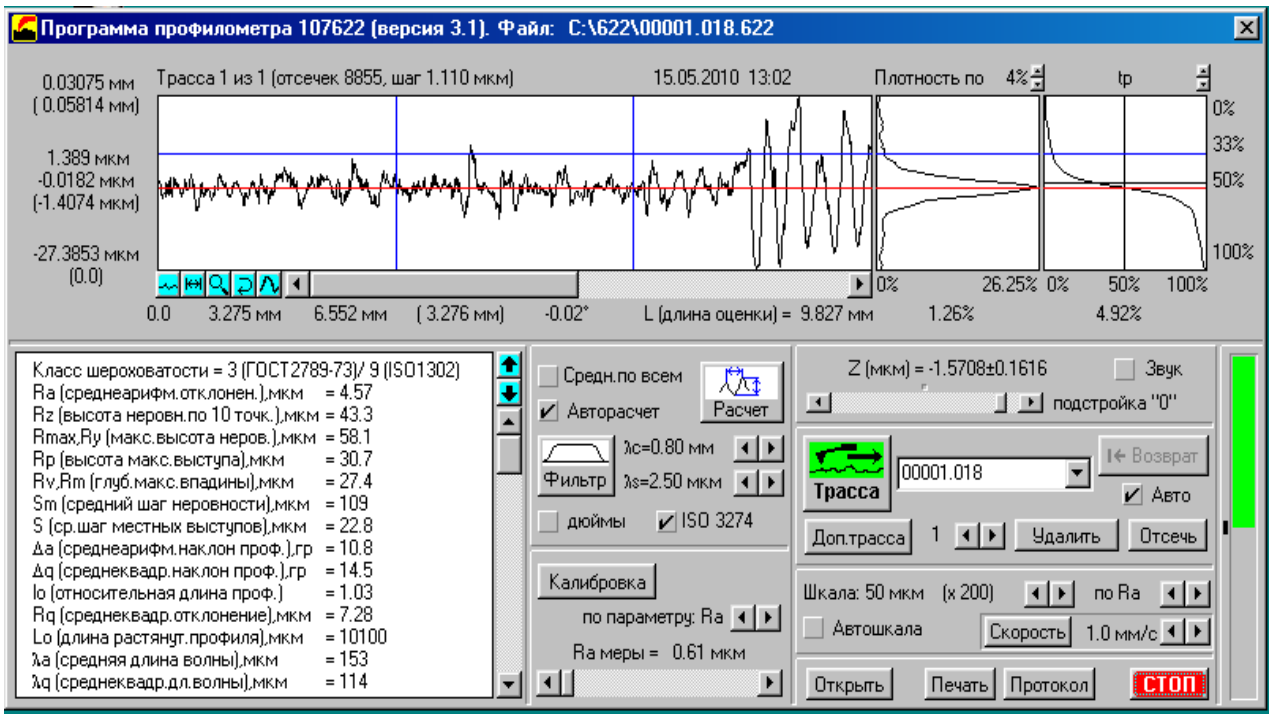


Рисунок 5.13. Показания профилометра исследуемой детали

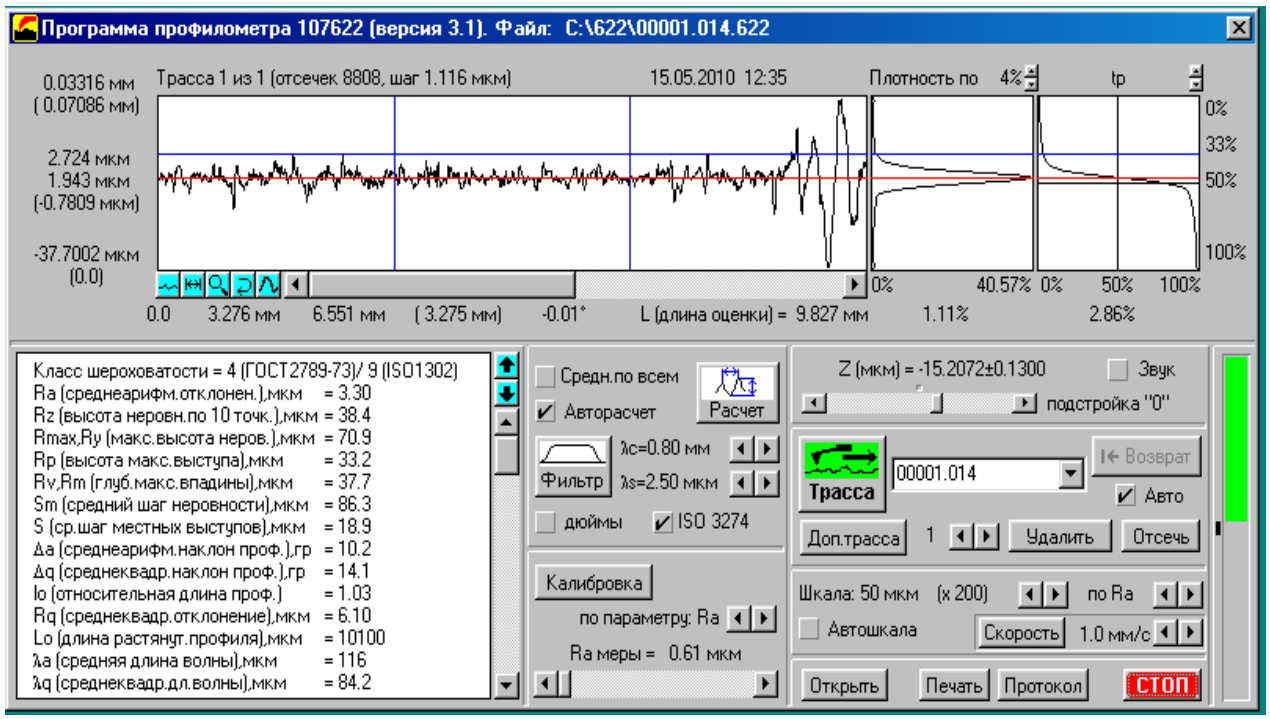


Рисунок 5.14. Показания профилометра исследуемой детали

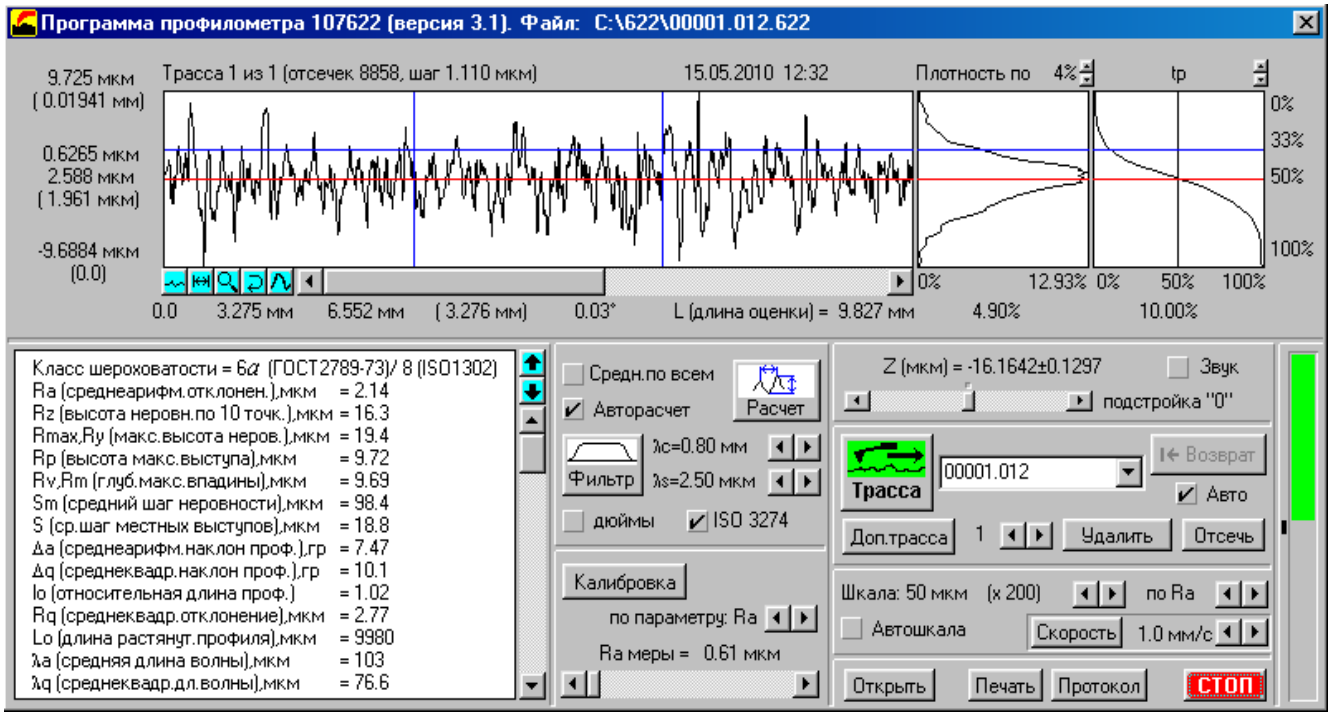


Рисунок 5.15. Показания профилометра исследуемой детали

На рисунке 5.16 представлены микрофотографии качества поверхности после гидроабразивной резки на разных стадиях реза с изменение цвета поверхности заготовки.

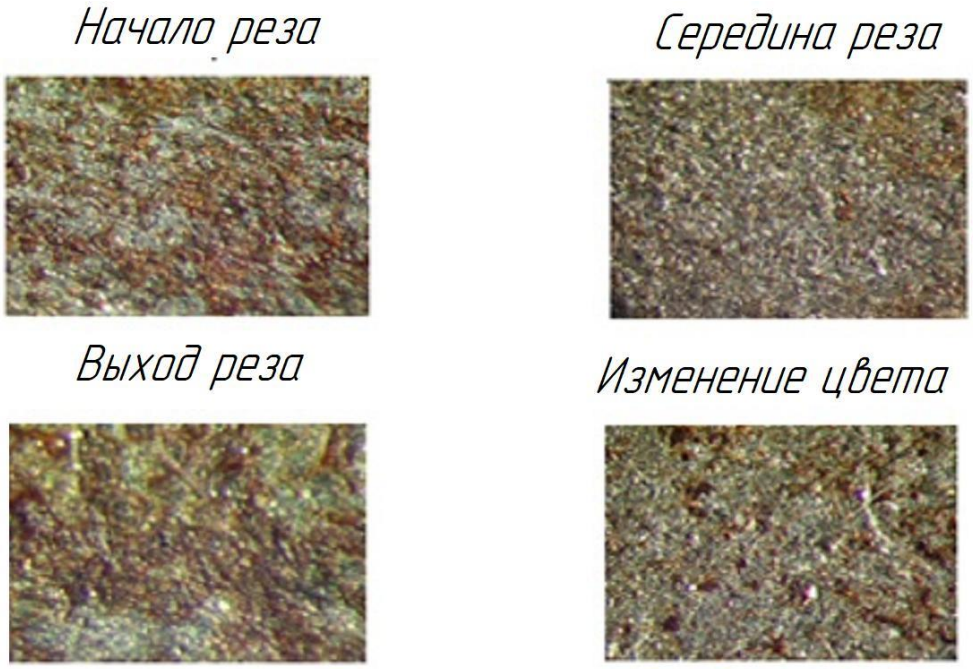


Рисунок 5.16. Микрофото обработанной заготовки из стали 20

Качество поверхности стального листа 20 ГОСТ 1050-88 до обработки имело следующие характеристики: значение шероховатости Ra = 2,7 мкм, значение по отклонению от овальности 0,2 мм, значение по конусности реза 0,3 мм, после проведения резки получены следующие параметры поверхности заготовки: значение шероховатости Ra = 1,91 мкм, величина конусности резания 0,18 мм, величина отклонения от овальности 0,12 мм.

На рисунке 5.17 показано фото качества поверхности до и после гидроабразивного резания.

а) б)

Рисунок 5.17. Качество поверхности листовой заготовки из стали 20: а) до обработки, б) после обработки

Оценка и сравнение полученных результатов на программном комплексе и симплекс метода решения задач линейного программирования по поиску оптимальных режимов резания для получения шероховатости показало, что отладка и подтверждение работоспособности программного обеспечения корректно выполнены.

ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦИФРОВОГО СОВЕТНИКА

При выполнении диссертационной работы разработана инструкция пользователя по эксплуатации цифрового советника системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости, также в инструкции приводится архитектура программного продукта с описанием модулей программного обеспечения, требований по эргономике, надежности, требований к составу и параметрам технических средств.

При разработке программного продукта для имитационного моделирования процесса гидроабразивной резки были использованы следующие инструментарии: платформа Java, язык программирования – JavaScript, среда разработки NetBeans.

Для корректной работы автоматизированной системы поддержки принятия решения (цифрового советника), обеспечивающей получение информации по расчету рациональных параметров гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости должен использоваться IBM-совместимый персональный компьютер (ПЭВМ), необходимый для внедрения разработанной системы, включающий в себя следующие минимальные требования:

- процессор Intel Celeron, 2x2900 МГц;
- ОЗУ не менее 4 Гб и выше;
- жесткий диск 160Гб;
- операционная система не ниже Windows XP с пакетом Net.Framework 4;
- монитор - диагональ не менее 15”;
- клавиатура - не менее 104 клавиш (русифицированная) (USB-интерфейс);
- координатно-указательное устройство - манипулятор типа «мышь» (USB-интерфейс);
- источник бесперебойного питания;
- сетевой адаптер - 100 Мбит;
- видеосистема - разрешающая способность не ниже 1024x768 точек;

- высокоскоростной порт USB 2.0;

- устройство чтения компакт-дисков (DVD-ROM);

- источник бесперебойного питания.

Также для корректной работы программный комплекс удовлетворяет требованиям по обеспечению надежного функционирования, а именно надежное (устойчивое) функционирование программного комплекса должно быть обеспечено выполнением совокупности организационно-технических мероприятий, перечень которых приведен ниже:

- организацией бесперебойного питания технических средств;
- использованием лицензионного программного обеспечения;
- регулярным выполнением рекомендаций Министерства труда и социального развития РФ, изложенных в Постановлении от 23 июля 1998 г. Об утверждении межотраслевых типовых норм времени на работы по сервисному обслуживанию ПЭВМ и оргтехники и сопровождению программных средств».

Инструкция пользователя по работе с программным продуктом приведена в Приложении П.4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

В диссертационном исследовании представлена разработка программно-алгоритмического обеспечения по автоматизации процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости путем создания системы поддержки принятия решения (цифрового советника), обеспечивающей получение информации по расчету параметров резки без запуска физического процесса с выдачей рекомендаций оператору для достижения рациональных показателей по производительности процесса резки.

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. В результате проведенного исследования достигнута цель диссертационной работы по разработке программно-алгоритмического обеспечения по автоматизации процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости путем создания системы поддержки принятия решения (цифрового советника).

2. Проведенный анализ исследований по системам управления процессом гидроабразивной резки показал, что качество и точность обрабатываемых деталей можно обеспечить путем автоматизации процесса гидроабразивного резания с закручиванием струи рабочей жидкости, что позволило разработать систему поддержки принятия решения (цифровой советник) по применению конкретного метода, позволяющего увеличить производительность и эффективность обработки.

3. Разработаны аналитические зависимости процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости на основе усталостного выкрашивания абразивных частиц с обрабатываемой заготовкой, позволяющие подбирать рациональные параметры обработки без запуска физического процесса резки.

4. Разработана модель формирования устойчивого профиля шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки с учетом неполных резов металла абразивными зернами для метода гидроабразивной резки с дополнительным колебательным движением (осцилляция) рабочей струи.

5. Разработана автоматизированная система поддержки принятия решения (цифрового советника), обеспечивающая получение информации по расчету

параметров гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости без запуска физического процесса с выдачей рекомендаций оператору для достижения рациональных показателей по производительности процесса резки.

6. Успешно выполнено экспериментальное подтверждение работоспособности разработанного программного обеспечения по поддержке принятия решения (цифрового советника) системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости путем проведения имитационного (компьютерного) моделирования.

7. Разработаны практические рекомендации по эксплуатации цифрового советника системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости.

8. Разработанный программный комплекс официально зарегистрирован в государственном реестре Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент).

9. Предложен и запатентован способ гидроабразивной резки с дополнительным колебательным движением (осцилляция) рабочей струи.

Перспективным направлением развития данной работы является исследование возможности использования разработанного программно-алгоритмического обеспечения системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости для решения задач освобождение пострадавших в ДТП с помощью технологии гидроабразивной резки, а также более детальная проработка функционала системы для ее использования в штатных условиях и решения технологических задач по освобождению пострадавших из автомобилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматический крой с помощью водяных струй [Текст] // Р. Ж. Легкая промышленность. - 1977. - № 8. - С. 18 - 19.
2. Бабак, Ф.К. Основы стрелкового оружия [Текст] / Ф.К. Бабак. - СПб.: ООО «Издательство «Полигон», 2003. - 258 с.
3. Баранчиков, В.И. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Серия: Библиотека технолога [Текст] / В.И. Баранчиков, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. - М.: Машиностроение, 2002. - 264 с.
4. Барсуков, Г.В. Моделирование активной границы сверхзвуковой двухфазной струи в межслойной зоне при пакетном резании материалов [Текст] / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев, Е.Г. Алюшин // Известия ОрелГТУ. - № 2 - 4. - 2009. - С. 8 - 13.
5. Бибо, Б. jQuery. Подробное руководство по продвинутому JavaScript / Б. Бибо, И. Кац. - 2-е изд. - СПб.: Символ - Плюс, 2008. - 624 с.
6. Бурнашов, М.А. Повышение эффективности разрезания листовых неметаллических материалов водоледяными струями высокого давления [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Бурнашов Михаил Анатольевич. - Орел, 2010. - 37 с.
7. Бурнашов, М.А. Теория и технология процесса раскроя пакетов машиностроительных текстильных материалов сверхзвуковой струей жидкости [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бурнашов Михаил Анатольевич. - Тула:ТулГУ, 1998. - 19 с.
8. . Гуенко, В.С., Пономарев Ю.А., Зенкин А.С. Интенсификация процесса гидрорезания конструкционных материалов // Технология и автоматизация машиностроения. - 1981. - №28. - С. 19 - 23.
9. Дунаев В. Самоучитель JavaScript. - 2-е изд. - СПб.: Питер, 2005.
10. Денисов, А.С. Повышение эффективности гидроабразивного резания заготовок из толстолистовых металлов на основе дискретной подачи абразива [Текст]: дис. … канд. техн. наук: 05.02.07 / Александр Сергеевич Денисов; науч. рук. В.И. Иванов. - Москва, 2014. - 132 с.

11. Журавлева, Т.А. Технологическое обеспечение качества гидроабразивного резания стеклотекстолитов за счет управления параметрами прошивки [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Татьяна Александровна Журавлева; науч. рук. Г.В. Барсуков. - Орел, 2015. - 171 с.
12. Зайченко, И.З. Применение высоконапорной струи жидкости для резания металлов [Текст] / И.З. Зайченко // Станки и инструмент. - 1988. - № 4. - С. 25 - 27.
13. Иванов, В В. Вопросы моделирования двухфазной турбулентной струи / В.В. Иванов, В.В. Шпилев, А.Г. Мирошкин // Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф., ноябрь 2011 г. - Пенза: ПДЗ, 2011. - С. 31 - 33.
14. Иванов В.В., Калашников Е.А. Программное обеспечение для прогнозирования процесса гидроабразивного резания // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике: Сборник научных трудов 2-й Международной научно-технической конференции (30 апреля 2020 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т- 2020. – С. 81 -85.
15. Кедровский, Б.Г. Перспективи використання процесу гідрорізаняя [Текст] / Б.Г. Кедровский, Ю.В: Клапцов // Легка промышленность. - 1989. - №3. - С. 20 - 21.
16. Королев, А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев // Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. - 191 с.
17. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ: [пер с англ.] / Т. Кормен. - 2-е изд. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. - 893с.
18. Кравченко, Д.В. О проблеме применения сверхзвуковой струи жидкости для получения отверстий в листовых материалах [Текст] / Д.В. Кравченко // Известия ТулГУ. Серия «Машиностроение». - 2000. - Вып. 5. - С. 175 - 179.
19. Крайни, З. Разрезание стальных труб абразивно-водной струей [Текст] / З. Крайни // СТИН. - 1992. - № 2. - С. 35 - 36.

20. Кузьмин, Р.А. Разработка и исследование процесса гидрорезания материалов струями жидкости с добавками водорастворимых полимеров [Текст]: дис. … канд. техн. наук: 05.03.01 / Роман Алексеевич Кузьмин; науч. рук. Р. А. Тихомиров. - Владимир, 2003. - 177 с.
21. Малышев, Ю.Н. Гидроабразивная технология резания - состояние разработок и перспективы применения в угольной промышленности России [Текст] / Ю. Н. Малышев, В. М. Зыков, С. А. Кариман // Уголь. - 1999. - №2.
22. Машиностроительный комплекс: состояние и варианты развития [Текст]: (обзор) // Экономист. - №1. - 1996.
23. Мерзляков, В.Г. Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве [Текст] / В.Г. Мерзляков, В.Е. Бафталовский, И.В. Иванушкин. - М.: ННЦГПИГД им. А. А. Скочинского, 2004. - 340 с.
24. Мерзляков, В.Г. Использование гидроструйных технологий для обеспечения эффективного пылеподавления и пылевзрывозащиты при очистных подготовительных и вспомогательных работах [Текст] / В.Г. Мерзляков, В.Е. Бафталовский // Уголь. - 2002. - № 10. - С. 3 - 6.
25. Метод увеличения режущей способности гидроабразивной струи [Текст] / В.В. Шпилев [и др.] // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011: сб. науч. тр. SWorld по материалам Междунар. науч.-практ. конф. - Вып. 4. - Т. 6. - Одесса: Черноморье, 2011. - С. 18 - 23.
26. Меры по развитию машиностроения [Текст]: аналитическая записка. - Институт комплексных стратегических исследований. - 2005, ноябрь.
27. Михеев, А.В. Повышение производительности пакетной резки материалов гидроабразивной струей [Текст]: дис. … канд. техн. наук: 05.02.08 / Александр Васильевич Михеев; науч. рук. Г.В. Барсуков. - Орел, 2009. - 173 с.
28. Монахов, В.В. Язык программирования Java и среда NetBeans / В.В. Монахов. - СПб.: БХВ - Петербург, 2011. - 704 с.

29. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов [Текст] / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. - М.: Наука, 1965. - 340 с.
30. Ноутон, П. Java 2: [пер с англ.] / П. Ноутон, Г.Шилдт. - СПб.:БХВ - Петербург, 2006. - 1072с.
31. Одиноков, И.П. Совершенствование технологии торцовой калибровки деталей типа колец подшипников способом лобового точения: дис. … канд. техн. наук. - Саратов, 2009. - 138 с.
32. Пат. 2688007 Российская Федерация. Способ гидроабразивной обработки с осцилляцией струи / В.В. Иванов, А.Н. Васин, Б. М. Изнаиров. № 2017143280, 11.12.2017, опубл. 17.05.2019. Бюл. № 14.
33. Пат. № 2466008 Российская Федерация. Способ формирования струи жидкости для резания материалов и устройство для его реализации / Шпилев В.В., Решетников М.К., Капульник С.И., Береда Н.Н., Кутин А. С. Опубл. 10.11.2012. Бюл. №31.
34. Петухов, Е.Н. Получение отверстий в нержавеющих сталях импульсными абразивно-жидкостными струями [Текст] / Е.Н. Петухов // Актуальные проблемы машиностроения на современном уровне: тр. Всерос. науч.-техн. конф., Владимр. гос. ун-т. - Владимир, 1995. - С. 65 - 66.
35. Полежаев, Ю.В: Процесс установления эрозионного разрушения преграды при многократном соударении с частицами [Текст] / Ю.В. Полежаев // Инженерно-физический журнал. - 1979. - №3. - С. 389.
36. Полянский, С.Н. Технология и оборудование гидроабразивной резки [Текст] / С.Н. Полянский, А.С. Нестеров // Вестник машиностроения. - 2004. - №5. - С. 43 - 46.
37. Попилов, Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов [Текст] / Л.Я. Попилов. - Л.: Машиностроение, 1971. - 544 с.
38. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования [Текст] / Э. Гамма [и др.]. - СПб.: Питер, 2008. - 336 с.

39. Применение струи воды для разрезания ткани [Текст] // Р.Ж. Швейная промышленность. - 1967. - № 5. - С. 12.
40. Проволоцкий, А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин [Текст] / А.Е. Проволоцкий. - Киев: Техника, 1989. - 279 с.
41. Рамбо, Дж. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка [Текст] / Дж. Рамбо, М. Блаха. - СПб.: Питер, 2007. - 544 с.
42. Сазонов, Д.Ю. Экспериментальные исследования по удалению теплозащитного покрытия при гидроструйном расснаряжении боеприпасов [Текст] / Д.Ю. Сазонов // Известия ОрелГТУ. Сер. «Машиностроение. Приборостроение». - 2003. - № 3. - С. 47 – 49.
43. Саленко, А.Ф. Гидроструйное очищение поверхности твердого тела [Текст] / А.Ф: Саленко, В.И. Приходько, И.В. Петко // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. 2000. - Вып. 1.
44. Саленко, А.Ф: Управление качеством при гидрорезке тонколистовых слоистых пластиков [Текст] /А.Ф. Саленко // Оборудование и инструмент. - 2003. - №2. - С. 20 - 21.
45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610091, Российская Федерация. Программа для расчета технологических параметров гидроабразивной обработки путем закручивания струи / В.В. Иванов, Е.А. Калашников.: заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»). - № 2019614909; заявл. 14.12.2023; опубл. 09.01.2024.
46. Скирденко, О.И. Исследование процесса гидрорезания высокоэластичных и других синтетических и рулонированных материалов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.И. Скирденко. - Киев, 1978. - 22 с.
47. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А.А. Спиридонов. - М.: Машиностроение, 1981. - 183 с.

48. СТП 501-82-74. Стандарт предприятия. Методические материалы по планированию экстремальных экспериментов.
49. Степанов, Ю.С. Раскрой текстильных материалов сверхзвуковой струей жидкости [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, М.А. Бурнашов // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения – «Технология - 2000»: сб. науч. тр. МНТК 28 - 30 сентября 2000 ОрелГТУ. - Орел, 2000. - С. 133 - 136.
50. Степанов, Ю.С. Расширение технологических возможностей установки для раскроя машиностроительных текстильных материалов сверхзвуковой струей жидкости [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков // Необратимые процессы в природе и технике: тез. докл. Всерос. НТК 23 - 25 янв. 2001 г. МГТУ им. Н. Э. Баумана. - Москва, 2001. - С. 52 - 53.
51. Тихомиров, Р.А. Применение сверхзвуковой абразивно-жидкостной струи для точения труднообрабатываемых деталей [Текст] / Р.А. Тихомиров, А.В. Полин // Ресурсосберегающие технологии машиностроения: сб. тр. меж-вуз. науч.-техн. конф. МААТМ. - Москва, 1995. - С. 211 - 217.
52. Теоретические предпосылки исследования процесса гидроабразивной резки на оси двухфазной турбулентной струи [Текст] / В.В. Иванов [и др.] // Теоретические и прикладные проблемы науки и образования в 21 веке: сб. науч. тр. по материалам Междунар. заочн. науч.-практ. конф. - Тамбов, 2012. - С. 62 - 64.
53. Теоретические предпосылки исследования процесса гидроабразивной резки на оси двухфазной турбулентной струи / В.В. Иванов [и др.] // Теоретические и прикладные проблемы науки и образования в 21 веке: сб. науч. тр. по материалам Междунар. заочн. науч.-практ. конф. - Тамбов, 2012. - С. 62 - 64.
54. Тихомиров, Р.А. Высокопроизводительное резание полимерных материалов сверхзвуковыми струями жидкости [Текст]: автореферат .дис. … д-ра техн. наук / Тихомиров Рудольф Анатольевич. - Владимир: ВГТУ, 1989. - 27 с.
55. Тихомиров, Р.А. Использование сверхзвуковой струи жидкости в качестве режущего инструмента [Текст] / Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов // Проблемы

теории проектирования и производства инструмента: тез. докл. совещания, ТулГУ. - Тула, 1995. - С. 10 - 12.

56. Тихомиров, Р.А. К вопросу об экономической эффективности гидрорежущего оборудования [Текст] / Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов, Д.В. Кравченко // Актуальные проблемы экономической теории и практики: матер. межвуз. науч.-техн. конф. ВлГУ. - Владимир, 1998. - С. 23.
57. Тихонов, А.А. Повышение эффективности процесса гидроабразивной обработки [Текст]: дис. … канд. техн. наук: 05.02.08 / Андрей Александрович Тихонов; науч. рук. М.А. Тамаркин. - Ростов-на-Дону, 2011. - 152 с.
58. Хабибуллин, И.Ш. Самоучитель Java 2. [Текст] / И.Ш. Хабибуллин. - СПб.: БХВ - Петербург, 2005. - 720 с.
59. Шапиро, И.И. Установка для контурного разрезания неметаллических материалов с помощью высоконапорной струи воды [Текст] / И.И. Шапиро // Станки и инструмент. - 1992. - № 9. - С. 20 - 22
60. Шпилев, В.В. Повышение эффективности процесса гидроабразивной резки листовых деталей путем оптимизации режимов обработки и параметров струи рабочей жидкости [Текст]: автореферат дис. … канд. техн. наук: 05.02.08 / Василий Владимирович Шпилев. - Саратов, 2012. - 20 с.
61. Экспериментальные исследования гидроабразивной обработки [Текст] / В.В. Шпилев [и др.] // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011: сб. науч. тр. SWorld по материалам Междунар. науч.-практ. конф. - Вып. 4. Т. 6. - Одесса: Черноморье, 2011. - С. 23 - 26.
62. Arola, D. Abrasive waterjet machining of titanium alloy [Text] / D. Arola, M. Ramulu // Proc. 8th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn. Ass., St. Louis. - P. 389 - 408.
63. Arola, D. Mechanisms of material removal in abrasive waterjet machining of common aerospace materials [Text] / D. Arola, M. Ramulu //. In: (ed) Proc. 7th Amer. Water Jet Gonf, Vol. 1. Water Jet Techn. Ass., St. Louis. - P. 43 – 64.

64. Arola, D. A study of kerf characteristics in abrasive waterjet machining of graphite/epoxy composites [Text] /D. Arola, M. Ramulu // MD - Vol. 45 / PED - Vol. 66. - 1993. - P. 125 - 150.
65. Bitter, J.G.A. A study of erosion phenomena [Text] / J.G.A. Bitter // part I. Wear 6. - 1963. - P. 649 - 664.
66. Bitter, J.G.A. A study of erosion phenomena [Text] / J.G.A. Bitter // part I. Wear 6. - 1963. - P. 169 - 190.
67. Blickwedel, H. Erzeugung und Wirkung von Hochdruck-Abrasivstrahlen [Text] / H. Blickwedel // VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2. - 1990. Nr. 206.
68. Chao, J. Experimental study of the striation formation and spectral analysis of the abrasive waterjet generated surfaces [Text] / J. Chao, E S. Geskin // In: Hashish M (ed) Proc. 7th Amer. Water Jet Conf. Vol. 1, Water Jet Techn. Ass., St. Louis, 1993. - P. 27 - 41.
69. CSS. Каскадные таблицы стилей // Википедия - свободная энциклопедия. - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/CSS (дата обращения 25.05.2020).
70. Finnie, I. The mechanism of erosion of ductile metals [Text] / I. Finnie / Proc. 3rd U.S. Nat. Congr. Appl. Mech., ASME. - NY, 1958. - P. 527 - 532.
71. Geskin, E.S. Waterjet cutting experiments determine optimal techniques [Text] / E.S. Geskin, W. L. Chen // Glass Digest. - 1988. - P. 66 - 69.
72. Guo, N. S. SchneidprozeP und Schnittqualitat beim Wasserabrasivstrahl-schneiden [Text] / N.S. Guo // VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 2. - 1994. Nr. 328.
73. Hashish, M. Aspects of abrasive-waterjet performance optimization / M. Hashish // Proc/8th Int. Symp. On Jet Cutting Technology. - BHRA . - 1986.
74. Hashish, M. An improved model for erosion by solid particle impact [Text] / M. Hashish // In: Field J E, Dear J P (eds) Proc. 7th Int. Conf. Erosion by Liquid and Solid Impact, Cavendish Lab., Cambridge, 1987. - P. 66.1 - 66.9.
75. Hashish, M. A model study of metal cutting with abrasive water jets [Text] / M. Hashish // ASME J. Engng. Mat. and Techn. 106. - 1984. - P. 88 - 101.

76. Hashish, M. Prediction of depth of cut in abrasive waterjet (AWJ) machining [Text] / M. Hashish // MD - Vol. 3. - 1987. - P.65 - 82.
77. Hashish, M. Visualization of the abrasive waterjet cutting process [Text] / M. Hashish // Exp. Mechan. 28. - 1988. - P. 159 - 169.
78. Hocheng, H. Material removal analysis in abrasive waterjet cutting of ceramic plates / H. Hocheng, K.R. Chang // Departament of power mechanical engineering, national Tsing university, Hsinchu, Taiwan. - 1993.
79. HTML // Википедия - свободная энциклопедия.- Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/HTML (дата обращения 25.05.2020).
80. Kovacevic, R. Monitoring the depth of abrasive waterjet penetration [Text] / R. Kovacevic // Int. J. Mach. Tools, and Manuf., 1995. - № 32. - P. 725 - 736.
81. Kovacevic, R. Monitoring of thermal energy distribution in abrasive waterjet cutting usingn infrared thermography [Text] / R. Kovacevic, R. Mohan, H. Beardsley // ASME J. Manuf. Sci. and Engng. 118. - 1996. - P. 555 - 563.
82. Kovachevic, R. Cutting force dynamics a tool for surface profile monitoring in AWJ [Text] / R. Kovachevic, R. Mohan, Y. M. Zhang // ASME J. Eng. - 1995. - P. 340 - 350.
83. Kovacevic, R. Surface finish and its relationship to cutting parameters [Text] / R. Kovacevic, H.H. Liaw, J.F. Barrows // SME TP MR88-589, Soc. of Manuf. Engrs., Dearborn. - 1988. - P. 1 - 5.
84. Machining with Abrasives / J.M. Jackson, J.P. Davim, M P. Hitchiner, T. Tawakoli, A. Rasifard, L.C. Zhang, J. Liu, C. Xu,H. Huang, L. Zhou, L. Yin, Y.M. Ali, J. Wang // Purdue university MET, Center for advanced manufacturing college of technology West Lafayette USA. - 2011.
85. Mohan, R. Acoustic emission-sensing as a tool for monitoring energy dissipation in abrasive waterjet cutting [Text] / R. Mohan, A.W. Momber, R. Kovacevic // ASME J. Manuf. Sci. and Engng. - 1997. - P. 321 - 332.
86. Mohan, R. Detection of energy dissipation during abrasive waterjet machining using acoustic emission technique [Text] / R. Mohan, A.W. Momber, R. Kovacevic // MED - Vol. 2 - 1. - 1994. - P. 243 - 256.

87. Mohan, R. On-line: monitoring of the depth of AWJ penetration using acoustic emission technique [Text] / R. Mohan, A. W. Momber, R. Kovacevic // In Allen N G (ed) Jet Gutting Technol., Mech. Eng. Publ. Ltd., London. - 1994. - P. 649 -664.
88. Ohlsson, L. Mechanisms of striation formation in abrasive waterjet cutting [Text] / L. Ohlsson, J. Powell, C. Magnusson// In: Allen N G (ed) 1994 Jet Cutting Technol, Mech. Engng. Publ. Ltd., London, 1994. - P. 151 - 164.
89. Raju, S.P. Predicting hydro-abrasive erosive wear during abrasive1 waterjet cutting - part 1: a mechanistic formulation and its solution [Text] / S.P. Raju, M. Ramulu // PED - Vol. 68 - 1. - 1994. - P.339 - 351.
90. Raju, S.P. Predicting hydro-abrasive erosive wear during abrasive waterjet cutting - part 2: an experimental study and model verification [Text] / S.P. Raju, M. Ramulu // PED - Vol. 68-1. - 1994. - P. 381 - 396.
91. Roth, P. Determination of abrasive particle velocity using laser-induced fluorescence and particle tracking methods in abrasive water jets / P. Roth, H. Looser, K.C. Heiniger, S. Bühler // American waterjet conference. - 2005.
92. Wang, J. Particle velocity models for ultra high pressure abrasive water jets / J. Wang // Mater Process Technol. - 2009. P. 209.
93. Zeng, J. Characterization of energy dissipation, phenomena in abrasive waterjet cutting [Text] / J. Zeng, R. Heines, T.J. Kim // In: Labus T J (ed) Proc. 6th Amer. Water Jet Conf, Water Jet Techn. Ass., St. Louis, 1991. - P. 163 - 177.
94. Zeng, J. Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials [Text] / J. Zeng, T.J. Kim// In: Lichtarowicz A (ed) Jet Cutting Technol, Kluwer Acad. Press, Dordrecht, 1992. - P. 483 - 501.
95. Zhou, G. Investigation of topography of waterjet generated surfaces [Text] / G. Zhou, M. Leu, E.G. Geskin // PED. - 1992. - Vol. 62. - P. 191 - 202.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П.1. Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2688007

Способ гидроабразивной обработки с осцилляцией струи

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А." (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) (RU)***

Авторы: ***Иванов Виктор Викторович (RU), Изнаиров Борис Михайлович (RU), Васин Алексей Николаевич (RU)***

Заявка № **2017143280**
Приоритет изобретения **11 декабря 2017 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **17 мая 2019 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **11 декабря 2037 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

П.2. Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024610141

Программа для управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости

Правообладатель: ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) (RU)***

Авторы: ***Иванов Виктор Викторович (RU), Калашников Евгений Александрович (RU)***

Заявка № **2023688644**
Дата поступления **14 декабря 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***09 января 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024610091

Программный комплекс для моделирования оптимальных параметров процесса гидроабразивной резки с дополнительным движением струи

Правообладатель: ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) (RU)***

Авторы: ***Иванов Виктор Викторович (RU), Калашников Евгений Александрович (RU)***

Заявка № **2023687889**

Дата поступления **14 декабря 2023 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***09 января 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

П.3. Исходный код программы

```
//ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ

// Интеграл
function integral(expression, a, b)
{
   var x, y1, y2, n, length, dx, S = 0;
   length = Math.abs(b-a);
   n = 100;
   dx = length / n;
   x = a;
   y1 = eval(expression);
   x = a + dx;
   y2 = eval(expression);
   S = (y1 + y2) * dx / 2;

   for(i = 2; i <= n; i++)
   {
      y1 = y2;
      x = x + dx;
      y2 = eval(expression);
      S += (y1 + y2) * dx/2;
   }

   return S;
}

// Константы
var C8 = 76.2;
var C20 = 9.8;
var C22 = 1.5;
var C23 = 0.009982;
var C26 = 0.9;
var C29 = 1;
var C32 = 2;

// Переменные и лимиты
var v1 = {name: "v1", val: null, label: "Текущий внутренний радиус водяного сопла", min: 0.127,
max: 0.2285, ext : "мм"};
var v3 = {name: "v3", val: null, label: "Начальный весовой секундный расход жидкости", min: 0,
max: 0, ext : "л/мин"};
var v4 = {name: "v4", val: null, label: "Начальный весовой секундный расход частиц", min: 0,
max: 0, ext : "г/мин"};
var v5 = {name: "v5", val: null, label: "Начальная скорость струи в сопле", min: 900, max: 1250, ext
: "мм/мин"};
var v14 = {name: "v14", val: null, label: "Концентрация частиц абразива на оси струи", min: 10,
max: 50, ext : "м<sup>-3</sup>"};
var v17 = {name: "v17", val: null, label: "Начальная скорость жидкости", min: 900, max: 1200, ext :
"м/с"};
var v18 = {name: "v18", val: null, label: "Начальная скорость примеси", min: 1, max: 50, ext :
"м/с"};
```

```
var v21 = {name: "v21", val: null, label: "Начальная скорость струи", min: 3, max: 12000, ext : "мм/мин"};
var v24 = {name: "v24", val: null, label: "Расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности", min: 0.5, max: 5, ext : "мм"};
var v27 = {name: "v27", val: null, label: "Средний диаметр частиц абразива", min: 0.075, max: 0.25, ext : "мм"};
var v28 = {name: "v28", val: null, label: "Плотность частиц абразива", min: 0.0041, max: 0.0043, ext : "г/мм<sup>3</sup>"};
var v30 = {name: "v30", val: null, label: "Коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности", min: 1, max: 1.2, ext : ""};
var v31 = {name: "v31", val: null, label: "Предел текучести материала детали", min: 3.569006745, max: 224.337566855, ext : "кг*с/мм<sup>2</sup>"};
var v33 = {name: "v33", val: null, label: "Плотность материала детали", min: 0.0005, max: 0.0193, ext : "г/мм<sup>3</sup>"};
var v45 = {name: 'v45', val: null, label: 'Толщина материала', min: 0.5, max: 300, ext : 'мм'};

// ----------------
var v2 = {name: "v2", val: null, label: "Внутренний радиус смесительной трубки сопла", ext : "мм"};
var v6 = {name: "v6", val: null, label: "Площадь поперечного сечения сопла", ext : "мм<sup>2</sup>"};
var v7 = {name: "v7", val: null, label: "Шаг канавки гидроабразивного сопла", ext : "мм"};
var v9 = {name: "v9", val: null, label: "Площадь струи круглого сечения", ext : "мм<sup>2</sup>"};
var v10 = {name: "v10", val: null, label: "Нормированная координата", ext : ""};
var v11 = {name: "v11", val: null, label: "Коэффициент A<sub>2</sub>", ext : ""};
var v12 = {name: "v12", val: null, label: "Коэффициент B<sub>2</sub>", ext : ""};
var v13 = {name: "v13", val: null, label: "Коэффициент C<sub>2</sub>", ext : ""};
var v15 = {name: "v15", val: null, label: "Коэффициент D<sub>2</sub>", ext : ""};
var v16 = {name: "v16", val: null, label: "Коэффициент E<sub>2</sub>", ext : ""};
var v19 = {name: "v19", val: null, label: "Начальный импульс струи I<sub>0</sub>", ext : "кг*м/с"};
var v25 = {name: "v25", val: null, label: "Подача K", ext : "мм/мин"};
var v34 = {name: "v34", val: null, label: "Скорость гидроабразивной струи круглого сечения V<sub>m</sub>", ext : "мм/мин"};
var v35 = {name: "v35", val: null, label: "Диаметр гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемой детали d<sub>стр</sub>", ext : "мм"};
var v36 = {name: "v36", val: null, label: "Глубина внедрения частицы абразива в материал при гидроабразивной резке h<sub>max</sub>", ext : "мм"};
var v37 = {name: "v37", val: null, label: "Величина съема металла за один удар абразивной частицы q", ext : "мм"};
var v38 = {name: "v38", val: null, label: "Угол наклона нарезаемой канавки tg&alpha;", ext : "&deg;"};
var v39 = {name: "v39", val: null, label: "Число оборотов закручиваемой струи F", ext : ""};
var v40 = {name: "v40", val: null, label: "Глубина нарезаемой канавки G", ext : "мм"};
var v41 = {name: "v41", val: null, label: "Число нарезов n", ext : ""};
var v42 = {name: "v42", val: null, label: "", ext : ""};
var v43 = {name: 'v43', val: null, label: 'Общее количество частиц, пролетающих через поперечный срез сопла n<sub>0</sub>', ext : "};
var v44 = {name: 'v44', val: null, label: 'Количество частиц участвующих в резании n', ext : "};
var v46 = {name: 'v46', val: null, label: 'Подача при сквозном прорезании материала S', ext : 'мм/мин'};
```

```
var v47 = {name: 'v47', val: null, label: 'Давление струи при контакте с заготовкой при прорезании P<sub>к</sub>', ext : 'МПа'};
var v48 = {name: 'v48', val: null, label: 'Сила воздействия струи на обрабатываемый материал F', ext : 'Н'};
var v49 = {name: 'v49', val: null, label: 'Величина шероховатости поверхности после обработки по показателю R<sub>a</sub>', ext : 'мкм'};

//Получаем значения из полей
function set_fields()
{
        var fields_array = ["v3", "v4", "v5", "v14", "v17", "v18", "v21", "v24", "v27", "v28", "v30", "v31", "v33", "v45"];
   var error = 0;
   for(var field_key in fields_array)
   {
                var field_name = fields_array[field_key];
      var field_html = $('#' + field_name);
      var field_value = field_html.val();
      eval("field = " + field_name);
          if( (field_value < field.min || field_value > field.max) || isNaN(parseFloat(field_value)))
      {
         field_html.next().css( "color", "#666" ).html('от ' + field.min + ' до ' + field.max);
                        field_html.removeAttr('disabled');
         error++;
      }
      else
      {
         eval(field_name + "['val'] = " + field_value);
         field_html.next().css( "color", "green" ).html('допустимое значение');
      }
   }
   return error == 0;
}

//Возвращает значение для указанной переменной
function ask_value(f_obj){

   var message = 'Укажите ' + f_obj.label + ' ' + f_obj.min + ' до ' + f_obj.max;
   var value = prompt(message);

   while(value < f_obj.min || value > f_obj.max )
   {
      value = prompt(message);
   }
   return value;
}

//Форматируем вывод
function output_format(field)
{
        return field["label"] + " = " + ( Math.round(field["val"] * 1000) / 1000 ) + field["ext"] + "<br>";
```

```
}

function output_format2(field)
{
        return field["label"] + " = " + Math.round(field["val"]) + field["ext"] + "<br>";
}

//Вывод сообщений
//alert-error и alert-success
function message(message, type){
    $('#message').html('<div class="alert fade in '+ type +'"><button type="button" class="close" data-
dismiss="alert">×</button>'+ message +'</div>');

}//Вывод результата
//alert-success
function result(message){
        $('#result').html('<div class="alert fade in alert-success"><button type="button" class="close"
data-dismiss="alert">×</button>'+ message +'</div>');
}

//ШАГ1 Запрашиваем текущий внутр. радиус
function get_first_value(){
   if(v1['val'] != null)
   {
      return;
   }
   v1['val'] = ask_value(v1);
   var html = $('#'+v1['name']);
   html.val(v1['val']);
   set_limits();
}

//устанавливаем лимиты
function set_limits()
{
        var val = parseFloat(v1['val']);
   if(val >= 0.127 && val < 0.1395)
   {
      v3.min = 1.92;
      v3.max = 2.33;
      v4.min = 270;
      v4.max = 360;
   }
   else if(v1['val'] >= 0.1395 && v1['val'] < 0.165)
   {
      v3.min = 2.33;
      v3.max = 3.25;
      v4.min = 360;
      v4.max = 500;
   }
      else if(v1['val'] >= 0.165 && v1['val'] < 0.178)
      {
```

```
            v3.min = 3.25;
            v3.max = 3.77;
            v4.min = 500;
            v4.max = 800;
        }
            else if(v1['val'] >= 0.178 && v1['val'] <= 0.2285)
            {
                v3.min = 3.77;
                v3.max = 6.23;
                v4.min = 800;
                v4.max = 1100;
            }
}

//ШАГ2
function step2()
{
var temp = v1["val"];

    if(temp >= 0.127 && temp < 0.1395)
    {
        v2["val"] = 0.38;
        v42["val"] = 0.36;
    }
    else if(temp >= 0.1395 && temp < 0.165)
    {
        v2["val"] = 0.455;
        v42["val"] = 0.43;
    }
        else if(temp >= 0.165 && temp < 0.178)
        {
            v2["val"] = 0.51;
            v42["val"] = 0.51;
        }
            else if(temp >= 0.178 && temp <= 0.2285)
            {
                v2["val"] = 0.635;
                v42["val"] = 0.635;
            }
}

//ШАГ3
function step3()
{
            v6["val"] = 1.62 * v2["val"];
}

//ШАГ4
function step4()
{
            v7["val"] = (v5["val"] * Math.pow(v6["val"], 2)) / (332000 * C8);
}
```

```
//ШАГ5
function step5()
{
   v9["val"] = Math.PI + Math.pow(v1["val"], 2);
}

//ШАГ6
function step6()
{
   v10["val"] = v1["val"]/v2["val"];
}

//ШАГ7
function step7()
{
   var result = (1 - Math.pow( v10["val"],1.5) );
   result = v10["val"] * Math.pow(result,4);

   v11["val"] = 2 * integral(result,0,1);
}

//ШАГ8
function step8()
{
   var result = 1 - Math.pow(v10["val"], 1.5);
   result = result * Math.pow(1 - Math.pow(v10["val"], 1.5) , 2) * v10["val"];
   v12["val"] = 2 * integral(result, 0, 1);
}

//ШАГ9
function step9()
{
   var result = 1 - Math.pow(v10["val"], 1.5);
   result = Math.pow(result, 2) * v14["val"] * v10["val"];
   v13["val"] = 2 * v14["val"] * integral(result, 0, 1);
}

//ШАГ10
function step10()
{
   var result = 1 - Math.pow(v10["val"], 1.5);
   result = Math.pow(result, 4) * Math.pow(v10["val"], 3);
   v15["val"] = 2 * integral(result, 0, 1);
}

//ШАГ11
function step11()
{
   var result = 1 - Math.pow(v10["val"], 1.5);
   result = Math.pow(result, 4) * (1 - v10["val"]) * Math.pow(v10["val"], 3);
   v16["val"] = 2 * integral(result, 0, 1);
```

```
}

//ШАГ12
function step12()
{
   v19["val"] = ( ((v3["val"] / C20) * v17["val"])  + ((v4["val"] / C20) * v18["val"]) );
}

//ШАГ13
function step13()
{
   v25["val"] = ( v4["val"] * v21["val"] ) / (v19["val"] * C20);
}

//ШАГ14
function step14()
{
   var result1 = v19["val"] / (C23 / v9["val"]);
   var result2 = v11["val"] + ((Math.pow( C22,2) / Math.pow( v7["val"],2) )) * v15["val"];
   var result3 = v14["val"] * ( v13["val"] + ((Math.pow( C22,2) / Math.pow( v7["val"],2) )) *
v16["val"]);
   var result4 = 1 / (result2 + result3);
   var result = result1 * result4;
   v34["val"] = v21["val"] * Math.pow(result, 0.5);
}

//ШАГ15
function step15()
{
   var result1 = v11["val"] + ((Math.pow( C22,2) / Math.pow( v7["val"],2) )) * v15["val"];
   var result2 = v13["val"] + ((Math.pow( C22,2) / Math.pow( v7["val"],2) )) * v16["val"];
   var result3 = v12["val"] + (0.5 * result1 - result2 ) * v25["val"];
   var result4 = v12["val"] + (v11["val"] - v13["val"]) * v25["val"];
   v35["val"] = 0.44 * (v24["val"] - v2["val"]) * (result3 / result4);
}

//ШАГ16
function step16()
{
   var result1 = (C23 * v19["val"])  /  (3 * C29 * v30["val"] * v31["val"] * v28["val"]   * v9["val"]) ;
   var result2 = v11["val"] + ((Math.pow( C22,2) / Math.pow( v7["val"],2) )) * v15["val"];
   var result3 = v14["val"] * ( v13["val"] + ((Math.pow( C22,2) / Math.pow( v7["val"],2) )) *
v16["val"]);
   var result4 = 1 / (result2 + result3);
   var result5 = Math.sqrt(result1 * result4);
   v36["val"] = Math.pow(C26, 0.5) * v21["val"] * v27["val"] * result5;
}

//ШАГ17
function step17()
{
   var result1 = (C23 * v19["val"])  /  (3  * v30["val"] * v31["val"] * v28["val"]   * v9["val"]) ;
```

```
   var result2 = v11["val"] + ((Math.pow( C22,2) / Math.pow( v7["val"],2) )) * v15["val"];
   var result3 = v14["val"] * ( v13["val"] + ((Math.pow( C22,2) / Math.pow( v7["val"],2) )) *
v16["val"]);
   var result4 = 1 / (result2 + result3);
   var result5 = Math.sqrt(result1 * result4);
   var result6 = Math.pow(C26, 0.5) * v21["val"] * result5;
   var result7 = Math.pow(result6, 2.5);
   v37["val"]  = 1.9 * C32 * (Math.pow(v27["val"], 3) / Math.pow(C29, 3/4)) * result7 * v33["val"];
}

//ШАГ18
function step18() //
{
   v38["val"]  = (Math.PI * 2 * v2["val"]) / v7["val"];
}

//ШАГ19
function step19() //
{
   v39["val"]  = v5["val"] / v7["val"];
}

//ШАГ20
function step20() //
{
   v40["val"]  = ((1 / 50) + (1/70)) * 2 * v2["val"];
}

//ШАГ21
function step21() //
{
   v41["val"]  = (4 * Math.PI * v2["val"]) / (3 * v42["val"]);
}

//ШАГ22
function step22() //Общее количество частиц, пролетающих через поперечный срез сопла
{
   v43['val']  = v4['val'] / (0.2 * v28['val']);
}

//ШАГ23
function step23() //Количество частиц, участвующих в резании
{
   var r1 = 0.5 * Math.PI * ((Math.pow((v35['val'] / 2), 2) - Math.pow((v2['val']), 2)));
   var r2 = Math.pow((v35['val'] / 2), 2) * ( Math.acos(1 - (v27['val'] / (v35['val'] / 2))) -
Math.sin(Math.acos(1 - (v27['val'] / (v35['val'] / 2)))));
   var r3 = Math.PI * Math.pow((v35['val'] / 2), 2);
   v44['val'] = Math.abs(((r1 + r2 ) / r3) * v43['val']);
}

//ШАГ24
function step24() //Подача при сквозном прорезании материала
```

```
{
   var r1 = v36['val'] * v44['val'];
   var r2 = 2 * v45['val'] * (v35['val'] / 2);
   v46['val'] = r1 / r2;
}

//ШАГ25
function step25() //Давление струи при контакте с заготовкой при прорезании P
{
   var r1 = 1.27*1000*v46['val'] * v34['val'];
   var r2 = Math.pow((v35['val'] / 2), 2);
   v47['val'] = r1 / r2;
}

//ШАГ26
function step26() //Сила воздействия струи на обрабатываемый материал F
{
   var r1 = Math.pow((v47['val']/100),1.15);
   var r2 = Math.pow((v35['val'] / 2), 1.75);
   v48['val'] = 120*r1*r2;
}

//ШАГ27
function step27() // Величина шероховатости поверхности после обработки по показателю Ra
{
   var r1 = Math.sqrt((v36['val']*v9['val'])/v44['val']);
   v49['val'] = 0.13*r1;
}
$("#calculate").click(
   function(){
      //получаем значения переменных из полей
                  get_first_value();

                  //set_fields();


      if(!set_fields()){
                  message("Заполните все поля значениями из указанного диапазона", "alert");
                  return false;
            }
      step2();
      step3();
      step4();
      step5();
      step6();
      step7();
      step8();
      step9();
      step10();
      step11();
      step12();
      step13();
```

```
  step14();
  step15();
  step16();
  step17();
  step18();
  step19();
  step20();
  step21();
  step22();
  step23();
  step24();
  step25();
  step26();
  step27();

   result('<p>' +
            output_format(v2) +
            output_format(v6) +
            output_format(v7) +
            output_format(v9) +
            output_format(v10) +
            output_format(v11) +
            output_format(v12) +
            output_format(v13) +
            output_format(v15) +
            output_format(v16) +
            output_format(v19) +
            output_format(v25) +
            output_format(v38) +
            output_format(v39) +
            output_format(v40) +
            output_format(v41)+
             '<b><center>'+'Параметры резания:'+'</center></b><br>'+
            "<b>" + output_format(v34) + "</b>" +
            "<b>" + output_format(v35) + "</b>" +
            "<b>" + output_format(v36) + "</b>" +
            "<b>" + output_format(v37) + "</b>" +
            '<b>' + output_format(v43) + '</b>' +
            '<b>' + output_format(v44) + '</b>' +
            '<b>' + output_format(v46) + '</b>' +
            '<b>' + output_format(v47) + '</b>' +
            '<b>' + output_format(v48) + '</b>' +
            '<b>' + output_format(v49) + '</b>' +
            '<p>'
                                        );
  return false;
});
```

П.4. Инструкция пользователя по эксплуатации цифрового советника

П.4.1. Общие сведения

Разработанное программное обеспечение представляет информационную систему по поддержке принятия решения (цифровой советник) по определению рациональных параметров процесса гидроабразивного резания с закручиванием струи рабочей жидкости для прогнозирования и организации технологического процесса при обработке различных материалов включающий ввод и корректировку технологических параметров обработки, моделирование процесса резания, генерацию и отображение информационного блока о результатах моделирования процесса резания. Данная технология позволит сэкономить затраты на электроэнергии и покупке расходных материалов за счет проведения имитационного моделирования процесса гидроабразивного резания.

Потенциальными потребителями могут быть промышленные предприятия, технологический процесс которых предполагает использование технологии гидроабразивной резки. Кроме того, планируемая коммерческая перспектива использования программного продукта заключается в реализации в Российской Федерации, а также в оказании сервисных услуг по его сопровождению. Предлагаемая разработка найдет применение в автоматизированных машиностроительных предприятиях оборонно-промышленного комплекса, также потенциальными потребителями продукции могут быть сферы обрабатывающих производств (машиностроение, химическая, авиационная промышленность и др.), где предъявляются высокие требования к прецизионности. Кроме того, разрабатываемый программный продукт целесообразно использовать в учебных целях при подготовке специалистов в области IT-технологий и машиностроения, а именно в НИИ, ВУЗах. К дополнительным рынкам, можно отнести точную механику, механотронику, производство измерительной техники, систем управления, авиакосмическую промышленность, а также медицину, стоматологию и биотехнологии

При разработке программного комплекса использовались система аналитических уравнений процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости в сочетании с методами объектно-ориентированного и структурного программирования, что позволило расширить возможности интенсификации технологического процесса резки.

Главным преимуществом, а именно инновационной составляющей будет являться процедура по выбору параметров резки при различных технологических ситуациях с применением автоматического расчета по режимам резки и функцией корректировки по технологическим параметрам гидроабразивной струи, а также ввода физико-механических характеристик заготовки.

П.4.2. Структура программного обеспечения

Архитектура разработанного программного комплекса представляет собой модульное приложение, в состав которого входят следующие модули: модуль ввода исходных данных, модуль визуального редактирования (графический пользовательский интерфейс), модуль моделирования, модуль генерации и отображения отчетов.

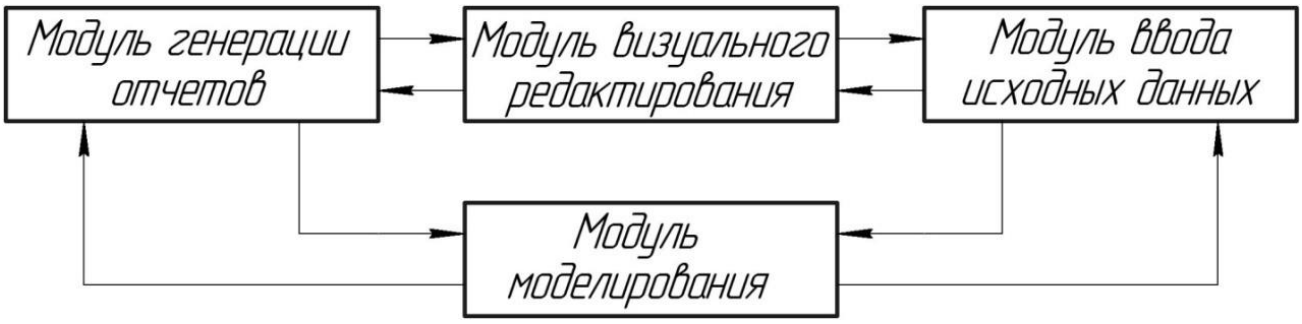


Рисунок П.4.1. Структурная схема программного продукта

П.4.3. Функции частей программного обеспечения

Блочная схема алгоритма программного продукта представлена на рисунке П.4.2.

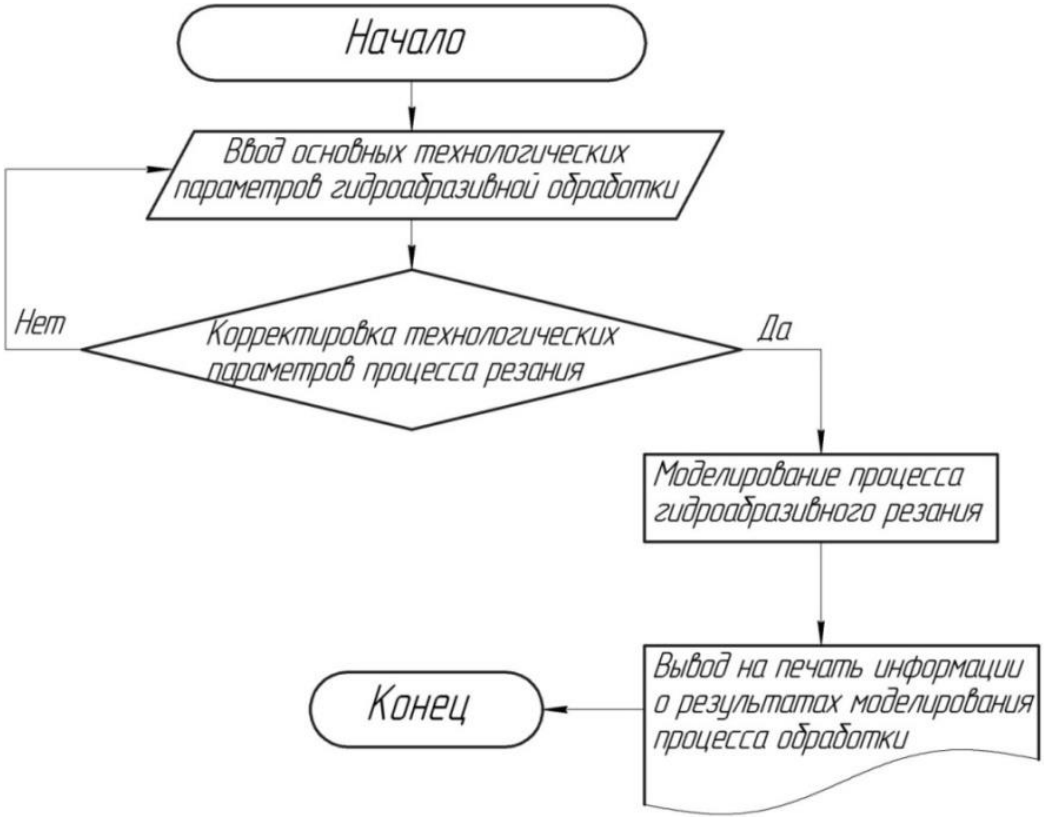


Рисунок П. 4.2. Блок-схема алгоритма программного продукта

1) Модуль ввода исходных данных обеспечивает возможность импорта (ввода) основных технологических параметров гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости.

2) Модуль визуального редактирования обеспечивает прием данных, проверку ограничений на вводимые данные, обработку управляющей информации, доступ к отображению отчетов построен по типу трехуровневой архитектуры.

3) Модуль моделирования выполняет реализацию алгоритма в основании, которого положены системы аналитических уравнений, отображающие процесс гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости.

4) Модуль генерации и отображения отчетов предназначен для предоставления информационного блока, отображающего выходные результаты процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости.

Программный продукт будет обеспечивать выполнение следующих функций: подбор внутреннего радиуса смесительной трубки сопла, расчет начального импульса, подачи и скорости струи, расчет диаметра гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемой детали, определение величины съема металла за один удар абразивной частицы, расчет общего количества частиц, пролетающих через поперечный срез гидроабразивного сопла и количества частиц участвующих в процессе резания, подачи при сквозном прорезании материала, давления струи при контактировании в процессе разрезания заготовки, силы воздействия струи на обрабатываемый материал и величины шероховатости поверхности после обработки по показателю, корректировку и ввод физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Основные техническими входными параметрами программного комплекса с возможностью корректировки и ввода являются:

- текущий внутренний радиус водяного сопла r (от 0,127 до 0,2285 мм);
- начальный весовой секундный расход жидкости Q_1 (от 1,92 до 6,23 л/мин);
- начальный весовой секундный расход абразива Q_2 (от 270 до 1100 г/мин);
- начальная скорость струи в сопле V_0 (от 900 до 1250 мм/мин);
- концентрация частиц абразива на оси струи φ_m (от 10 до 50 обрат. куб. м);
- начальная скорость жидкости V_1 (от 900 до. 1200 м/с);
- начальная скорость примеси V_2 (от 1до 50 м/с);
- начальная скорость струи V (от 3 до 12000 мм/мин);
- расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности H (от 0,5 до 5 мм);
- средний диаметр частиц абразива d (от 0.075 до 0.25 мм);
- плотность частиц абразива ρ_2 (от 0.0041 до 0.0043 г / куб. мм);
- коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности k (от 1 до 1,2);
- толщина обрабатываемого материла B (от 0,5 до 300 мм);
- предел текучести материала детали σs (МПа);
- плотность материала детали ρ_∂ (кг / куб. мм);

П.4.4. Методы и средства разработки программного обеспечения

При разработке цифрового советника были использованы следующие инструментальные средства: платформа Java, среда разработки NetBeans 6.8, язык программирования - Java.

П.4.5. Операционная система

Для программного обеспечения могут быть использованы следующие операционные системы:

- Microsoft Windows 2000;
- Microsoft Windows XP;
- Microsoft Windows Vista;
- Microsoft Windows 7;
- Microsoft Windows 8.1;
- Microsoft Windows 10.

П.4.6. Средства, расширяющие возможности операционной системы

В состав программного комплекса не входят средства, расширяющие возможности операционной системы.

П.4.7. Требования по эргономике и технической эстетике

Взаимодействие пользователей с прикладным программным обеспечением, входящим в состав системы должно осуществляться посредством визуального графического интерфейса (GUI). Интерфейс системы должен быть понятным и удобным, не должен быть перегружен графическими элементами и должен обеспечивать быстрое отображение экранных форм. Навигационные элементы должны быть выполнены в удобной для пользователя форме. Средства редактирования информации должны удовлетворять принятым соглашениям в части использования функциональных клавиш, режимов работы, поиска, использования оконной системы. Ввод-вывод данных системы, прием управляющих команд и отображение результатов их исполнения должны

выполняться в интерактивном режиме. Интерфейс должен соответствовать современным эргономическим требованиям и обеспечивать удобный доступ к основным функциям и операциям системы.

Интерфейс должен быть рассчитан на преимущественное использование манипулятора типа «мышь», то есть управление системой должно осуществляться с помощью набора экранных меню, кнопок, значков и т. п. элементов. Клавиатурный режим ввода должен используется главным образом при заполнении или редактировании текстовых и числовых полей экранных форм.

Система должна обеспечивать корректную обработку аварийных ситуаций, вызванных неверными действиями пользователей, неверным форматом или недопустимыми значениями входных данных. В указанных случаях система должна выдавать пользователю соответствующие сообщения, после чего возвращаться в рабочее состояние, предшествовавшее неверной (недопустимой) команде или некорректному вводу данных.

П.4.8. Требования к лингвистическому обеспечению

Всё прикладное программное обеспечение системы для организации взаимодействия с пользователем использует русский язык.

П.4.9. Требования к защите информации от несанкционированного доступа

Информация, размещаемая в рамках Системы, является закрытой. Характер сведений и их количество должны соответствовать Постановлению Правительства Российской Федерации "О защите персональных данных" № 266-ФЗ от 27 февраля 2009 г.

П.4.10. Требования к надежности

Требования к обеспечению надежного функционирования программы

Надежное (устойчивое) функционирование программного комплекса должно быть обеспечено выполнением совокупности организационно-технических мероприятий, перечень которых приведен ниже:

- организацией бесперебойного питания технических средств;
- использованием лицензионного программного обеспечения;
- регулярным выполнением рекомендаций Министерства труда и социального развития РФ, изложенных в Постановлении от 23 июля 1998 г. Об утверждении межотраслевых типовых норм времени на работы по сервисному обслуживанию ПЭВМ и оргтехники и сопровождению программных средств»;
- регулярным выполнением требований ГОСТ 51188-98. Защита информации. Испытания программных средств на наличие компьютерных вирусов.

Время восстановления после отказа

Время восстановления после отказа, вызванного сбоем электропитания технических средств (иными внешними факторами), не фатальным сбоем (не крахом) операционной системы, не должно превышать 30-ти минут при условии соблюдения условий эксплуатации технических и программных средств.

Время восстановления после отказа, вызванного неисправностью технических средств, фатальным сбоем (крахом) операционной системы, не должно превышать времени, требуемого на устранение неисправностей технических средств и переустановки программных средств.

Отказы из-за некорректных действий пользователей системы

Отказы из-за некорректных действий пользователей системы при взаимодействии с программой через веб-интерфейс недопустимы.

П.4.11. Условия эксплуатации

Климатические условия эксплуатации

Климатические условия эксплуатации, при которых должны обеспечиваться заданные характеристики, должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к техническим средствам в части условий их эксплуатации.

Требования к квалификации и численности персонала

Минимальное количество персонала, требуемого для работы программного комплекса должно составлять не менее 2 штатных единиц - системный администратор и конечный пользователь программы - оператор.

Системный администратор должен иметь высшее профильное образование и сертификаты:

- сертифицированный администратор баз данных Microsoft (MCDBA),
- сертифицированный системный администратор Microsoft (MCSA).

В перечень задач, выполняемых системным администратором, должны входить:

- задача поддержания работоспособности технических средств;
- задачи установки (инсталляции) и поддержания работоспособности системных программных средств - операционной системы;
- задача установки (инсталляции) программного обеспечения;
- задача создания резервных копий базы данных.

Оператор должен иметь высшее профильное образование в области обработки металлов и сертификат оператора станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и технолога – программиста.

В перечень задач, выполняемых оператором, должны входить:

- настройка оборудования, плановое техническое обслуживание станка;
- моделирование всех элементов резки или иной обработки в компьютерной программе;
- создание УП (управляющая программа, в которой прописан весь рабочий цикл);
- тестирование новой управляющей программы или элементов станка на предмет отклонения в траектории маршрута инструмента, вибрации, качества заточки и т. д.;
- проверка качества полученных заготовок и их соответствие техническому заданию.

Требования к составу и параметрам технических средств

В состав технических средств должен входить IBM-совместимый персональный компьютер (ПЭВМ), необходимый для внедрения разработанной системы, включающий следующие минимальные параметры:

- процессор Intel Celeron, 2x2900 МГц;
- ОЗУ не менее 4 Гб;
- жесткий диск 250 Гб;
- операционная система Windows XP с пакетом Net.Framework 4;
- монитор - диагональ не менее 15”;
- встроенная видеокарта
- клавиатура - не менее 104 клавиш (русифицированная) (USB-интерфейс);
- координатно-указательное устройство - манипулятор типа «мышь» (USB-интерфейс);
- источник бесперебойного питания;
- сетевой адаптер - 100 Мбит;
- видеосистема - разрешающая способность не ниже 1024x768 точек;
- высокоскоростной порт USB 2.0;
- устройство чтения компакт-дисков (DVD-ROM);
- источник бесперебойного питания.

П.4.12. Порядок работы

При первом запуске программы перед пользователем открывается главная форма цифрового советника, представленная на рисунке П.4.3, на которой расположено основное меню и панель для просмотра результатов вычислений.

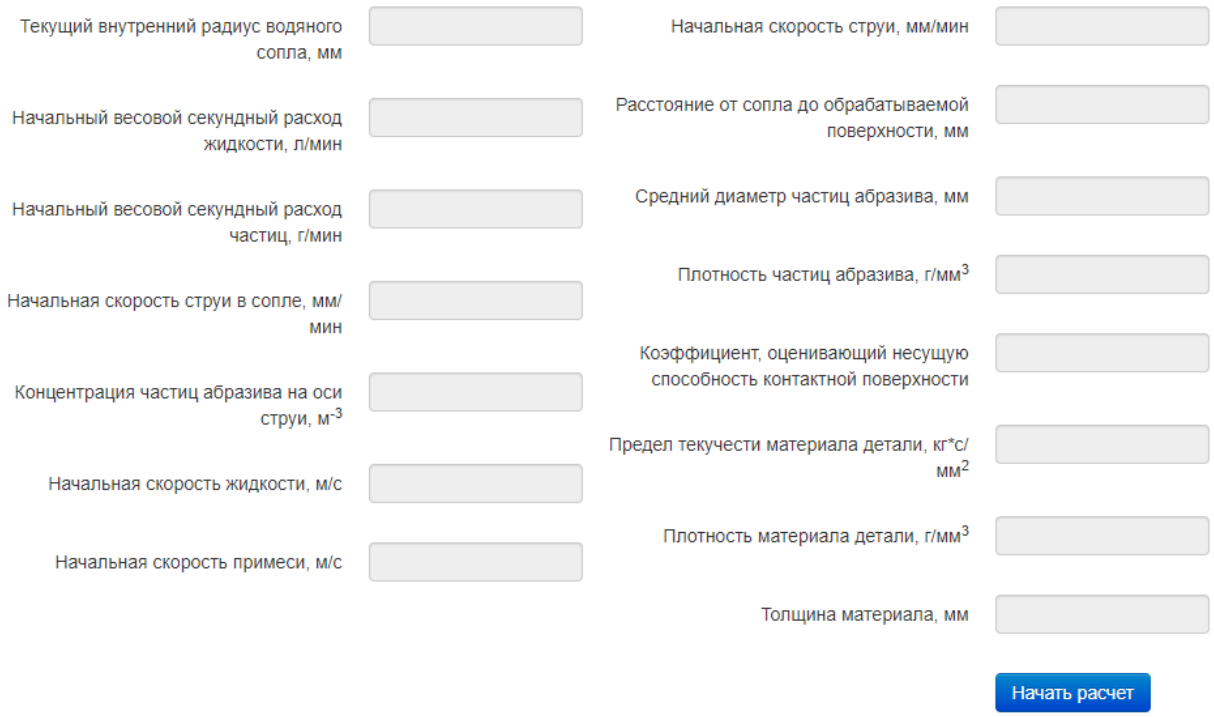


Рисунок П.4.3. Главная форма программного комплекса

При нажатии на кнопку «Начать расчет», появляется диалоговое окно, представленное на рисунке П.4.4, в которое вводиться текущий внутренний радиус водяного сопла в диапазоне $r = 0{,}127 \ldots 0{,}2285$ *мм*, после чего нужно нажать кнопку «ОК».

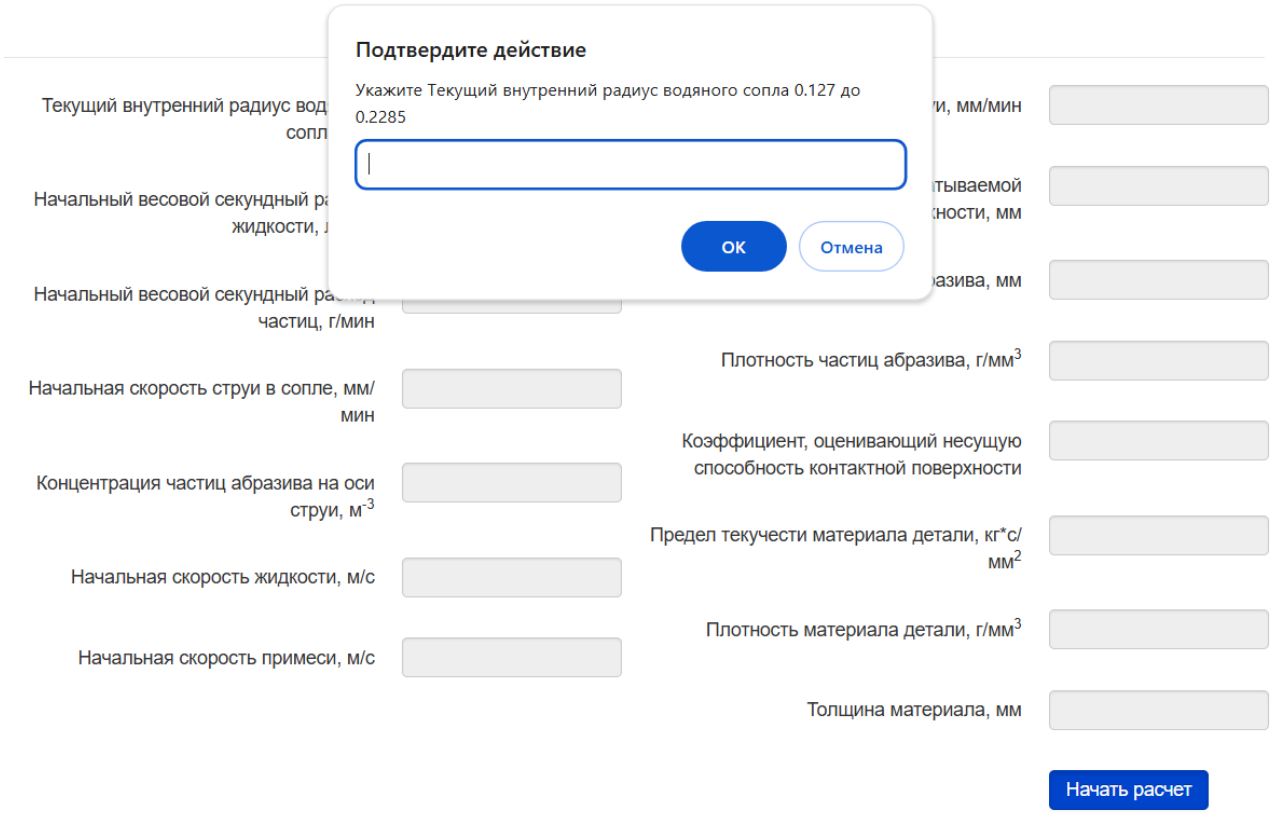


Рисунок П.4.4. Ввод в программный комплекс значения текущего внутреннего радиуса водяного сопла r

При выборе значения текущего внутреннего радиуса водяного сопла появляется сообщение «Заполните все поля значениями из указанного диапазона», показанное на рисунке П.4.5, после чего пользователь производит закладывание исходных данных - основные технологические параметры гидроабразивной обработки: текущий внутренний радиус водяного сопла r, начальный весовой секундный расход жидкости Q_1, начальный весовой секундный расход абразива Q_2, начальная скорость струи в сопле υ_0, концентрация частиц абразива на оси струи φ_m, начальная скорость жидкости υ_1, начальная скорость примеси υ_2, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности H, средний диаметр абразивных частиц d, плотность частиц абразива ρ_2, коэффициент несущей способности контактной поверхности, предел текучести материала детали σ_s, плотность материала детали $\rho_д$, толщина обрабатываемого материала B.

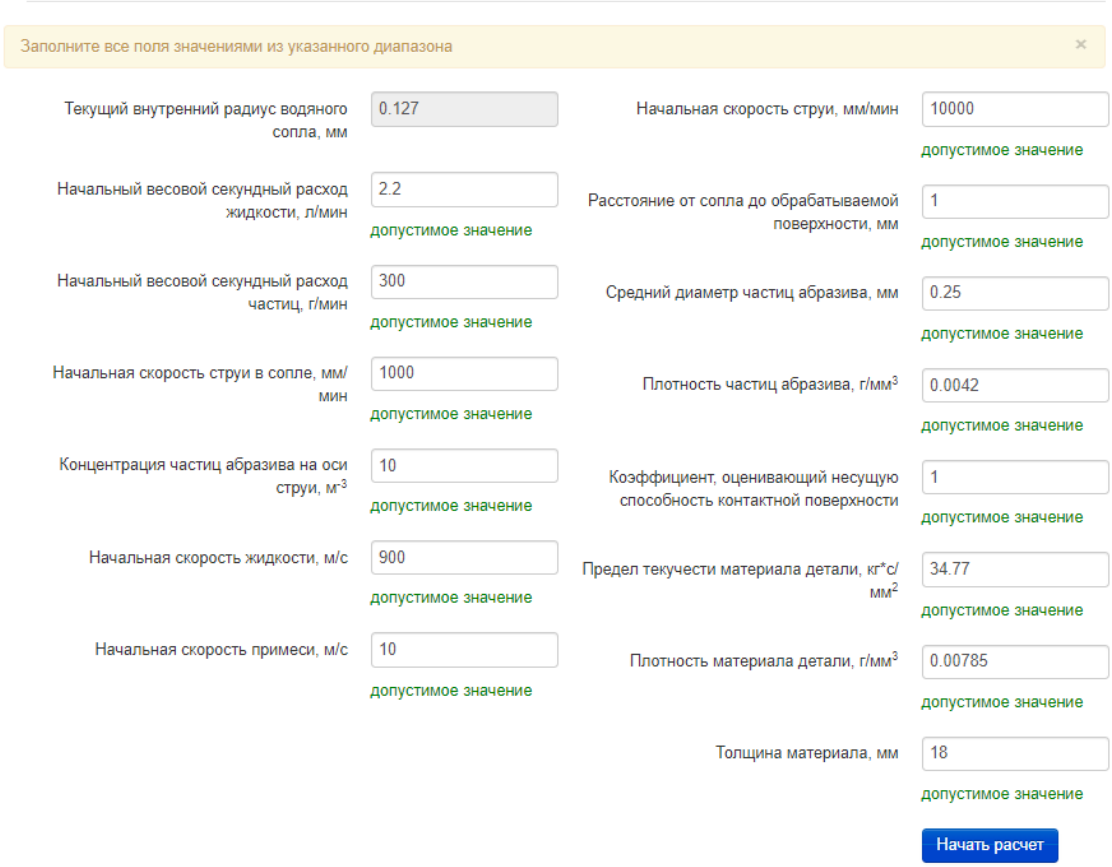
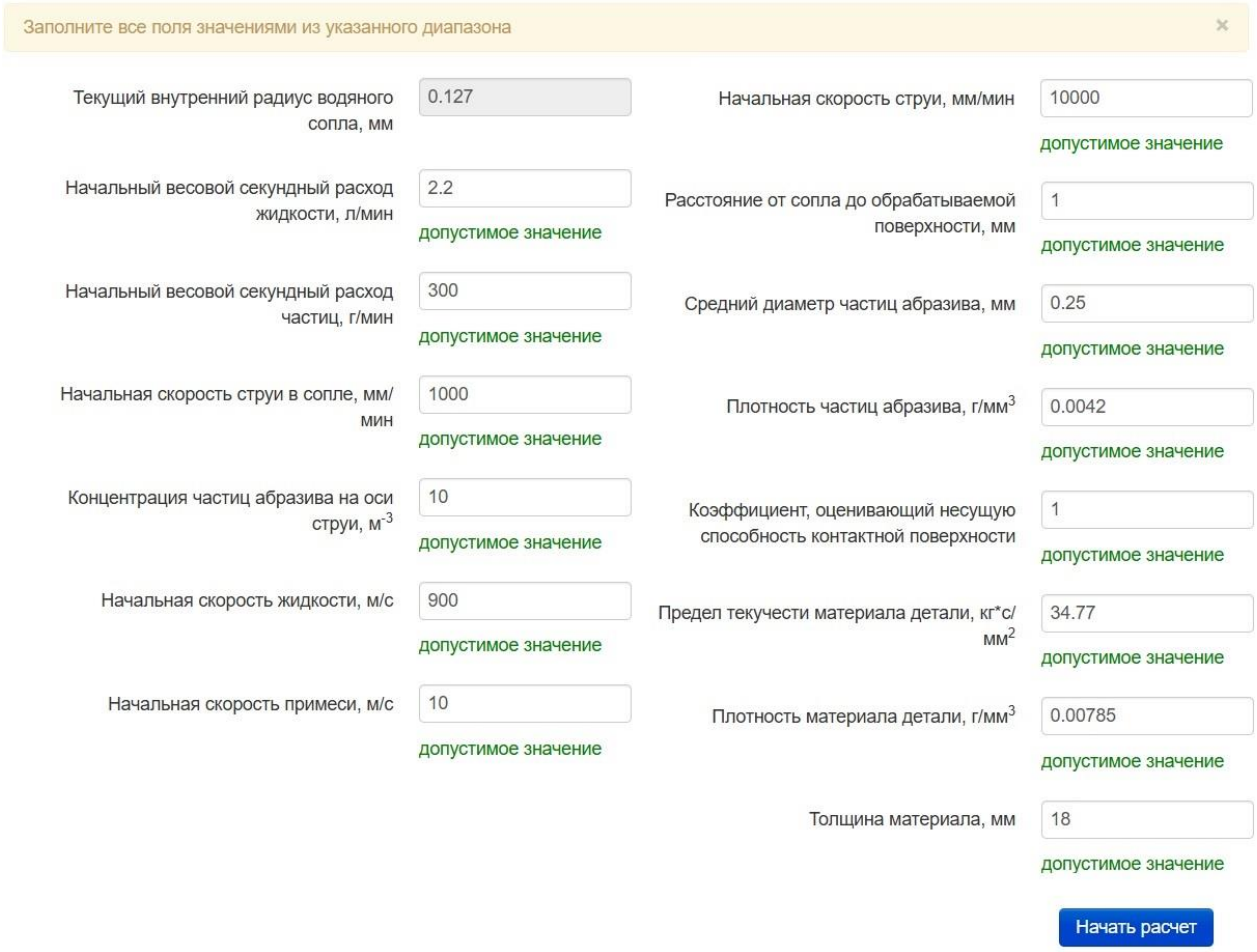


Рисунок П.4.5. Ввод исходных данных в программном комплексе

При некорректных действиях пользователя, неверных форматах или ввода недопустимых значений входных данных, система выдаст пользователю соответствующие сообщения с описанием ошибки, после этого она возвратиться в исходное рабочее состояние, которое предшествовало неверной (недопустимой) команде или некорректному вводу данных, а именно отобразится ячейка ввода исходного значения параметра с указанием диапазона варьирования. При вводе значения параметра и повторном нажатии кнопки «Начать расчет» под ячейкой появляется надпись: «Допустимое значение». В случае некорректного ввода производиться повторная процедура, описанная выше.



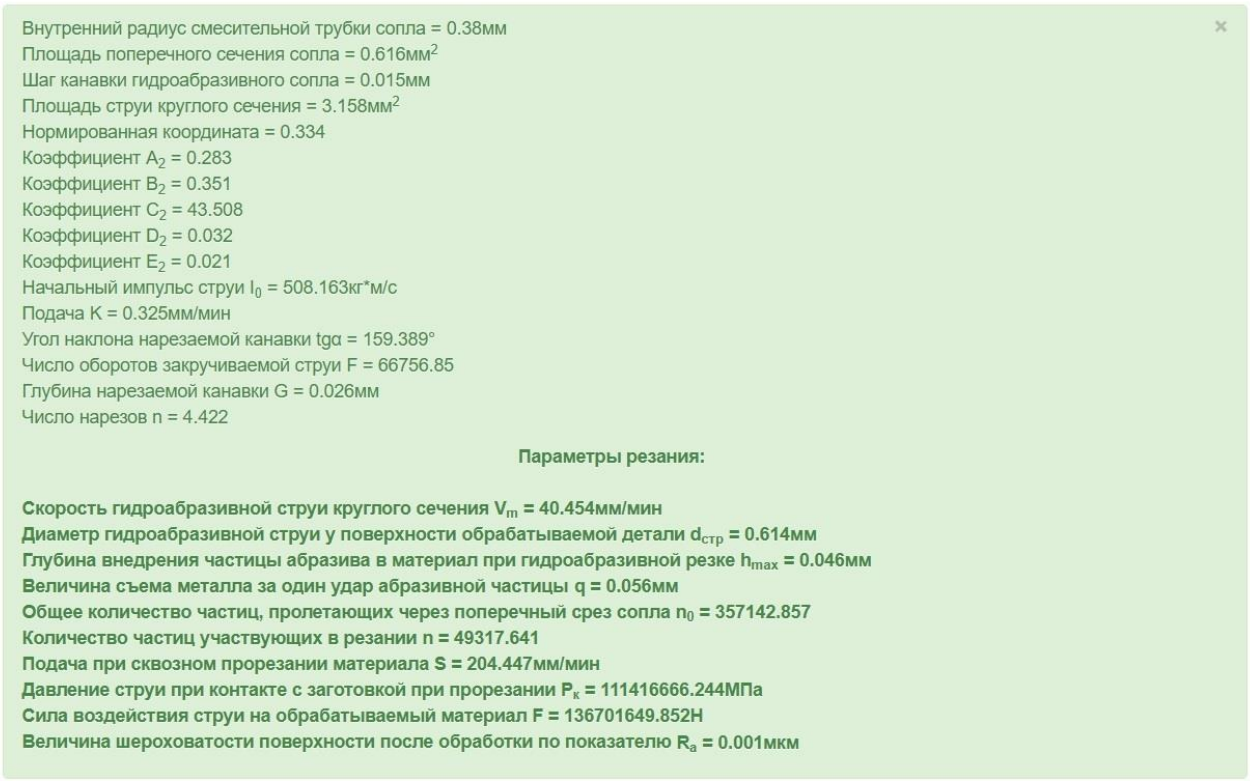


Рисунок П.4.6. Отчет о результатах моделирования в программном комплексе

При нажатии кнопки «Начать расчет» осуществляется процесс расчета параметров процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости. После проведения вычислений пользователю предоставляется доступная форма результатов, представленная на рисунке П.4.6, на которой предоставляется информация о результатах моделирования процесса гидроабразивного резания, а именно промежуточные выходные данные: внутренний радиус смесительной трубки сопла R, площадь поперечного сечения сопла S, площадь струи круглого сечения F, нормированная координата ξ, коэффициенты A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, начальный импульс струи I_0, подача κ, угол наклона нарезаемой канавки α, число оборотов закручиваемой струи f, глубина нарезаемой канавки G, число нарезов n; основные: скорость гидроабразивной струи круглого сечения υ_m, диаметр гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемого материала детали $d_{стр}$, глубина внедрения абразивной частицы в обрабатываемый материал детали $h_{\max}$, величина съема обрабатываемого материла детали за один удар абразивного зерна q, общее количество частиц, пролетающих через поперечный срез гидроабразивного сопла n_0, количество частиц участвующих в процессе резания n, подача при сквозном прорезании материала S, давление струи при контакте с заготовкой при прорезании P_K, сила воздействия струи на обрабатываемый материал F, величина шероховатости поверхности после обработки по показателю R_a, что позволяет возможность пользователю более подробно изучать результаты имитационных вычислений процесса гидроабразивного резания с закручиванием струи рабочей жидкости.

В программном комплексе существует возможность корректировки технологических параметров гидроабразивной обработки с возможностью продолжения расчета при повторном нажатии кнопки «Начать расчет».

Полученный результат моделирования процесса гидроабразивного резания в виде массива данных может использоваться пользователем для дальнейшей обработки, передачи по цифровым каналам, сохранению на цифровой носитель.