

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

Иванов Виктор Викторович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ С  
ЗАКРУЧИВАНИЕМ СТРУИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ**

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

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва – 2024

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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. Исследованиями в области управления процессом гидроабразивной резки занимались: Г.В. Барсуков, А.А. Барзов, Р.А. Тихомиров, М.К. Решетников, В.В. Шпилев, И. И. Шапиро, Н.Н. Береда и другие.

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 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 зёрнами для метода гидроабразивной резки с дополнительным колебательным движением (осцилляцией) 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 обеспечено 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 (осцилляцией) 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 5 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); 74-е Дни науки студентов НИТУ «МИСиС» международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции» (Москва, 2019); «Юность и Знания - Гарантия Успеха – 2019» (Курск, 2019); на 3 Всероссийских научно-практических конференциях: «Современные инновации в науке и технике » (Курск, 2020); «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2019); «Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (Трансэнергоком-2018)» (Саратов, 2018); 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится актуальность исследуемой тематики, сформулирована цель и задачи исследования, кратко отражено описание по каждой главе исследования, указана научная новизна и практическая ценность исследования, отражены научные положения, выносимые на защиту, а также основные выводы и результаты работы.

**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.

Научными исследованиями в области системы управления процессом гидроабразивной резки представлены в работах зарубежных и отечественных исследователей: В.С. Гуенко, Г.В. Барсуков, В.А. Шманев, А.А. Барзов, Р.А. Тихомиров, М. Hashish, М. Ramulu, S. N. Guo, G. Fowler и других. Ученые в исследуемых системах предлагают прикладные модели, которые позволяют рассчитывать и управлять отдельными техническими характеристиками процесса гидроабразивной резки: скорость абразивных частиц, способы повышения эффективности обработки, оптимальный сьем и вынос срезанного материала из зоны резания с помощью управления основными параметрами резки. 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 центробежных 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 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.

**Во второй главе** представлены результаты разработки 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.

Решение задачи по повышению режущих параметров гидроабразивной резки предполагает расчет параметров резки с построением интенсифицированного технологического процесса резки. В основе решения данной задачи использовался способ закрутки гидроабразивной струи путем нарезания канавки в гидроабразивном сопле (рис. 1).

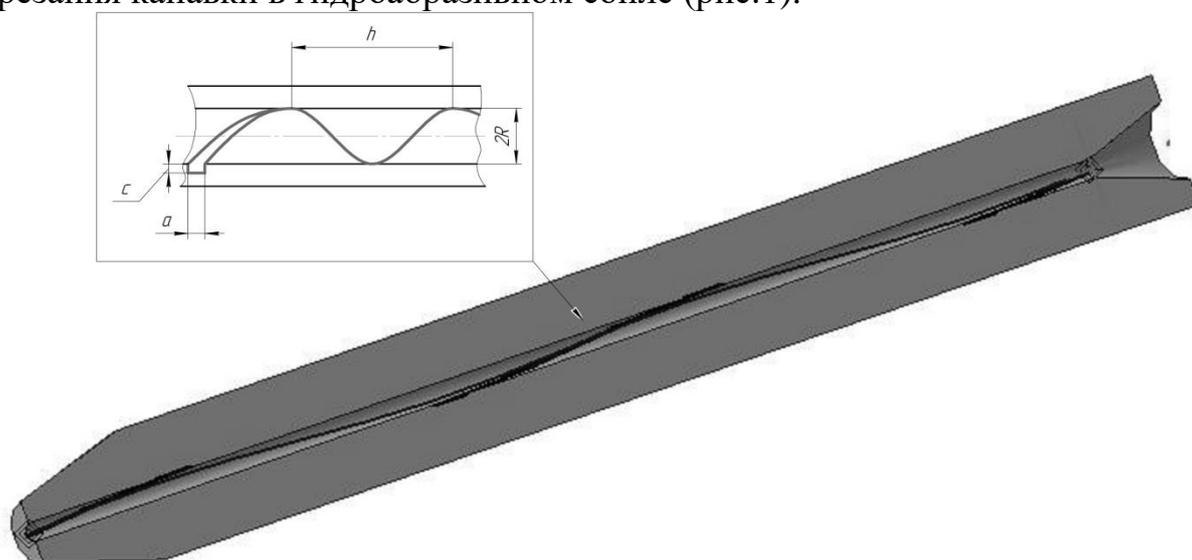


Рисунок 1. 3D –модель гидроабразивного сопла с канавкой в продольном разрезе:  $d$  - диаметр сопла,  $R$  - внутренний радиус смесительной трубки сопла,  $a$  - ширина канавки,  $h$  - шаг спиралеобразной канавки сопла,  $c$  - глубина канавки

Для 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 и способа закрутки гидроабразивной струи с исследованиями Тихонова А.А. про глубину внедрения абразивных зерен в обрабатываемую поверхность заготовки, получим:

$$h_{\max} = 2k_m^{0.5} v_m R_{abr} \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_2}{3k_d c \sigma_s}}, \quad (1)$$

где  $h_{max}$  – максимальная глубина внедрения зерна,  $\rho_2$  – плотность материала частицы,  $R_{абр}$  – радиус частицы,  $\beta$  – значение угла между обрабатываемой поверхностью и гидроабразивным соплом,  $k_d$  – коэффициент влияния шероховатости заготовки на площадь контакта,  $v_m$  – скорость закрученной гидроабразивной струи,  $k_m$  – коэффициент влияния соседних зерен при резании,  $\sigma_s$  – предел текучести заготовки,  $c$  – коэффициент несущей способности заготовки.

$$v_m = v_0 \left( \frac{I_0}{\rho_1 F} \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left( C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$F = \pi \cdot r^2, \quad (3)$$

где  $v_0$  – начальная скорость струи;  $\rho_1$  – плотность жидкости;  $h$  – шаг спиральной канавки;  $\varphi_m$  – уровень концентрации абразивных зерен на оси струи;  $k$  – поправочный коэффициент;  $F$  – площадь струи круглого сечения;  $r$  – внутренний радиус гидроабразивного сопла;  $I_0$  – импульс струи,  $A_2$ ,  $C_2$ ,  $D_2$ ,  $E_2$  – коэффициенты

$$I_0 = \frac{Q_1}{g} v_1 + \frac{Q_2}{g} v_2, \quad (4)$$

где  $Q_1$  – начальный весовой секундный расход жидкости;  $Q_2$  – начальный весовой секундный расход частиц;  $g$  – ускорение свободного падения;  $v_1$ ,  $v_2$  – начальная скорость жидкости и примеси.

При разработке аналитических зависимостей процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости впервые были получены уравнения глубины внедрения абразивного зерна в материал и величины съема обрабатываемого материала за один удар абразивного зерна, которые до этого не были выведены авторами данного способа.

Для улучшения математической модели процесса гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости на основе усталостного выкрашивания абразивных частиц с обрабатываемой заготовкой была вычислена величина 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 нарезками (выступы) называются полями. Боковые стенки нарезков – гранями, которые заставляют струю вращаться. Нарезы характеризуются следующими параметрами: формой, шагом, глубиной и углом наклона нарезки; шириной и числом нарезков; шириной полей (рис. 2). Для определения шага спиральной канавки использовалась теория баллистики, а именно длина нарезаемой

части сопла использует начальную скорость струи с учетом перемещения рабочей жидкости в канале сопла:

$$h = \frac{v_{01} \cdot S^2}{332000 \cdot l}, \quad (5)$$

где  $v_{01}$  - начальная скорость струи в смесительной трубке сопла;  $S$  - площадь поперечного сечения сопла;  $l$  - длина сопла.

Процесс гидроабразивной резки в большинстве случаев выполняется при значении угла между поверхностью заготовки и гидроабразивным соплом  $\beta=90^\circ$ .

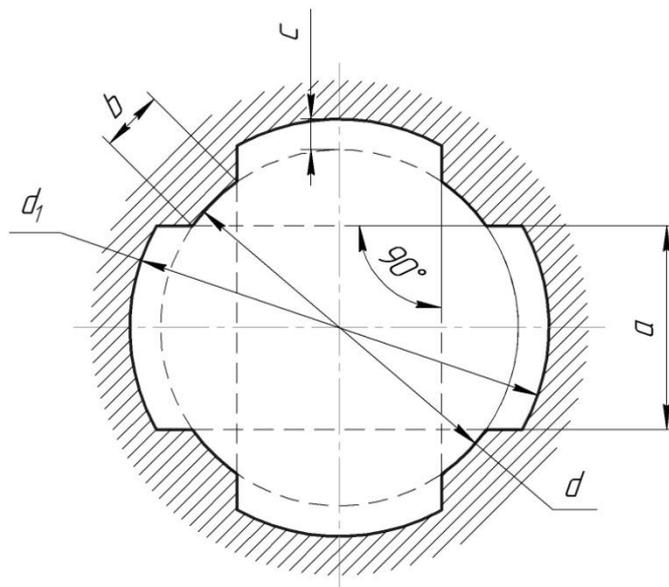


Рисунок 2. Поперечный разрез смесительной трубки сопла:  $a$  - ширина нареза,  $b$  - ширина поля нареза,  $c$  - глубина нареза,  $d$  - диаметр сопла,  $d_1$  - диаметр сопла по нарезам

Используя математическую подстановку выражений (2) и (5) в выражение (1), после преобразований получим зависимость глубины внедрения абразивного зерна в заготовку:

$$h_{\max} = k_m^{0.5} v_0 d \sqrt{\frac{\rho_1}{3k_d c \sigma_s} \cdot \frac{I_0}{\rho_2 F} \cdot \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left( C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)}}, \quad (6)$$

где  $d$  - среднее значение диаметра абразивного зерна,  $\rho_2$  - плотность абразивного зерна.

Съем металла за один удар абразивного зерна:

$$q = 1.9 k_c \frac{d^3}{k_d^{3/4}} \left( k_m^{0.5} v_0 \sqrt{\frac{\rho_1}{3c \sigma_s} \cdot \frac{I_0}{\rho_2 F} \cdot \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left( C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)}} \right)^{5/2} \cdot \rho_0, \quad (7)$$

где  $k_c$  - коэффициент стружкообразования,  $\rho_0$  - плотность материала заготовки.

Полученные итоговые технологические параметры в уравнениях (6) и (7) 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.

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

Исследовано влияние технологических параметров обработки на шероховатость поверхности реза, а также описан механизм формирования зоны волнистого и гладкого резов и получена теоретическая модель формирования шероховатости поверхности реза в зависимости от технологических параметров гидроабразивной резки.

Для решения проблемы усталостного выкрашивания частиц при способе гидроабразивной резки было предложено интенсифицировать процесс резки за счет осуществления осцилляции струи в направлении, перпендикулярном подаче струйной головки путем сообщения струйному соплу колебательного движения, которое имеет 2 этапа:

- формирование микропрофиля поверхности заготовки путем контактирования абразивных зёрен с обрабатываемой поверхностью заготовки с учетом обусловленной кинематики и динамики присущих процессу гидроабразивной резки;
- формирование субмикронеровностей микропрофиля поверхности заготовки за счет контакта абразивных зёрен на сформированный микропрофиль путем скольжения относительно этой поверхности, выполняя эффективное резание-царапание.

Данный способ был запатентован и получен объект интеллектуальной собственности (Патент №2688007 Способ гидроабразивной обработки с осцилляцией струи). Разработанный способ был совмещён с моделью формирования устойчивого профиля шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки с учетом неполных резов металла абразивными зёрнами, 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.

**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.

Разработанные аналитические зависимости, представленные во второй главе исследования, использовались для разработки программного обеспечения по поддержке принятия решения (цифрового советника) системы управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости.

При разработке программного комплекса была составлена блок-схема и структурная схема разработанного программного продукта, которые представлены на рисунках 3, 4.

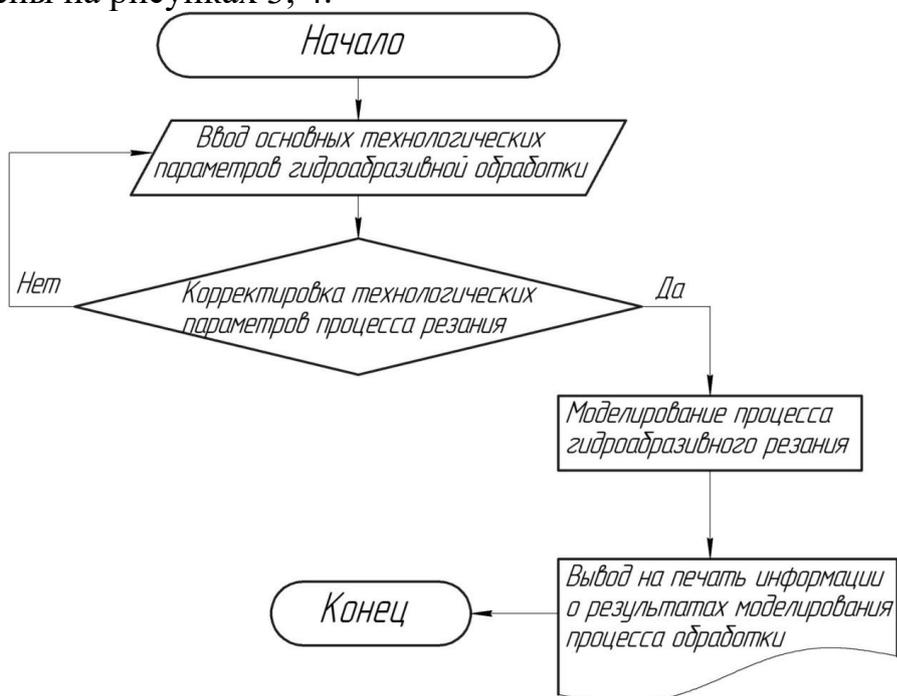


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма программного продукта



Рисунок 4. Структурная схема программного продукта

Разработанный программный комплекс представляет цифрового советника (рисунок 5), обеспечивающего функции ввода и корректировки технологических параметров обработки, моделирование и получение информации по расчету параметров гидроабразивной резки с закручиванием

струи рабочей жидкости без запуска физического процесса с выдачей рекомендаций оператору (рисунок 6).

Текущий внутренний радиус водяного сопла, мм	<input type="text"/>	Начальная скорость струи, мм/мин	<input type="text"/>
Начальный весовой секундный расход жидкости, л/мин	<input type="text"/>	Расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности, мм	<input type="text"/>
Начальный весовой секундный расход частиц, г/мин	<input type="text"/>	Средний диаметр частиц абразива, мм	<input type="text"/>
Начальная скорость струи в сопле, мм/мин	<input type="text"/>	Плотность частиц абразива, г/мм <sup>3</sup>	<input type="text"/>
Концентрация частиц абразива на оси струи, м <sup>-3</sup>	<input type="text"/>	Коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности	<input type="text"/>
Начальная скорость жидкости, м/с	<input type="text"/>	Предел текучести материала детали, кг <sup>т</sup> /мм <sup>2</sup>	<input type="text"/>
Начальная скорость примеси, м/с	<input type="text"/>	Плотность материала детали, г/мм <sup>3</sup>	<input type="text"/>
		Толщина материала, мм	<input type="text"/>

[Начать расчет](#)

Рисунок 5. Главная форма программного комплекса

Заполните все поля значениями из указанного диапазона

Текущий внутренний радиус водяного сопла, мм	<input type="text" value="0.127"/>	Начальная скорость струи, мм/мин	<input type="text" value="10000"/>
			допустимое значение
Начальный весовой секундный расход жидкости, л/мин	<input type="text" value="2.2"/>	Расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности, мм	<input type="text" value="1"/>
	допустимое значение		допустимое значение
Начальный весовой секундный расход частиц, г/мин	<input type="text" value="300"/>	Средний диаметр частиц абразива, мм	<input type="text" value="0.25"/>
	допустимое значение		допустимое значение
Начальная скорость струи в сопле, мм/мин	<input type="text" value="1000"/>	Плотность частиц абразива, г/мм <sup>3</sup>	<input type="text" value="0.0042"/>
	допустимое значение		допустимое значение
Концентрация частиц абразива на оси струи, м <sup>-3</sup>	<input type="text" value="10"/>	Коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности	<input type="text" value="1"/>
	допустимое значение		допустимое значение
Начальная скорость жидкости, м/с	<input type="text" value="900"/>	Предел текучести материала детали, кг <sup>т</sup> /мм <sup>2</sup>	<input type="text" value="34.77"/>
	допустимое значение		допустимое значение
Начальная скорость примеси, м/с	<input type="text" value="10"/>	Плотность материала детали, г/мм <sup>3</sup>	<input type="text" value="0.00785"/>
	допустимое значение		допустимое значение
		Толщина материала, мм	<input type="text" value="18"/>
			допустимое значение

[Начать расчет](#)

Внутренний радиус смесительной трубки сопла = 0.38мм  
 Площадь поперечного сечения сопла = 0.616мм<sup>2</sup>  
 Шаг канавки гидроабразивного сопла = 0.015мм  
 Площадь струи круглого сечения = 3.158мм<sup>2</sup>  
 Нормированная координата = 0.334  
 Коэффициент A<sub>2</sub> = 0.283  
 Коэффициент B<sub>2</sub> = 0.351  
 Коэффициент C<sub>2</sub> = 43.508  
 Коэффициент D<sub>2</sub> = 0.032  
 Коэффициент E<sub>2</sub> = 0.021  
 Начальный импульс струи I<sub>0</sub> = 508.163кг<sup>т</sup>/м<sup>3</sup>  
 Подача K = 0.325мм/мин  
 Угол наклона нарезаемой канавки t<sub>ср</sub> = 159.389°  
 Число оборотов закручиваемой струи F = 66756.85  
 Глубина нарезаемой канавки G = 0.026мм  
 Число нарезов n = 4.422

**Параметры резания:**

Скорость гидроабразивной струи круглого сечения V<sub>н</sub> = 40.454мм/мин  
 Диаметр гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемой детали d<sub>стр</sub> = 0.614мм  
 Глубина внедрения частицы абразива в материал при гидроабразивной резке h<sub>max</sub> = 0.046мм  
 Величина съема металла за один удар абразивной частицы q = 0.056мм  
 Общее количество частиц, пролетавших через поперечный срез сопла n<sub>0</sub> = 357142.857  
 Количество частиц участвующих в резании n = 49317.641  
 Подача при сквозном прорезании материала S = 204.447мм/мин  
 Давление струи при контакте с заготовкой при прорезании P<sub>к</sub> = 111416666.244МПа  
 Сила воздействия струи на обрабатываемый материал F = 136701649.852Н  
 Величина шероховатости поверхности после обработки по показателю R<sub>а</sub> = 0.001мкм

Рисунок 6. Результаты моделирования в программном комплексе

Структурная схема системы управления процессом гидроабразивной резки представлена на рисунке 7.

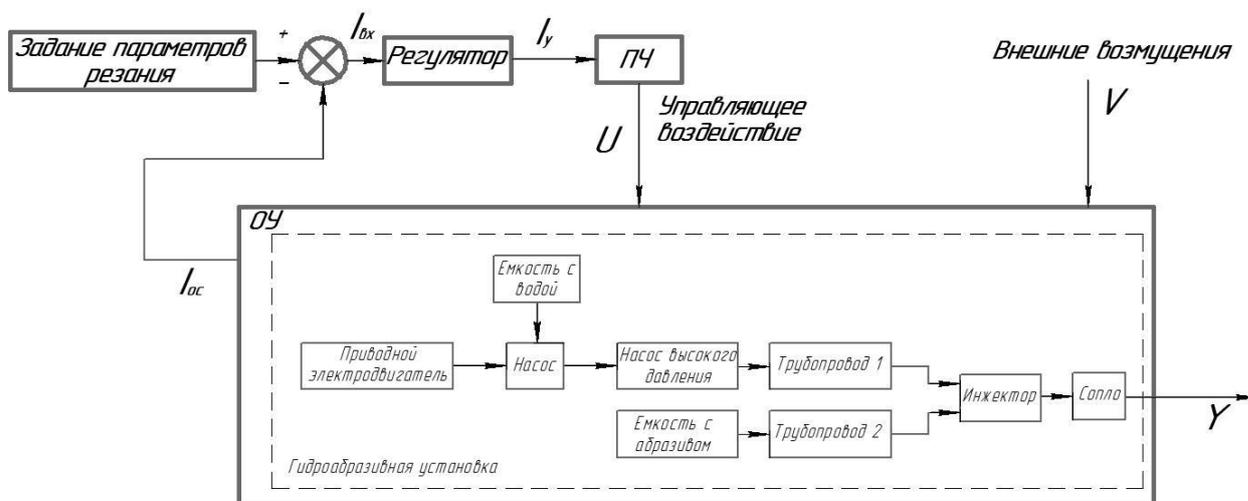


Рисунок 7. Структурная схема системы управления процессом гидроабразивной резки

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 ( $I_{вх}$ ).

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.

Функциональная схема разработанной системы управления с цифровым советником, представлена на рисунке 8, где есть лицо принимающее решение (ЛПР), входное воздействие в цифровой советник ( $I_{вх\text{ }цс}$ ), выходная рекомендация к принятию решения ( $I_{вых\text{ }цс}$ ).

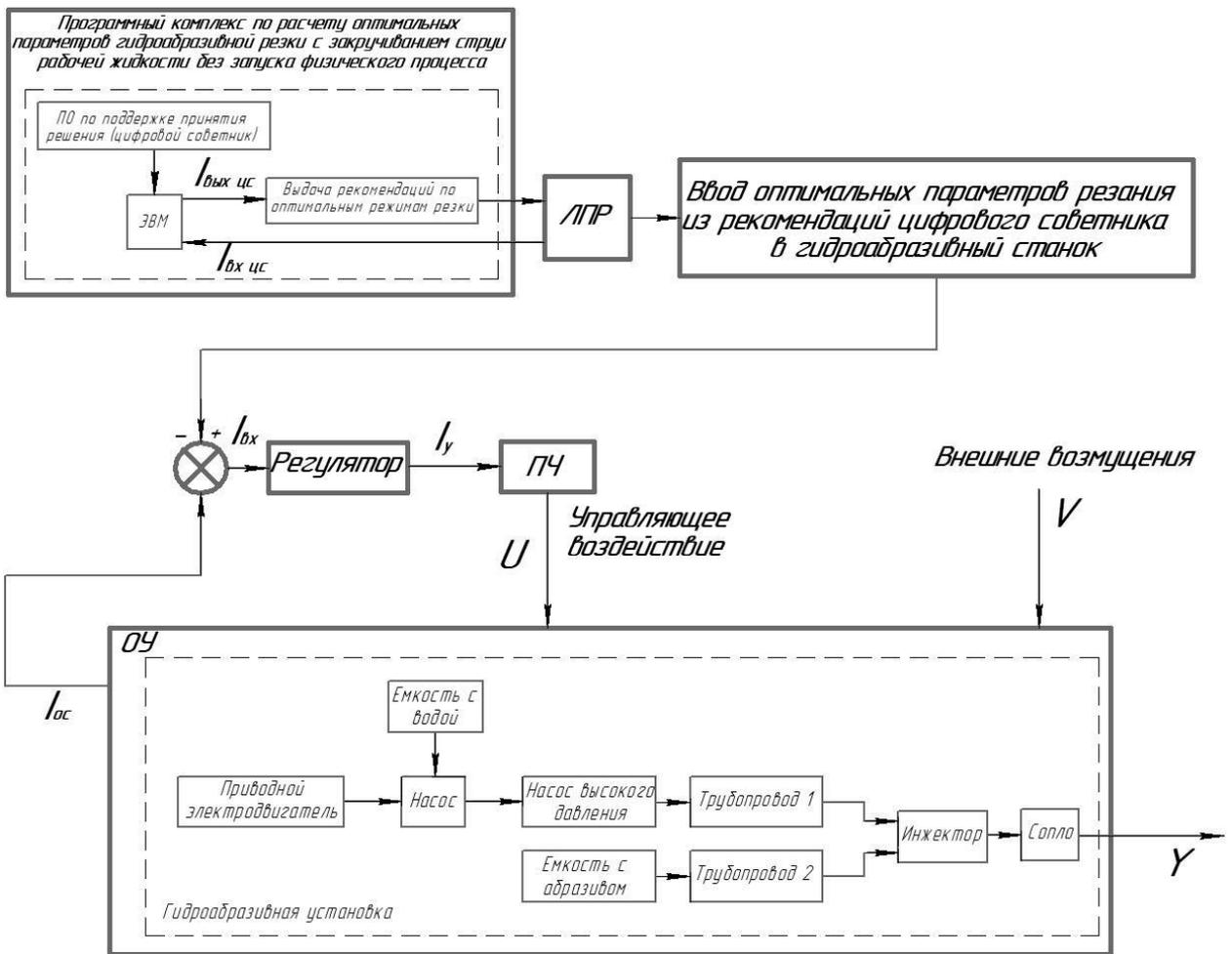


Рисунок 8. Функциональная схема разработанной системы управления

В ходе проведения исследования была произведена доработка программного продукта, а именно блока «Модуль моделирования» (рисунок 4).

В расчетный код программного продукта были заложены следующие расчетные уравнения:

- максимальное давления струи при контакте в момент резки заготовки:

$$P_K = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_{стр}^2} = \frac{1,27 \cdot \rho \cdot S \cdot v_m}{d_{стр}^2} \quad (8)$$

где  $S$  - подача при сквозном прорезании материала,  $d_{стр}$  - диаметр гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемого материала,  $\rho$  - плотность жидкости,  $v_m$  - скорость гидроабразивной струи круглого сечения.

- сила воздействия струи на заготовку:

$$F = 120 \cdot \left( \frac{P_K}{100} \right)^{1,15} \cdot d_{стр}^{1,75} \quad (9)$$

- значение шероховатости поверхности после резки по показателю Ra:

$$Ra = 0,13 \cdot k_\alpha^{Ra} \cdot \sqrt{\frac{h_{max} \cdot F_{стр}}{n}} \quad (10)$$

где  $n$  - значение количества зерен участвующих в процессе резки на периферии струи,  $k_a$  - коэффициент, учитывающий угол падения струи,  $F_{стр}$  - площадь гидроабразивной струи круглого сечения.

**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.

После доработки проводилась верификация 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 8. Также параллельно для подтверждения работоспособности программного комплекса проводился многофакторный эксперимент на гидроабразивном станке тип WJxxуВ-nZ-D по структурной схеме на рисунке 7 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. В обоих методах (разработанная система управления с цифровым советником и натурный эксперимент на гидроабразивном станке) за исследуемые факторы были взяты: расход абразивных зерен  $Q$ , подача режущей головки  $S$ , значение твердости заготовки  $T$ . Сочетание оптимальных значений исследуемых факторов позволило достигнуть рациональных показателей по производительности процесса резки и получить значение требуемой шероховатости обработанной поверхности  $R_a$ , величины твердости  $T_d$ , отклонения от овальности  $\Delta_{ов}$ , 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 10). Отклонение формы (овальность и конусность обрабатываемых поверхностей заготовок) определялось: кругломером КД мод. 290, микрометром цифровой 0-25, 0.001, профилометром SURTRONIK-3 и индикатором ИЧ-50, значение твердости определялось твердомером модели НВ-3000В. Исследования выполнялись на АО «Саратовский агрегатный завод» на промышленной гидроабразивной установке тип WJxxуВ-nZ-D.



Рисунок 9. Станок с ЧПУ- X-Y WJxxyyB-nZ-D

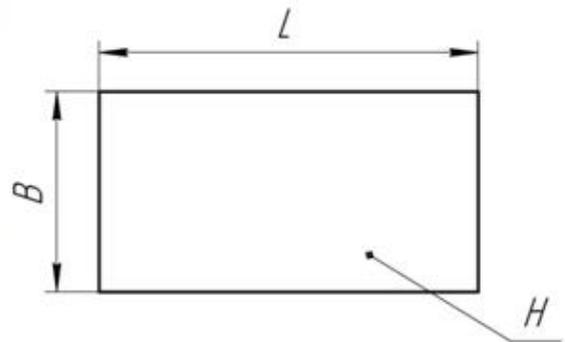


Рисунок 10. Опытные образцы из стали 20 ГОСТ 1050-88



Рисунок 11. Гранатовый абразив Blastrite Microblast Garnet

Для обработки данных, полученных по результатам проведенных исследований, использовалась программа, производящая общую оценку

исследуемых факторов и на основании теоретических представлений об объекте выполнена линеаризация нелинейных уравнений в результате, получены оценки уравнений регрессии:

$$\left. \begin{aligned} R_a &= 1.99Q^{-0.04}T^{-0.06}S^{0.03} \\ \Delta_{кон} &= 1.68Q^{-0.03}T^{-0.07}S^{0.014} \\ T_{д} &= 1.73Q^{-0.029}T^{-0.07}S^{0.05} \\ \Delta_{ов} &= 1.04Q^{-0.06}T^{-0.05}S^{0.27} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $R_a$  - шероховатость обработанной поверхности,  $\Delta_{ов}$  - овальность обработанной поверхности,  $\Delta_{кон}$  - конусообразность обработанной поверхности,  $T_{д}$  - твёрдость обработанной поверхности,  $Q$  - расход абразивных зерен,  $S$  - подача режущей головки,  $T$  - твердость заготовки.

Полученные оценки уравнений регрессии (11) были записаны в систему технических ограничений, за критерии оптимизации были взяты расход абразивных зерен  $Q$ , подача режущей головки  $S$ , за целевую функцию для оптимизации по двум параметрам (критериям оптимизации) была взята величина характеризующая минимальные затраты для выполнения резки:

$$F = \min \frac{S}{Q}, \quad (12)$$

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

$$\left. \begin{aligned} 270 \text{ г/мин} &\leq Q \leq 1100 \text{ г/мин}, \\ 40 \text{ мм/мин} &\leq S \leq 300 \text{ мм/мин} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Перепишем систему (11) с помощью подстановки принятых ограничений, в том числе ограничений определяемых условиями экспериментальных исследований:

$$\left\{ \begin{aligned} Q^{-0.04} \cdot S^{0.03} &\geq \frac{R_a}{1.99 \cdot T^{-0.06}}; \\ Q^{-0.03} \cdot S^{0.014} &\geq \frac{\Delta_{кон}}{1.68 \cdot T^{-0.07}}; \\ Q^{-0.029} \cdot S^{0.05} &\geq \frac{T_{д}}{1.73 \cdot T^{-0.07}}; \\ Q^{-0.06} \cdot S^{0.27} &\geq \frac{\Delta_{ов}}{1.04 \cdot T^{-0.05}}; \\ Q &\geq 270; \\ Q &\leq 1100; \\ S &\geq 40; \\ S &\leq 300; \end{aligned} \right. \quad (14)$$

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:

$$\begin{cases} -0.04X_1 + 0.03X_2 \geq b_1; \\ -0.03X_1 + 0.014X_2 \geq b_2; \\ -0.029X_1 + 0.05X_2 \geq b_3; \\ -0.06X_1 + 0.27X_2 \geq b_4; \\ X_1 \geq b_5; \\ X_1 \leq b_6; \\ X_2 \geq b_7; \\ X_2 \leq b_8; \end{cases} \quad (15)$$

$$G = \min(X_2 - X_1),$$

$$X_1, X_2 \geq 0$$

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 учитывались условиями обработки. Задача (15) была решена методом линейного программирования. Симплекс-метод использовался для поиска оптимальных значений резки (расход абразивных зерен  $Q$ , подача режущей головки  $S$ ) путем вычисления координат  $X_{1opt}$  и  $X_{2opt}$ . Графическая интерпретация определения достижимых значений представлена на рисунке 12.

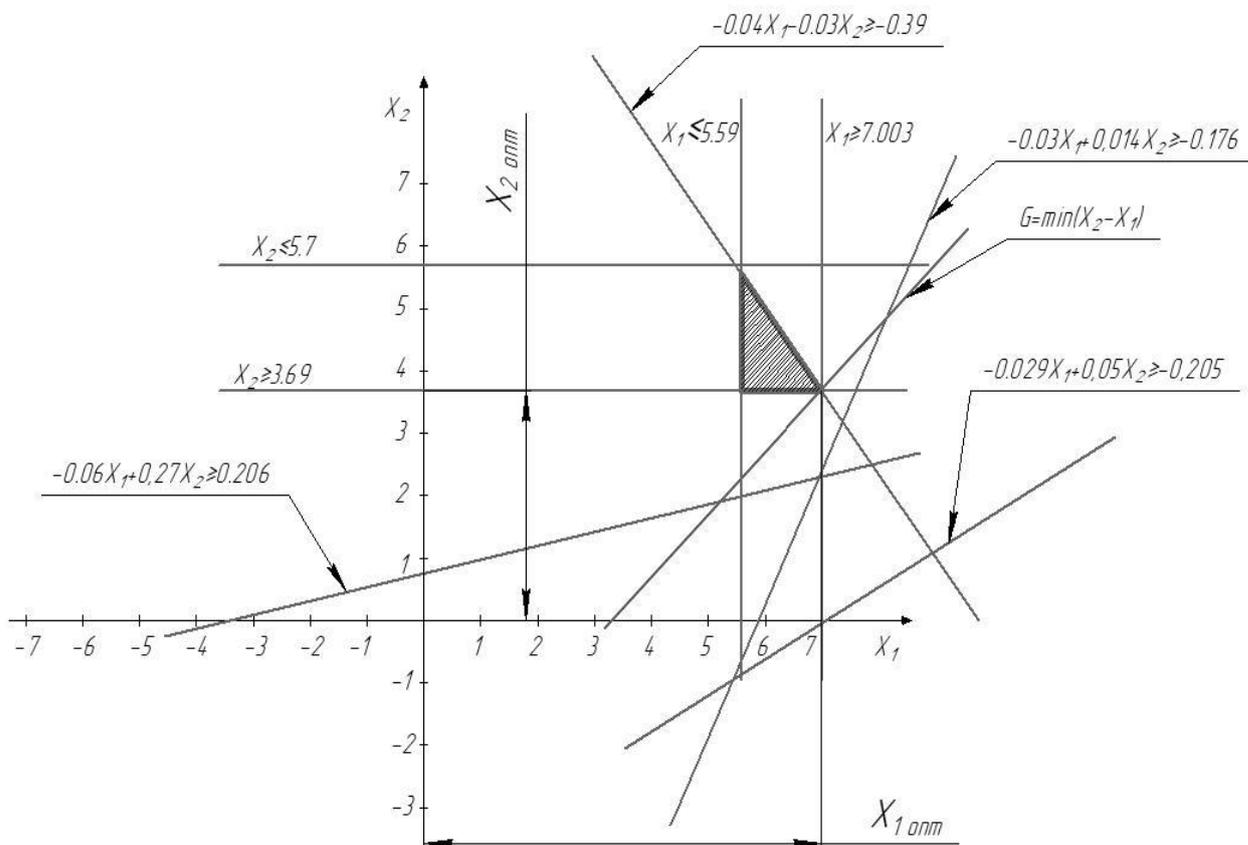


Рисунок 12. Графическая интерпретация симплекс-метода

Найдя координаты  $X_{1\text{ опт}}$  и  $X_{2\text{ опт}}$  определили оптимальные значения расхода абразивных зерен  $Q$ , подача режущей головки  $S$ :

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

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

По результатам отладки программного комплекса и решением задачи симплекс методом было установлено, что для обработки заготовок из стали 20 требуется следующие оптимальные режимы резания: расход абразива  $Q=1078 \text{ г/мин}$  и подача режущей головки  $S = 40 \text{ мм/мин}$  для получения показателей обработанной поверхности заготовки: значение шероховатости  $R_a=1.91 \text{ мкм}$ , величины конусности реза  $0.18 \text{ мм}$ , величины отклонения от овальности  $0.12 \text{ мм}$ . Сравнение двух методов показало, что расхождение значений результатов незначительно и не выходит за пределы 5%.

На рисунке 13 представлены микрофотографии качества поверхности после гидроабразивной резки на разных стадиях реза с изменением цвета поверхности заготовки. Значения шероховатости по параметру  $R_a$  измерялось на профилометре SURTRONIK-3 (рисунок 14).

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

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 выполнена.



Рисунок 13. Микрофото обработанной заготовки из стали 20

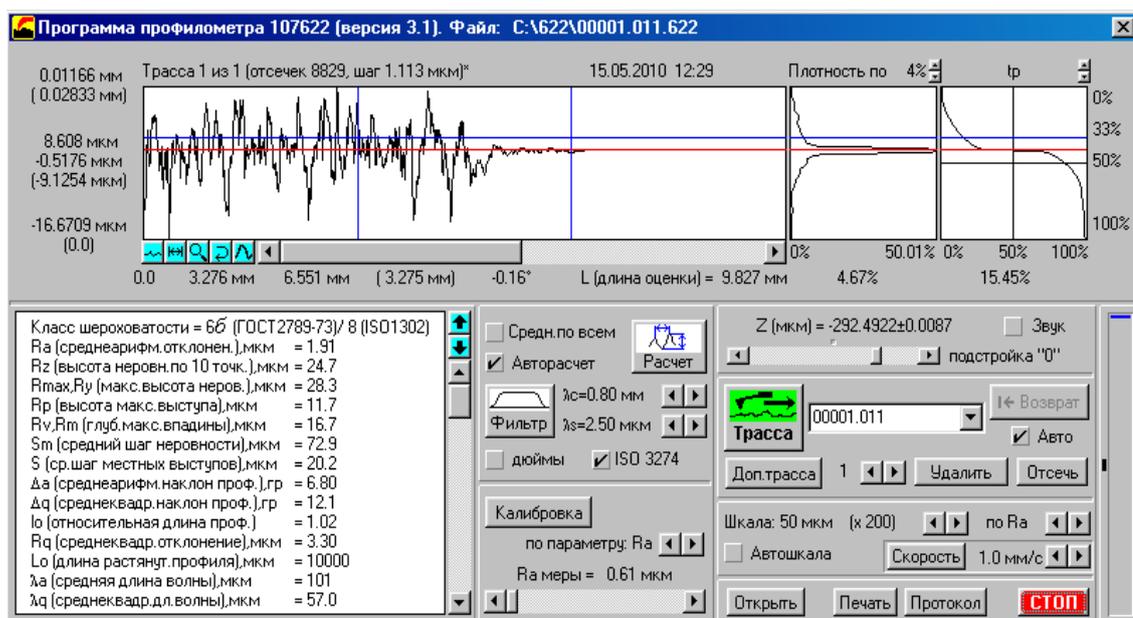


Рисунок 14. Показания профилометра исследуемого образца

На рисунке 15 показано фото качества поверхности до и после гидроабразивного резания.

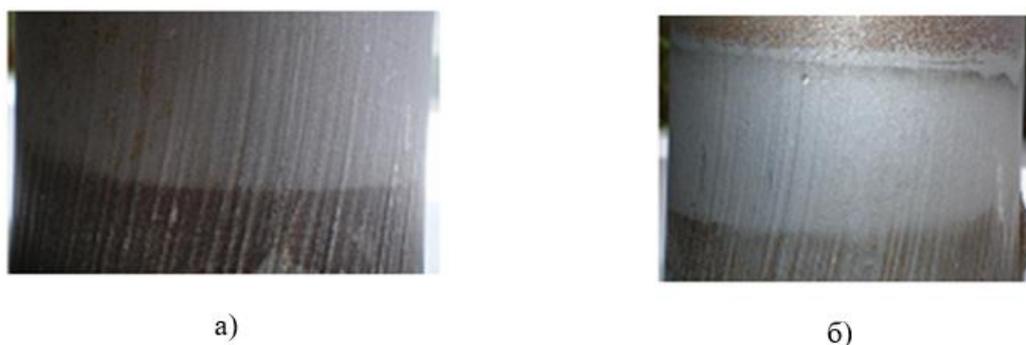


Рисунок 15. Качество поверхности листовой заготовки из стали 20: а) до обработки, б) после обработки

Разработанный программный комплекс был запатентован и получены объекты интеллектуальной собственности – свидетельства на программное обеспечение для ЭВМ

**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, приводится 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.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

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 зёрнами 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.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

#### ***Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ***

1. Иванов, В. В. Система управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием и осцилляцией струи рабочей жидкости/ В. В. Иванов, Е.А. Калашников // Computational nanotechnology. - 2023. - №4. - С. 55 - 61.
2. Иванов, В.В. Имитационные экспериментальные исследования величины съема металла от режимов гидроабразивной обработки с использованием информационных технологий / В.В. Иванов, С.В. Иванов, Вл.В. Иванов // Computational nanotechnology. - 2015. - №4. - С. 74 - 78.
3. Иванов, В.В. Разработка автоматизированного программно-аппаратного комплекса для интеллектуальной поддержки и оптимальной настройки гидроабразивных станков с числовым программным управлением / В. В. Иванов // Computational nanotechnology. - 2015. - №2. - С. 55 - 61.
4. Иванов, В.В. Механизм образования гидроабразивной струи и степень влияния способа закручивания струи / В. В. Иванов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6: в 2 ч. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ. - 2015. - С. 138 - 145.

#### ***Публикации, проиндексированные в Scopus***

5. Ivanov V.V. Influence of Abrasive-Tool Overrun on the Shape Error / V.V. Ivanov, A.N. Vasin, B.M. Iznairov, O.Yu. Davidenko, O.P. Reshetnikova, A.K. Bondarev, V.V. Konovalov, S.Ya. Prikazchikov, V.A. Melent'ev, V.V. Shalunov // Russian Engineering Research. – 2017. No. 6, pp. 32-34.
6. Ivanov V.V. Efficient Hydroabrasive Cutting with Swirling of the Liquid Jet / V.V. Ivanov, A.N. Vasin, B.M. Iznairov, O.Yu. Davidenko, O.P. Reshetnikova, A.K. Bondarev, V.V. Konovalov, S.Ya. Prikazchikov, V.A. Melent'ev, V.V. Shalunov // Russian Engineering Research. – 2017. No. 6, pp. 29-31.

#### ***Статьи и материалы конференций (выборочно)***

7. Иванов, В.В. Управление процессом гидроабразивной резки на основе имитационного моделирования / В.В. Иванов, Е.А. Калашников // Молодежь и системная модернизация страны: Сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых (19-20 мая 2020 года), в 6-х томах, Том 5, Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Юго-Зап. гос. ун-т.- 2020. - С. 259 -263.

8. Иванов, В.В. Программное обеспечение для прогнозирования процесса гидроабразивного резания / В.В. Иванов, Е.А. Калашников // 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.

9. Иванов, В.В. Влияние технологических параметров на производительность гидроабразивной резки при закручивании струи рабочей жидкости / В.В. Иванов //75-е Дни науки студентов НИТУ «МИСиС» международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции: сб. науч. тр. / МИСиС, в 2-х томах, Том 2, Москва: НИТУ МИСиС. - 2020. - С. 619 - 621.

10. Иванов, В.В. Оптимизация гидроабразивной резки на основе закручивания струи рабочей жидкости / В.В. Иванов // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Сборник научных статей 9-ой Международной научно-практической конференции (24-25 октября 2019 года) /редкол.: А.А. Горохов (отв. редактор) Юго-Зап. гос. ун-т, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. - 2019. -С. 93-97.

11. Иванов, В.В. Исследования по интенсификации гидроабразивной резки путем закручивания струи рабочей жидкости / В.В. Иванов, Ю.А. Железников // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей 6-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (25-26 сентября 2019 года), Юго-Зап. гос. ун-т, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. - 2019. - С. 99 - 102.

12. Иванов, В.В. Программный комплекс ГАР для прогнозирования процесса гидроабразивного резания / В.В. Иванов //74-е Дни науки студентов НИТУ «МИСиС» международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции: сб. науч. тр. / МИСиС, в 2-х томах, Том 2, Москва: НИТУ МИСиС. - 2019. - С. 626 - 627.

13. Иванов, В.В. Состояние вопроса повышения производительности процесса гидроабразивной обработки / В.В. Иванов, А.Н. Васин, Б.М. Изнаиров // Исследование сложных технических и технологических систем: сб.науч.трудов. СГТУ. - Саратов, 2017. - С. 58-62.

### ***Объекты интеллектуальной собственности***

14. Иванов, В.В. Программный комплекс для моделирования оптимальных параметров процесса гидроабразивной резки с дополнительным движением струи / В.В. Иванов, Е.А. Калашников. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024610091, 09.01.2024 г.

15. Иванов, В.В. Программа для управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости / В.В. Иванов, Е.А. Калашников. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610141, 09.01.2024 г.

16. Иванов, В.В. Программа для расчета параметров гидроабразивного сопла для организации гидроабразивной обработки путем закручивания струи / В.В. Иванов, С.В. Иванов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617625, 08.07.2020 г.

17. Иванов, В.В. Программа для расчета и построения оптимального технологического процесса гидроабразивной резки путем закручивания струи рабочей жидкости / В.В. Иванов, С.В. Иванов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617624, 08.07.2020 г.

18. 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.

19. Иванов, В.В. Программа оценки степени влияния способа закручивания гидроабразивной струи при резке материалов / В. В. Иванов, Вл. В. Иванов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614885, 15.04.2019 г.

20. Иванов, В. В. Программа для расчета технологических параметров гидроабразивной обработки путем закручивания струи / В.В. Иванов, С.В. Иванов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614909, 16.04.2019г.

21. Иванов, В.В. Программный комплекс для расчета процесса гидроабразивной резки, основанного на закручивании струи рабочей жидкости / В.В. Иванов, С.В. Иванов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665281, 03.12.2018 г.

22. Иванов, В.В. Программный комплекс для расчета глубины внедрения абразивной частицы в обрабатываемый материал при гидроабразивной резке / В.В. Иванов, Вл.В. Иванов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015663211, 14.12.2015 г.

23. Иванов, В.В. Программный комплекс для оценки эффективного технологического процесса по определению рациональных параметров процесса гидроабразивного резания на основе имитационного моделирования / В.В. Иванов, С. В. Иванов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015663209, 14.12.2015 г.