

На правах рукописи
УДК 621.9

МУГЛА ДАРЬЯ РОМАНОВНА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ ПУТЕМ
ОПТИМИЗАЦИИ ДЛИНЫ ФОКУСИРУЮЩЕЙ ТРУБКИ

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Н. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре технологий ракетно-космического машиностроения

Научный руководитель:

Галиновский Андрей Леонидович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Кравченко Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор.

Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук», Москва

Кожус Ольга Геннадьевна, кандидат технических наук.

Ведущий инженер отдела организационного сопровождения НИР, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», Орел

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет"

Защита состоится «8» декабря 2021 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5., стр.1

Ваш отзыв на реферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, на сайте <http://www.bmstu.ru>

Телефон для справок +7 (499) 267-09-63

Автореферат разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.331.02

к. т. н., доцент



А. В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время технология гидроабразивной обработки и резания (ГАО-ГАР) нашла широкое применение в различных отраслях машиностроения для выполнения ряда технологических операций, в частности, раскроя листового материала, точения, очистки и упрочнения поверхностей, образования отверстий и др. Причины активного внедрения данной технологии связаны с существенным количеством ее достоинств, причем по ряду критериев, например, пожаро-взрывобезопасности, у нее практически нет альтернатив. Среди преимуществ технологии ГАО-ГАР, прежде всего, следует отметить универсальность применяемого технологического оборудования, возможность резания различных, в том числе комбинированных, слоистых материалов, отсутствие температурного воздействия на обрабатываемые материалы. К недостаткам ГАО-ГАР чаще всего относят высокую себестоимость обработки и стоимость расходного материала – абразивного песка. Сегодня в процессе ГАО-ГАР в подавляющем большинстве случаев используется зарубежный абразив, стоимость которого растет пропорционально росту курса валют, что серьезно сказывается на конкурентных преимуществах данной технологии. Переход на использование отечественного сырья для получения абразивного порошка смог бы решить указанные проблемы технологии, однако это приведет к необходимости анализа конструкторско-технологических решений и оценки эффективности ряда параметров, оптимизированных под используемый ранее и рекомендуемый производителем оборудования расходный материал. Речь идет об элементах струеформирующего тракта и фокусирующей трубке (ФТ), непосредственно связанной с формированием и разгоном абразивно-жидкостной струи.

Несмотря на то, что интерес к исследованиям процесса ГАО-ГАР и связанными с этой технологией вопросами постоянно растет, вопросам оптимизации параметров струеформирующего тракта в научной литературе уделялось крайне малое внимание. Вместе с тем, был решен ряд оптимизационных задач технологии ГАО-ГАР, таких как выбор углов взаимодействия режущей струи и материала, выбор концентрации абразива по стоимостным показателям обработки, определение скоростей подачи соплового блока по информативным параметрам сигнала акустической эмиссии и др.

Очевидно, что переход на использование отечественного абразива в рамках программы импортозамещения потребует решения актуальной задачи, связанной с разработкой инженерной методики, направленной на поиск рациональных длин ФТ в зависимости от масс-геометрических характеристик той или иной марки абразива. Таким образом, тема работы, связанная с решением вопросов обеспечения производительности ГАО-ГАР материалов, с использованием отечественных расходных материалов, а также разработки

соответствующего научно-методического и информационно-аналитического обеспечения является актуальной и практически значимой.

Целью диссертационной работы

Целью диссертационного исследования является обеспечение повышения производительности процесса ГАО - ГАР за счет оптимизации длины ФТ по критерию формируемой абразивно-жидкостной струи определенного состава и ее скоростных параметров на выходе из струеформирующего тракта.

Основные задачи исследования

1. На основании анализа современных тенденций совершенствования технологических операций ГАО-ГАР экспертно-аналитическим путем обосновать перспективность решения задач оптимизации длины ФТ.
2. Разработать инженерную экспресс-методику определения длины ФТ в зависимости от состава абразивно-жидкостной струи по критерию обеспечения максимальной глубины каверны.
3. Разработать прикладной аппарат моделирования процесса формирования скоростных параметров эжектированных в канале ФТ твердофазных абразивных частиц в конкретных технологических условиях обработки.
4. Осуществить экспериментальные исследования влияния длины ФТ на производительность ГАО-ГАР, провести оценку адекватности полученных расчётных значений.
5. Выполнить апробацию методики определения длины ФТ в зависимости от состава абразивно-жидкостной струи и наметить перспективы дальнейших исследований

Методы исследования

В работе использовались теоретические положения о формировании гидроабразивной струи, метод экспертного анализа и теория принятия решений. Обработка экспериментальных исследований проводилась с использованием методов математической статистики. Эксперименты проводились на основе данных, полученных в результате использования подходов теории планирования эксперимента. Практические задачи решались с использованием аттестованного современного технологического оборудования, в частности установок для ГАО-ГАР фирм STM WaterSonic Standard и Flow Mach 3 1313b (США). Для изучения результатов экспериментов по ГАО-ГАР материалов, применялся микроскоп Carl Zeiss LSM700 (Германия). Для записи сигнала акустической эмиссии использовался осциллограф АКИП-4110/1 компании «Pico Technology». При проведении численных расчетов использовали лицензионный программный комплекс Solidworks Flow Simulation. Для реализации полученных результатов работы в виде специально разработанного ПО была подготовлена программа на высокоуровневом языке программирования Python.

Научная новизна исследования заключалась в разработанной инженерной методике обеспечения выбора длины ФТ соплового блока установки гидроабразивного резания материалов в соответствии с характеристиками абразивно-жидкостной суспензии для обеспечения повышения производительности резания.

Признаками научной новизны обладают следующие положения работы:

1. Теоретически показано и экспериментально подтверждено наличие взаимосвязи между длиной фокусирующей трубки и составом абразивно-жидкостной суспензии.
2. Установлено соответствие между информативными параметрами сигналов акустической эмиссии с длиной фокусирующей трубки, скоростными параметрами абразивно-жидкостной струи и производительностью гидроабразивного резания.
3. Результаты экспериментальной оценки режущих свойств отечественных марок абразивных порошков и соотнесение их с параметрами качества обработанной поверхности.

Практическая значимость работы

- Разработаны рекомендации и программное обеспечение по экспресс определению длин ФТ в зависимости от состава абразивно-жидкостной струи при выполнении операций по ГАО-ГАР материалов.
- Даны предложения по использованию определенной длины ФТ в зависимости от технологических задач реализации технологии ГАО-ГАР.

Достоверность научных положений и выводов, представленных в диссертационной работе автором, обеспечивается корректным применением общих положений естественных и точных наук, при выполнении теоретических и расчетных исследований, а также, подтверждена согласованием расчетных и экспериментальных данных.

Основные положения, выносимы на защиту

1. Теоретическое и экспериментальное обоснование возможности экспресс-определения рациональной длины фокусирующей трубки при ГАО-ГАР, путем определения интенсивности процесса гидроабразивной эрозии обрабатываемого материала и скоростных параметров абразивно-жидкостной струи на выходе из ФТ.
2. Результаты математического моделирования, отражающие соответствие между условиями ГАО-ГАР и длиной ФТ.
3. Инженерная методика и технологические рекомендации по определению оптимальной длины ФТ по критерию обеспечения максимальной скорости абразивно-жидкостной струи на выходе из струеформирующего тракта.

4. Экспериментальное обоснование возможности использования информативных параметров акустической эмиссии для определения рациональной длины ФТ.

Личный вклад автора состоит в анализе и структурировании данных, полученных на основе изучения литературных источников, а также, в результате самостоятельного проведения экспериментальных и выполнения теоретических исследований, в том числе проведения численного моделирования процесса формирования абразивно-жидкостной струи. Автор принял участие в разработке и изготовлении специальной технологической оснастки для проведения экспериментальных исследований. На основе полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований лично автором была разработана инженерно-технологическая методика выбора рациональной длины ФТ с учетом варьирования входных параметров ГАО-ГАР. На основе полученных результатов и технического задания, сформированного автором, было разработано программное обеспечение по выбору длин ФТ в зависимости от состава абразивно-жидкостной струи.

Апробация результатов работы.

Вошедшие в диссертацию результаты докладывались и обсуждались на: второй международной молодежной конференции «Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники», Москва, 2018 г.; на всероссийской конференции «ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли», Москва, 2018 г.; на международном форуме «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии», Москва, 2018 г.; на академических чтениях «XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства», Москва, 2017 г.; на международной научно-технической конференции «Перспективные подходы и технологии проектирования и производства деталей и изделий аэрокосмической техники», Москва, 2017 г.

Реализация и внедрение результатов работы

Исследования проводились в рамках грантов РФФИ 18-29-18081 и 19-38-90228\19, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-3778.2018.8 и грантов от фонда содействия инновациям по программе УМНИК-18 (в) в соответствии с договором №14727ГУ/2019 и № 14549ГУ/2019. А также, принималось участие в выполнении гос. контракта 18/ц-2013, ОКР. Получены акты апробации: методики определения рациональной длины фокусирующей трубки при гидроабразивном резании (ООО «СтартРЛ-Д»), достоверности математических моделей гидроабразивного резания на основе анализа и

сопоставления с экспериментами при использовании разных длин фокусирующей трубки (ООО «Гидроджет»).

Публикации

Основное содержание работы отражено в 12 публикациях, из которых 6 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и 3 в изданиях, входящих в перечень Scopus. Общий объем 5,32 / 1,69 п.л.

Структура и объемы работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка литературы из 102 наименований и приложения. Содержит 173 страниц, в том числе 64 иллюстраций и 25 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы исследования, связанная с необходимостью перерасчета геометрических параметров элементов струеформирующего тракта при условии перехода на отечественные расходные материалы - абразивный порошок. Обозначены задачи поиска решений для повышения физико-технологической результативности ГАО-ГАР и достижения необходимой производительности технологии. Обоснован выбор предмета исследования - ключевого звена струеформирующего тракта, а именно фокусирующей трубки, конструкторско-технологическое совершенство которого в конечном счете и определяет результативность всего процесса. Сформулированы признаки научной новизны исследования, практическая значимость работы и научно-практические положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 рассматриваются решаемые в настоящее время производственные задачи с использованием технологий ГАО-ГАР. Рассмотрены сферы применения гидроабразивной струи и её физико-энергетические возможности. С учетом имеющегося опыта использования данных технологий на практике и на основе анализа исследований, выполненных в последние годы, обозначены возможные направления совершенствования ГАО-ГАР.

Представлена структура гидротехнологического комплекса, его основные составные компоненты. На основе анализа и изучения расходных материалов и комплектующих показано, что значительный вклад в себестоимость технологии ГАО-ГАР вносит замена ФТ, ресурс которых не превышает 150 часов. Эти элементы различных типоразмеров производятся рядом зарубежных производителей из Германии, США, КНР, причем выбор геометрических параметров ФТ различен и зависит от рекомендуемых марок абразивного материала.

Кроме того, на основе выполненных ранее работ (Л.А. Тищенко, А. А. Ковалева, В.А. Тарасова, В.М. Елфимова) установлено, что скорость абразивно-жидкостной струи определяется геометрией внутреннего канала ФТ и зависит как от выбранных технологических параметров обработки, так и от второго параметра - ее длины. На Рисунке 1 представлена схема формирования гидроабразивной струи.

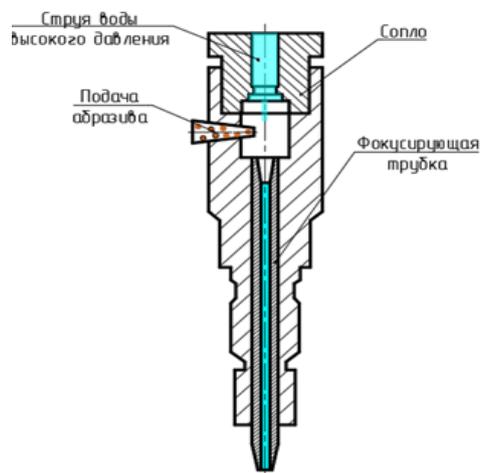


Рисунок 1. Формирование гидроабразивной струи

Таким образом, в результате выполненных исследований, было выявлено научное противоречие, состоящее в необходимости перехода технологий ГАО-ГАР на отечественные расходные материалы и отсутствие научных исследований, связанных с оптимизацией геометрических параметров ФТ, обеспечивающих производительность и соответствующую технико-экономическую эффективность процесса обработки с учетом параметров абразивного порошка. Согласно выдвинутой гипотезы в отсутствии процедур оптимизации длины ФТ преимущества перехода на импортозамещающие расходные материалы минимизируют экономический эффект от их применения ввиду снижения производительности обработки.

В главе отмечено, что до настоящего времени была проведена серия исследований в области оптимизации технологических параметров и управления ими с целью обеспечения качества резания и повышения его производительности. Так, проведенные ранее научные исследования Г. В. Барсукова, Р. А. Тихомирова, В.В. Кузина, Я. Ю. Яблуновского, И.В. Петко, Maniadaki K., Wang J, Naixia Liu , Can Kang , были связаны с выбором оптимальных режимов резания различных материалов. В работах В.М. Елфимова, В.А. Тарасова, Кожус О.Г., В. И. Колпаков, Ю. Е. Ерхимовича рассматривались задачи по снижению себестоимости обработки за счет рационализации концентрации абразива и его предварительной обработки. Оптимизацией выбора угла взаимодействия абразивно-жидкостной струи и поверхности образца, посвящены работы Г. П. Черепанова, А. А. Штерцер, М.В. Хафизова, С.К. Сальникова, А.А. Барзова и др. Определение расстояния от среза ФТ до поверхности исследовалось в трудах И. В. Добровольского и В. В. Шпилева. Тем не менее, не смотря на значительный опыт оптимизации различных технологических параметров и решенную совокупность иных технологических задач вопросами оптимизации длины ФТ в отечественной и зарубежной научной литературе не было уделено должного внимания, что подчеркивает актуальность темы исследования. А значит решение вопросов разработки методик и подходов по выбору длины ФТ при использовании

различных марок абразивного материала, расширение представлений о гидрофизической картине формирования гидроабразивного потока и оценке эффективности тех или иных абразивных материалов представляет научную и практическую полезность. С учетом выполненного анализа разрабатывается и предлагается общий план проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Во Главе 2 на основе данных литературных источников, собственного опыта эксплуатации технологий ГАО-ГАР, феноменологических представлений о процессах, протекающих при реализации данной технологии предложена структурная схема комплексной оптимизации физико-технологических параметров в виде диаграммы Исикава. Выбор приоритетных направлений исследования из совокупности выявленных параметров предлагается решить с использованием подходом теории принятия решений – экспертного оценивания. С этой целью в главе предлагается выбор критериев сравнения параметров, разрабатывается анкета эксперта, предлагаются методы оценки достоверности результатов и расчета минимально необходимого количества экспертов.

Самостоятельным разделом второй главы являются разделы, посвященные выбору технологического оборудования для проведения экспериментальных исследований в соответствии с общим методическим планом работ, а также раскрывается содержание методик и особенностей проведения экспериментов.

В основе работы лежат эксперименты с применением установок для гидроабразивного резания материалов. В частности, в главе предложены для ознакомления характеристики, параметры и схемы данного оборудования – установки для гидроабразивного резания материалов STM WaterSonic Standard (Австрия) и Flow Mach 3 (США). Для данных установок была приобретена партия специальных, рекомендуемых производителем, ФТ в частности марки Rostec 100, с размерами 7,14x0.75x76 мм. Для решения задачи анализа влияния длины ФТ на производительность обработки с использованием технологии электроэрозионного резания несколько трубок были разрезаны на две равные части. Благодаря разработанной и изготовленной специальной технологической оснастки, ФТ и их фрагменты объединялись в сборные трубки разной длины, что и требовалось для эксперимента. Данное оборудование изображено на Рисунке 2.

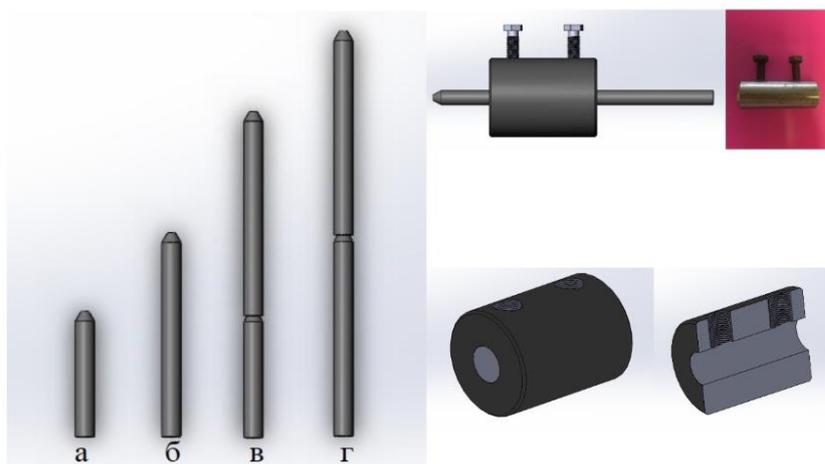


Рисунок 2. Технологическая оснастка для получения ФТ различной длины а – 0,5 L, б – 1 L, в – 1,5L, г – 2 L, где L – длина стандартной трубки, равная 76 мм.

В качестве образца, на котором осуществлялись пробные резы с применением ФТ разной длины, была выбрана дюралюминиевая пластина Д16Т размером 120x60x6 мм. В процессе резания для каждой длины составной ФТ осуществлялось измерение сигнала акустической эмиссии АЭ с помощью осциллографа АКПП-4110/1 компании «Pico Technology». Измерение АЭ позволило провести анализ сигналов и его результаты сравнить с глубиной образовавшихся гидрокаверн. Измерение глубин которых проводилось с использованием микроскопа Carl Zeiss. Численные расчеты, необходимые в процессе теоретических исследований и обработки данных экспериментов проводились с помощью лицензионных программных комплексов Mathcad, Python и MS Excel. Обработка и анализ сигналов АЭ осуществлялась в специальном программном обеспечении, поставляемом с осциллографом «Pico Technology». Для проведения численного моделирования и анализа движения абразивных частиц в ФТ, расчета скорости абразивно-жидкостного потока использовалось лицензионное программное обеспечение Solidworks Flow Simulation. Данное ПО предназначено для общего параметрического моделирования потока жидкофазных сред, использующего метод конечного объема (FVM). Программа позволяет рассчитывать характеристики потока с помощью сценариев «что, если», что позволяет решать задачи оптимизации и выбора рациональных режимов работы оборудования.

Глава 3 посвящена теоретическим исследованиям влияния конструктивно-технологических параметров ФТ в сочетании с различными марками и характеристиками абразивных порошков на скоростные параметры абразивно-жидкостной струи и производительность ГАР. В главе представлены результаты экспертно-аналитического анализа возможных направлений оптимизации технологических параметров ГАР. Разработана феноменологическая модель формирования абразивно-жидкостной струи, определен характер изменения скорости гидроструи, абразива и абразивно-жидкостной струи в зависимости от длины канала ФТ. Представлена

расчетная зависимость величины эрозии обработанной поверхности от совокупности технологических параметров, характеристик абразивных частиц и материала. Выведена зависимость для определения скорости абразивно-жидкостной струи на срезе ФТ. Получены теоретические зависимости данных параметров. Численными методами в главе решены вопросы моделирования движения высокоскоростной струи жидкости и абразива по внутреннему каналу ФТ, выполненные для определения значения скоростных показателей потока в зависимости от его длины.

По результатам применения метода экспертного оценивания, проведенного по разработанному перечню критериев сравнения рассматриваемых направлений оптимизации параметров ГАР, была построена обобщенная гистограмма, иллюстрирующая их соответствующий потенциал. Сделаны выводы, что решение вопросов оптимизации длины канала ФТ имеет наибольшее значение для исследования, причем по такому критерию сравнения, как «возможность повышения производительности» и «простота реализации», данное направление значительно превосходит остальные рассмотренные варианты. Следующим по ранжированию направлением является целесообразность перехода на использование новых абразивных материалов. Именно эти направления исследований были выбраны в работе и составили ее основу. Достоверность результатов экспертных оценок подтверждена рассчитанными высокими значениями коэффициентов конкордации.

В результате исследований, проведенных при разработке феноменологической модели формирования абразивно-жидкостной струи, были сделаны выводы, что в канале ФТ возникает достаточно сложная физико-энергетическая картина параллельно-последовательно протекающих процессов, сопровождающихся заметными энергетическими потерями, в том числе: трением абразивных частиц о канал ФТ, их турбуликации, генерации широкополосного волнового возмущения, образованием новых поверхностей, образованием спрея и др., что представлено на Рисунке 3.

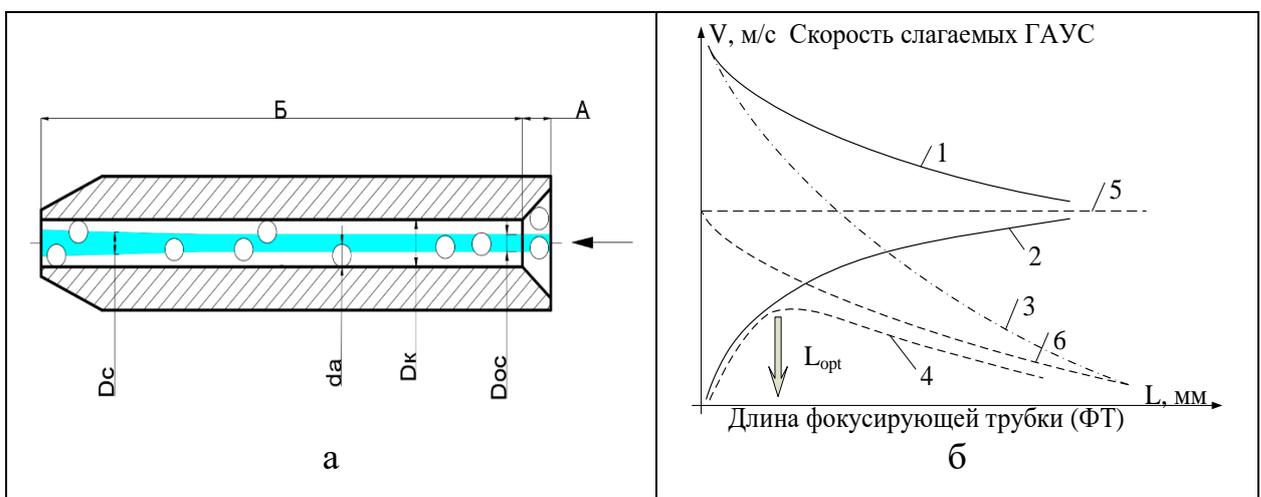


Рисунок 3. Схема движения абразивно-жидкостной струи в ФТ и характер изменения составляющих ее скорости по длине канала

а – схема формирования гидроабразивной струи; А-зона поступления абразивных частиц; Б – зона движения гидроабразивной суспензии; D_{oc} – начальный диаметр гидроструи, D_k – диаметр внутреннего канала ФТ; d_a – диаметр абразивных частиц; D_c – диаметр гидроабразивной струи.

б – характер изменения скорости составляющих гидроабразивной струи в зависимости от длины канала ФТ; 1 – изменение скорости воды, без учета сопротивления кинетике разгона частиц; 2 – изменение скорости абразивных частиц, без учета сопротивления кинетики их разгона в канале ФТ; 3 – реальное изменение скорости воды с учетом потерь; 4 – реальное изменение скорости абразивных частиц с учётом потерь; 5, 6 – идеальное и реальное значение асимптотических результирующих скоростей движения фазовых слагаемых ГАУС

В ряде случаев минимизация потерь возможна за счет перехода на использование новых материалов ФТ, применение новых конструкторско-технологических решений для его изготовления. Однако в случае если длина ФТ избыточна, и скорость разгоняемой частицы абразива равна скорости струи воды, а радиальный градиент стремится к нулю, то движение абразивно-жидкостной струи сопровождается прямыми диссипативными потерями, что приводит уменьшению производительности ГАР. В противоположном случае, когда скорость абразивных частиц не достигает своего предела (разгона) из-за недостаточной длины ФТ, возникает аналогичная ситуация со снижением производительности ГАР. Эти обстоятельства позволяют утверждать, что существует некоторая оптимальная длина ФТ, позволяющая обеспечить наиболее эффективную реализацию энергетических возможностей исходной струи по критерию придания абразиву максимальных значений скорости на выходе из струеформирующего тракта. В данном случае пренебрегая величиной эрозионного разрушения материала при воздействии на него водяной струи. С учетом сформированных феноменологических представлений была разработана математическая модель взаимосвязи параметров абразивно-жидкостного потока в канале (разгонно-смешивающей) ФТ. Записаны системы дифференциальных уравнений первого порядка для составляющих потока – скорости струи V_c , скорости абразивной частицы V_a и функциональные связи между ними при текущем значении длины L ФТ. в дальнейшем.

Решение данных уравнений позволило получить зависимости скорости струи и абразива на выходе из ФТ советующей длины с введением коэффициентов связи между градиентами изменения скоростей компонентов струи и твердофазных частиц абразива. При построении математической модели было сделано допущение, что V_{oc} - начальная скорость струи на входе в ФТ, примерно равна ее скорости на выходе из струеформирующего гидросопла.

Таким образом, феноменологическая модель позволяет функционально определить величину L_{opt} в конкретных физико-технологических условиях реализации операции ГАР материалов. Расчет значений скорости в

зависимости от рассматриваемых длин ФТ осуществлялся в программе Python. Кроме того, в рассматриваемой части работы сделаны предположения и обосновано наличие взаимосвязи между параметрами волн АЭ и производительностью ГАР, что было подтверждено результатами экспериментов, представленных в Главе 4.

В Главе 3 была также поставлена задача механики сплошной среды, заключающаяся в составлении замкнутой системы уравнений, которая описывает движение и состояние сплошной среды с учётом её физико-механических свойств и внешних факторов и позволяет найти все функции, определяющие движение и состояние среды в зависимости от координат и времени. На рисунке 4 представлена расчетная схема формирования абразивно-жидкостной струи и полученные результаты. Численное моделирование осуществлялось в среде SolidWorks Flow Simulation. Исходные данные для моделирования были следующими: размер частиц 150 мкм, расстояние между ними 0,1 мкм, массовый расход абразива 10%, диаметр струи 100 мкм, плотность 1000 кг/м³ расход воды 2 л/мин, скорость на входе в ФТ 800 м/с. Длина ФТ варьировалась от 0,5 L до 2 L, при L=76 мм. При расчетах были сделаны следующие допущения: ФТ представляет собой абсолютно жесткое тело, частица абразива имеет круглую форму и отражается от стенки без проскальзывания.

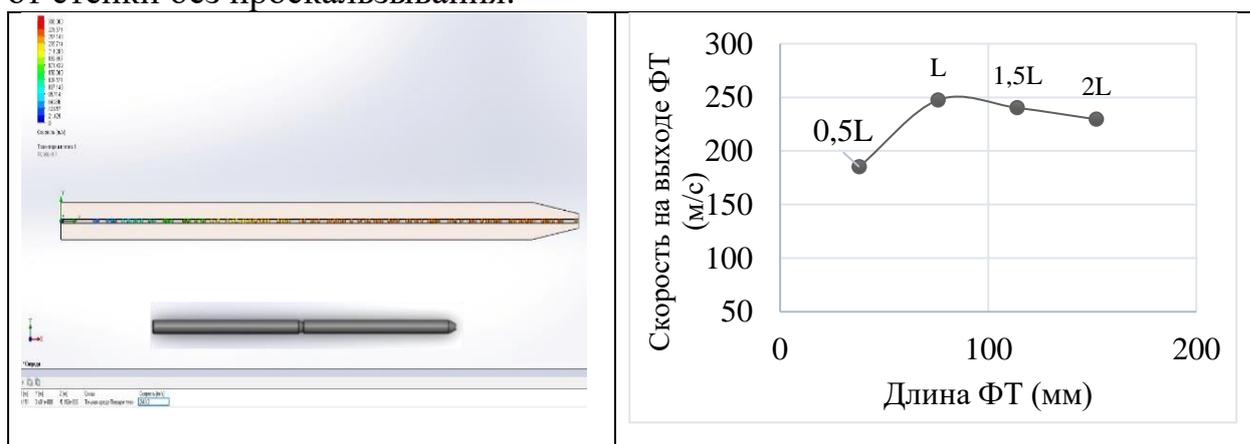


Рисунок 4. Результаты численного моделирования ГАУС

В результате численных расчетов удалось доказать, что стандартная длина ФТ (76 мм) является оптимальной для рекомендуемой производителем марки абразива и это не противоречит логике рассматриваемой задачи.

Полученные в теоретической главе результаты были верифицированы в результате проведения экспериментов, результаты которых подробно рассмотрены в Главе 4.

В Главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований по оценке производительности ГАР при варьировании длины ФТ. Эксперименты проведены для восьми марок абразивных материалов, семь из которых отечественного производства. Массовая концентрация абразива составляла 8% и 10% в воде. В ходе исследования для подтверждения гипотезы, описанной в главе три, одновременно измерялись и параметры АЭ,

согласно схеме, представленной на Рисунке 5. Гидрокаверны для соответствующих длин ФТ, также, продемонстрированы на Рисунке 5.

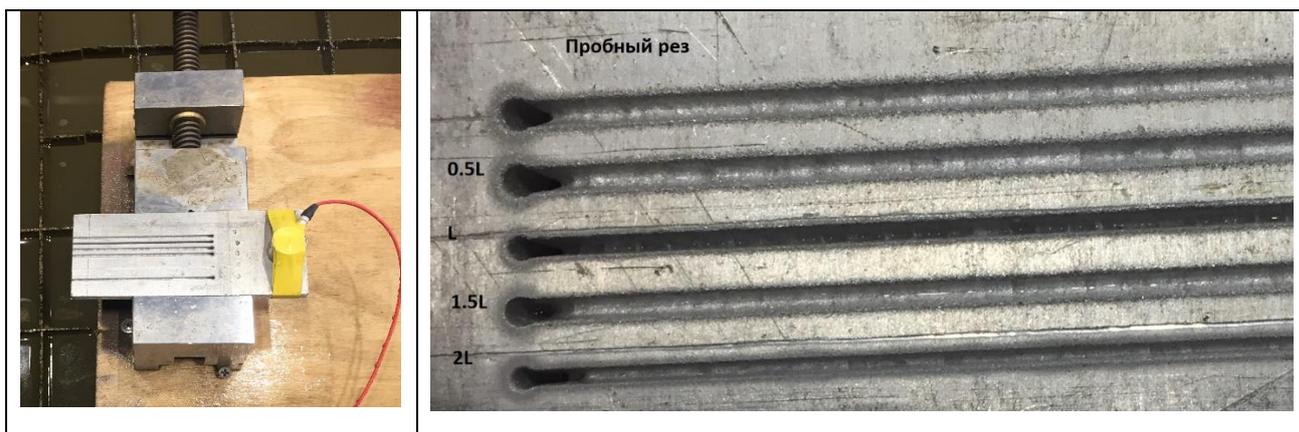


Рисунок 5. Фотоизображение схемы проведения эксперимента с измерением волн АЭ и результаты обработки образца (Д16Т) для рассматриваемых длин ФТ.

Следующим этапом исследования, с помощью микроскопа Carl Zeiss LSM700, были рассмотрены и получены 3Д модели образовавшихся каверн при использовании ФТ различной длины. В качестве примера их изображения и записи сигнала АЭ, представлен Рисунок 6.



Рисунок 6. 3Д модель каверны, полученная при концентрации абразива 10% при длине ФТ 0,5 L.

В эксперименте использовались различные марки отечественного абразива, в том числе одного состава, но разной зернистости отраженные на Рисунке 7.



Рисунок 7. Абразивные частицы, использованные в эксперименте

В результате полученных теоретических, расчетных и экспериментальных данных в заключении Главы 4 были построены зависимости глубины ГАР от длины ФТ, представленные на Рисунке 8.

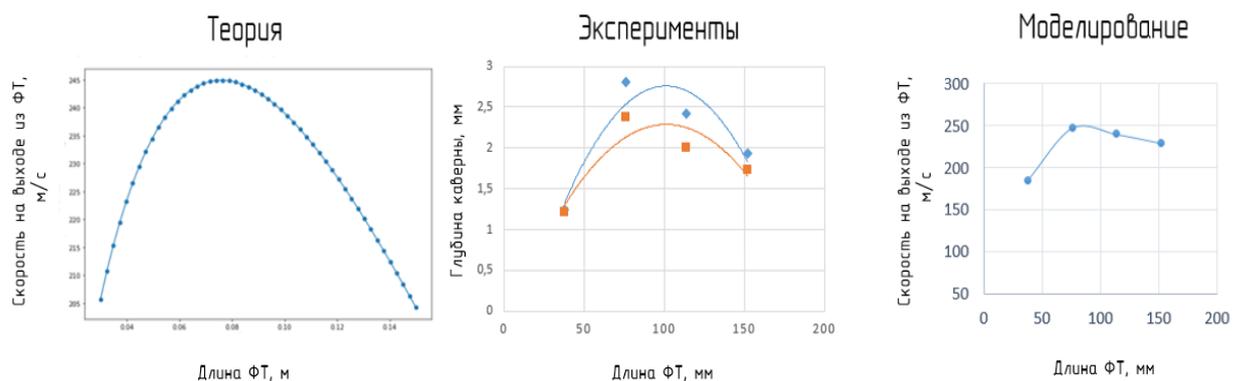


Рисунок 8. Сопоставления результатов моделирования, теоретических и экспериментальных исследований

В Главе 5 на основе результатов исследования, создана инженерно-технологическая методика определения оптимальной длины ФТ в зависимости от параметров абразивного материала. Разработана программа на языке программирования Python и использованием среды разработки Google collab. Программа предназначена для решения оптимизационной задачи по нахождению рациональной длины фокусирующей трубки при использовании различных абразивных материалов. Структурно, алгоритм создания и работа программы отражены в работе.

Входными данными для создания программы является файл Excel, с результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований, а именно: название абразивного материала, пределы значений основной фракции частиц, значение твердости по шкале Мооса, значение концентрации

абразивного материала в гидроабразивной струе, значения длин ФТ, а также, глубина и ширина полученных каверн. Следующим этапом работы являлась загрузка необходимых библиотек: для проведения расчетов, оценки работы алгоритма и функций для обработки входных данных. Для ускорения работы с входными данными была импортирована соответствующая библиотека. Расчет построен на применении алгоритма линейной регрессии. Линейная регрессия была обучена на предложенных данных. Метрика качества показала среднюю абсолютную ошибку в процентах 12% относительно целевой переменной, а коэффициент корреляции составил 0,93. В ходе обучения данной регрессии, были получены соответствующие ее коэффициенты, позволяющие вывести полином, описывающий поведение глубины каверны в зависимости данных, размещенных в признаковом пространстве. Поскольку искомая целевая переменная, длина ФТ, зависит от глубины образовавшейся каверны, что было доказано ранее, данную функцию можно использовать для поиска оптимальной длины ФТ при использовании различных абразивных материалов.

На основе данной методики осуществляется решение оптимизационной задачи. Результатом работы программы явились технологические рекомендации по стандартизации длины фокусирующей трубки для отечественного абразивного материала, отраженные Таблице 1.

Таблица1.

Рекомендации по стандартизации длины ФТ

Дисперсность абразивных частиц, мкм	Твердость абразивных частиц, Mohs	Рекомендуемая длина ФТ, мм	Прогноз глубины каверны
38-100	7,5	73,9	1,547
315-500	9,1	67,16	0,726
500-750	9,1	69,22	1,141
80-120	8,5	74,98	1,778
63-75	9	71,43	1,778
100-125	9	67,9	1,778
80-100	9	74,7	1,778
менее 15	10	74,76	0,848

Так же отражены перспективы развития методики определения оптимальной длины фокусирующей трубки по параметру наибольшей производительности гидроабразивного резания. Заложена задача создания

графического интерфейса для реализации возможности широкого применения данной программы. Оценена экономическая эффективность применения отечественного абразивного материала и поиска рациональной длины канала ФТ.

Основные результаты и выводы

По результатам выполненной диссертационной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. В результате экспертно-аналитического анализа возможностей совершенствования технологии ГАР установлено, что проблема определения оптимальной длины ФТ, которая представляет собой ключевое слагаемое процесса формирования гидроабразивной струи, является актуальной и весьма важной в научно-прикладном и технико-экономическом отношении, требующей комплексного решения.

2. В результате теоретических и экспериментальных исследований, результатов данных численного моделирования разработана инженерная методика оптимизации длины ФТ, которая легла в основу разработки программного обеспечения, позволяющая определить рациональную длину ФТ по критерию максимальной глубины каверны в зависимости от характеристик абразивного материала и технологических режимов ГАР.

3. С использованием возможностей конечно-элементного численного моделирования в среде Solidworks Flow Simulation рассмотрен процесс увеличения скорости движения эжектированных в «разгонный» канал ФТ абразивных частиц под действием струи жидкости. Задача моделирования реализована при заданных технологических условиях и режимах работы гидроустановки для ГАР. Результаты расчетов соответствуют данным феноменологической модели и экспериментальных исследований.

4. На основе выполненных экспериментальных исследований, анализа энергетического баланса ГАР и специфики изменения количества движения абразивно-жидкостной струи получены зависимости скорости струи и абразива на выходе из ФТ советующей длины с введением коэффициентов связи между градиентами изменения скоростей компонентов струи и твердофазных частиц абразива.

5. В результате сравнительно сопоставительных экспериментальных исследований ГАР с использованием отечественных абразивных материалов установлена их эффективность, определены значения шероховатости поверхности и осуществлено их ранжирование по данным критериям сравнения.

6. Обобщение имеющихся данных по стоимостным показателям технологии ГАР показало, что применения отечественных абразивных материалов в сочетании с оптимальной длиной ФТ дает преимущество по стоимостным показателям обработки в сравнении с импортными аналогами ~15%.

7. Результатом исследований является инженерно-технологическая методика определения оптимальной длины ФТ при использовании различных абразивных материалов, которая легла в основу разработки соответствующего программного обеспечения на языке программирования Python.

8. В лабораторно-производственных условиях проведена апробация результатов исследования. В частности, показана высокая физико-технологическая эффективность экспресс-оптимизации длины ФТ. Намечены перспективы развития исследований по совершенствованию аппарата анализа процессов формирования ГАУС его использования при решении научно-прикладных задач оптимизаций по ГАО-ГАР материалов и изделий.

Приложение включает материалы, не вошедшие в основные разделы работы

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Определение рациональной длины фокусирующей трубки для гидроабразивной резки материалов в производстве ракетно-космической техники / Д.Р. Мугла [и др.] // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2019. № 4 (265). С. 34-41.
2. Mugla D.R., Galinovskiy A.L., Kobernik N.V. Selection of rational technological modes and parameters of underwater waterjet cutting // Lecture notes in mechanical engineering. 2019. № 9783319956299. P. 267-276.
3. D. Mugla, M. Belov, A. Galinovskiy. Experimental determination of rational parameters and operating conditions during hydroabrasive processing and cutting of materials // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2171. Issue 1. DOI: 10.1063/1.5133333
4. Mugla D.R., Galinovskiy A.L., Golubev E.S. Surface express ultrajet diagnostics of space vehicle materials// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 . Vol. 683 . Issue 1 . Art.no 012050
5. Мугла Д.Р., Салас Кордеро С.К. Экспериментальный метод определения оптимальной длины фокусирующей трубки для гидроабразивной резки // Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. Москва. 2018. С. 156-159.
6. Белов В.А., Мугла Д.Р. Экспериментальные исследования по оценке возможности применения метода акустической эмиссии при оптимизации технологических режимов гидроабразивной резки// Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. Москва. 2018. С. 180-183.
7. Кинетический анализ механизма автоколебаний массовой концентрации дисперсно-твердофазных частиц в гидроультраструю / Д.Р. Мугла [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 1 (694). С. 55-62.

8. Экспериментальные исследования по выбору рациональных технологических режимов и параметров гидроабразивного резания в условиях эксплуатации в подводном положении / Мугла Д.Р. [и др.] //Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2018. № 7 (256). С. 3-9.
9. Вероятностный анализ результативности ультразвуковых гидрофизических технологий / Д.Р. Мугла [и др.] // Труды МАИ. 2018. № 101. С. 4.
10. Кинетический анализ механизма автоколебаний массовой концентрации дисперсно-твердофазных частиц в гидроультраструю / Д.Р. Мугла [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 1. С. 55.
11. Экспериментальное определение рациональных параметров элементов струеформирующего тракта установки подводной гидроабразивной резки материалов / Д.Р. Мугла [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 7 (68). С. 4-12.
12. Барзов А.А., Вельтищев В.В., Мугла Д.Р. Повышение функциональной результативности абразивно-жидкостного резания материалов путем оптимизации параметров струеформирующего тракта // Перспективные подходы и технологии проектирования и производства деталей и изделий аэрокосмической техники. 2017. С. 44-47.