

На правах рукописи

УДК 621.924.93

Илюхина Анна Андреевна

**РАЗРАБОТКА СТРУЕФОРМИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНЫХ  
ГИДРОАБРАЗИВНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОДВОДНОЙ  
ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.5.5 – технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2022г.

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: **Колпаков Владимир Иванович**  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Барсуков Геннадий Валерьевич**  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры машиностроения ФГБОУ ВО  
«Орловский государственный университет имени  
И. С. Тургенева», Орел

**Сидоров Михаил Игоревич**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры цифровых и аддитивных  
технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский  
технологический университет», Москва

Ведущая организация: АО «ГНПП «Регион», Москва

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022г. в \_\_\_\_\_ 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.

Телефон для справок: +7(499)267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Богданов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время при выполнении различных подводно-технических работ и/или для освоения ресурсов Мирового океана успешно применяются обитаемые и необитаемые подводные аппараты. Во многих случаях выполнение поставленных задач невозможно без оснащения подводного технического средства специализированным инструментом, способным осуществлять под водой резку разнообразных материалов. На сегодняшний день в подводной технике с этой целью применяются резачки различных типов, циркулярные и цепные пилы, перфораторы, сверлильные и фрезерные головки. Однако многолетняя практика использования традиционного подводного инструмента показала, что достаточно часто существующие традиционные технологии резки материалов под водой не позволяют выполнить требуемые работы из-за заклинивания инструментов. Кроме того, при необходимости выполнить ту или иную операцию под водой, заранее неизвестно, с каким материалом предстоит работать, какой толщины этот материал и какие сложности могут возникнуть в процессе обработки. В связи с этим приходится оснащать аппарат широким спектром режущего инструмента, который необходимо менять в процессе работы, что значительно усложняет и замедляет процесс обработки. Поэтому задача разработки новых методов резки, реализуемых в подводных условиях и обладающих универсальностью к обрабатываемому материалу и геометрии реза, является чрезвычайно актуальной.

Одной из технологий, способных решать поставленные задачи, является технология гидроабразивной резки (ГАР), реализующая фрагментацию любых элементов конструкций из различных материалов, включая их размерную обработку, например, под сварку, прошивку отверстий и т.п. Так как окружающая морская вода является неограниченным расходным материалом для ГАР, то реализация такой технологии в подводных условиях представляется вполне логичной и перспективной.

Ограниченность энергетики и мощности подводных аппаратов приводит к тому, что на работу гидроабразивной установки может быть выделено лишь 2...5 кВт мощности. Существенно меньшее значение мощности мобильных гидроабразивных установок по сравнению со стационарными не позволяет достичь высоких давлений в гидросистеме, что в совокупности с работой в более плотной среде (воде), значительно снижает эффективность работы таких установок по сравнению со стационарными. Указанная технология имела успешное применение иностранными компаниями, однако в доступных источниках нет рекомендаций по проектированию малогабаритных подводных мобильных установок, а также выбору их конструктивно-технологических параметров (КТП). Поэтому детальная отработка КТП представляет собой значительную научно-прикладную проблему, расширяет функциональные возможности ГАР материалов и изделий под водой и особенно актуальна в России, в том числе с точки зрения импортозамещения.

**Цель диссертационной работы** – обоснование рациональных конструктивно-технологических параметров струеформирующей системы

мобильных гидроабразивных установок, обеспечивающих эффективную подводную обработку конструкционных материалов.

**Объектом исследования** работы является струеформирующая система мобильной установки, обеспечивающая получение высокоскоростной гидроабразивной струи, представляющей собой универсальный инструмент, реализующий технологию гидроабразивной обработки.

**Предметом исследования** являются закономерности процессов, сопровождающих формирование, движение и взаимодействие с обрабатываемыми объектами высокоскоростных гидро- и/или гидроабразивных струй, функциональные возможности и особенности реализации технологии с их использованием под водой.

**Методы исследования.** В работе использовано физико-математическое моделирование гидроабразивной обработки (ГАО) с применением численных методов механики сплошной среды, реализованных в программном комплексе ANSYS / AUTODYN (основной метод исследования), и экспериментальные исследования функционирования мобильной гидроабразивной установки (ГАУ) в лабораторных условиях, имитирующих работу под водой.

**Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие теоретические и практические задачи:**

- показаны технологические возможности универсальной мобильной ГАУ, обеспечивающей, в рамках имеющихся ограничений по мощности, габаритам и длительности автономной работы, эффективную реализацию нескольких видов обработки различных конструкционных материалов (резку и прошивку) под водой;
- на базе программного комплекса ANSYS / AUTODYN выполнена разработка комплекса математических моделей и методик расчета процессов формирования струи гидроабразивной суспензии (рабочее тело) и прошивки отверстий в различных конструкционных материалах с учетом параметров окружающего пространства;
- исследованы особенности реализации технологии гидроабразивной обработки (формирование и движение струи, гидроудар, прошивка и резка разнообразных конструкций) под водой;
- разработаны практические рекомендации к КТП ГАУ (струеформирующей системе, условиям реализации технологии), обеспечивающим рациональные условия фрагментации обрабатываемых объектов в конкретных условиях вне зависимости от глубины погружения.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Разработаны и апробированы научно-методические рекомендации (методика) поэтапного моделирования на макро- и микроуровнях процессов формирования высокоскоростных гидро- и/или гидроабразивных струй и их (струй) последующего воздействия на заготовки из различных конструкционных материалов, основанные на численном решении взаимосвязанных задач механики сплошной среды в программном комплексе ANSYS / AUTODYN, в комплексе реализующих технологию гидроабразивной обработки под водой.

2. На основе разработанного методического аппарата выявлены существенные особенности, определяющие влияние КТП струеформирующего

тракта (геометрических характеристик, давления в гидросистеме, концентрации абразивных частиц, положения относительно заготовки) на особенности движения гидроабразивной суспензии по струеформирующему каналу, на интенсивность гидроудара в нем и на результативность гидроабразивной прошивки отверстий и резки металлических конструкций с учетом давления в окружающей водной среде.

3. Обоснованы рекомендации по выбору объемной концентрации гранатового песка (5...13 %) или электрокорунда (6,5...16%) при резке и прошивке отверстий в металлических конструкциях, а также по чередованию режимов использования жидкой и гидроабразивной суспензий в течение реализации технологического процесса и при включении и выключении ГАУ, способствующих увеличению длительности их автономной эксплуатации под водой.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в разработке физико-математических моделей формирования высокоскоростных гидро- и /или гидроабразивных струй и их последующего воздействия на заготовки из различных конструкционных материалов, а также в полученных результатах выполненного исследования с использованием численных методов механики сплошной среды на макро- и микроуровнях. При этом выявлены физические особенности движения микрочастиц абразива по струеформирующему каналу и их последующего взаимодействия с материалом обрабатываемой заготовки при прошивке отверстий. Кроме того, с использованием расчетных и экспериментальных данных определены аналитические соотношения, описывающие кинематические характеристики формируемой гидроабразивной струи, расход гидроабразивной суспензии и параметры, определяющие результативность ГАО (скорость прошивки, величину подачи при резке металлических конструкций) от давления в гидросистеме установки и в окружающей водной среде, объемной концентрации абразива в суспензии, физико-механических и геометрических характеристик абразива и свойств материалов обрабатываемых конструкций. Сформулированные рекомендации к технологическим параметрам системы могут найти непосредственное применение для реализации технологии подводного гидроабразивного резания объектов, находящихся в затопленном состоянии.

**Достоверность и обоснованность.** Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается применением современных программных средств и методик проведения расчетных и экспериментальных исследований, определяется обоснованностью используемых теоретических моделей и непротиворечивостью фундаментальным физическим законам, подтверждается соответствием известным теоретическим и экспериментальным данным.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Совокупность физико-математических моделей, адекватно описывающих гидроабразивную суспензию и процессы формирования и движения гидроабразивной струи, прошивки отверстий в разнообразных конструкционных материалах, находящихся в затопленном состоянии.
2. Результаты расчетов и выполненных экспериментов, позволяющие формировать пакет рациональных конструкторско-технологических решений и ранжировать степень их влияния на результативность ГАО под водой.

3. Выявленные в процессе исследования общие закономерности и характерные особенности исследуемых процессов, определяющих влияние КТП струеформирующего тракта и давления в окружающей водной среде на результативность гидроабразивной прошивки отверстий и резки металлических конструкций.

4. Практические рекомендации по структуре и условиям функционирования мобильных гидроабразивных установок, по назначению конструктивных параметров струеформирующего тракта мобильных ГАУ, по выбору технологических параметров реализации процесса подводной гидроабразивной резки.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на XLIII и XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства («Королевские чтения», Москва, 2019-2020 г.); Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019» в МГУ им. Н.В. Ломоносова (Москва, 2019 г.); XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2019 г.); II, III и IV Международных молодежных конференциях «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники» в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2018-2020 г.) [6, 12, 13] и XVII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021)» в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Москва, 2021 г.) [14].

Результаты работы использованы при выполнении ОКР «Свеклокомбайн» (М4-270) и внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Публикации.** По результатам исследования опубликовано 14 научных работ [1-14] в отечественных научных журналах, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ [2, 5, 11] и 3 статьи в журналах, индексируемых в базе данных SCOPUS [4, 7, 10]. Подана заявка на изобретение №2021118225 [15]. Общий объем публикаций 104 с. (6,55 п.л.).

**Личный вклад** соискателя состоит в разработке и обосновании научных положений диссертации; в создании и реализации численных методик поэтапного расчета процессов подводной гидроабразивной прошивки отверстий и резки металлических объектов; в непосредственном осуществлении математического моделирования на ЭВМ; в анализе, теоретической интерпретации и обобщении полученных результатов; в проведении экспериментальных исследований и разработке практических рекомендаций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы из 83 наименований. Работа содержит 126 страницы машинописного текста, включая 19 таблиц и 71 рисунок.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации; определены объект и предмет исследования; сформулированы цель, задачи и выбран

метод исследования; изложены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы; представлена структура работы.

**В первой главе** приведен перечень работ, которые могут быть выполнены в полевых условиях, в том числе под водой, при помощи гидроабразивной технологии. Приведены примеры успешного применения этих технологий и их преимущества над традиционными методами обработки. Обозначено, что среди организаций, занимающихся изучением подводной ГАО в России, можно выделить ФГУП ЦНИИХМ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова, НИАТ, АО «ГНПП «Регион». Описаны исследования процессов ГАО, проведенные на сегодняшний день, в том числе отмечен вклад в эту область таких ученых, как Тихомиров Р.А., Петухов Е.Н., Хашиш М., Решетников М.К., Жабин А.Б., Иванов В.В., Кивисто Б., Дурнбос Р., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Тарасов В.А., Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Колпаков В.И. и других.

Отмечено, что особенностью мобильных гидроабразивных установок, применяемых под водой, является ограниченность их мощности, что влияет на максимально достижимое давление в струеформирующей системе:

$$N = \frac{pQ}{60\kappa} \leq 2 \dots 5 \text{ кВт},$$

где  $p$  – давление в гидросистеме, МПа;  $Q$  – расход жидкости, л/мин;  $\kappa = 0,85 \dots 0,95$  – КПД установки.

**Вторая глава** посвящена разработке методических основ расчета процессов гидроабразивной обработки мобильной ГАУ. При этом показано, что процесс подводной ГАО можно рассчитывать как на макроуровне, принимая гидроабразивную струю однофазной жидкостью, плотность которой зависит от концентрации абразива в суспензии, так и на микроуровне, моделируя суспензию двухфазной средой, включающей воду и отдельные абразивные частицы. Исследования, проводимые на макроуровне, позволяют определить:

- влияние геометрических параметров струеформирующей системы на скорость гидроабразивной струи, расход гидроабразивной суспензии и интенсивность гидроудара в струеформирующем канале в процессе реализации ГАО под водой;

- влияние концентрации абразива в гидроабразивной суспензии, кинематических параметров гидроабразивной струи и физико-механических характеристик обрабатываемых материалов на эффективность прошивки и резки металлических конструкций.

Исследования, проводимые на микроуровне, позволяют:

- выявить влияние числового значения объемной концентрации абразивных частиц в суспензии, их (частиц) геометрических, физико-механических параметров и месторасположения в струе (внутри по всему объему, что характерно для мобильных установок, или снаружи вдоль образующей, что характерно для стационарных установок) на особенности процесса прошивки отверстий в металлических конструкциях;

- установить особенности движения абразивных частиц в процессе формирования гидроабразивной струи и выявить взаимосвязь концентрации гидроабразивной суспензии и чередования режимов ее подачи и подачи воды в

струеформирующий канал с вероятностью засорения последнего.

Численное моделирование основано на применении уравнений адиабатического движения сжимаемой упругопластической среды, уравнений состояния твердого тела и гидроабразивной суспензии, а также уравнений, задающих начальные и граничные условия.

Верификация разработанных математических моделей проводилась посредством сравнения результатов численного моделирования с известными аналитическими решениями и экспериментальными данными.

**В третьей главе** представлены результаты исследования ГАО на макроуровне, которое выполнялось в несколько этапов. При этом на первом этапе анализировалась взаимосвязь давления в гидросистеме, геометрических параметров внутреннего профиля и выходного диаметра фокусирующей трубки со скоростью формируемой гидроабразивной струи, глубиной ее проникновения в воду, а также со степенью влияния сжимаемости и с расходом гидроабразивной суспензии. На втором этапе исследовались особенности процесса прошивки отверстий в металлических конструкциях гидроабразивной струей, а на третьем этапе — эффект гидроудара в струеформирующем канале при реализации ГАО под водой.

В процессе реализации первого этапа в рамках расчетной схемы, представленной на Рисунке 1 слева, разработана математическая модель формирования струи с учетом сжимаемости гидроабразивной суспензии, находящейся под давлением  $p = 60 \dots 90$  МПа. Задача решалась в двумерной осесимметричной постановке на неподвижной (эйлеровой) сетке методом крупных частиц с выделением контактных границ между взаимодействующими средами.

В результате выполненных численных расчетов показано, что внутренний профиль и выходной диаметр фокусирующей трубки не оказывают существенного влияния на осевую составляющую скорости истекающей струи, а сжимаемостью формируемого потока можно пренебречь. При этом достоверность полученных результатов подтверждена соответствием расчетных значений скорости значениям, определенным по формуле Бернулли. Кроме того показано, что с точки зрения величины расхода гидроабразивной суспензии, стабильности формируемого гидроабразивного потока и глубины его проникновения в окружающую водную субстанцию, находящуюся под давлением  $p_c = 10 \dots 30$  МПа, оптимальным является диаметр струеформирующего канала  $d_s$ , приблизительно равный 0,4 мм.

На основании предположения о том, что распределение скоростей по сечению цилиндрического канала, приведенное на Рисунке 1, справа, имеет вид параболы (максимальное значение осевой составляющей скорости принимает на оси симметрии, а минимальное — у стенок канала) предложена зависимость расхода жидкой составляющей гидроабразивной суспензии от диаметра сопла, объемной концентрации абразива и скорости истечения суспензии.

$$Q = \eta \cdot 60\pi \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 V_c.$$

Здесь  $d_s$ , (мм) и  $V_c$  (мм/мкс) – диаметр выходного отверстия и скорость истечения гидроабразивной суспензии из струеформирующего канала соответственно;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий объемную концентрацию абразива в суспензии и неравномерность распределения осевой составляющей скорости по радиусу формируемого струйного течения. В общем случае этот коэффициент можно рассчитать по формуле

$$\eta = (1 - K_{V_a}) \frac{V_R R + \pi R (V_c - V_R) / 4}{V_c R} = (1 - K_{V_a}) \frac{V_R + \pi (V_c - V_R) / 4}{V_c},$$

где  $K_{V_a}$  – объемная концентрация абразива;  $R = d_c / 2 \approx d_s / 2$  – радиус струи ( $d_c$  – диаметр струи);  $V_c$  и  $V_R$  – продольные составляющие скорости формируемого струйного течения на оси симметрии и на периферии соответственно. При  $K_{V_a} = 0$  и  $V_R = V_c$  имеем  $\eta = 1$ , при  $K_{V_a} = 0,11$  и  $V_R = V_c$  –  $\eta = 0,89$ , при  $K_{V_a} = 0,11$  и  $V_R = V_c / 2$  –  $\eta = 0,7945$  и при  $K_{V_a} = 0,11$  и  $V_R = 0$  –  $\eta = 0,7$ .

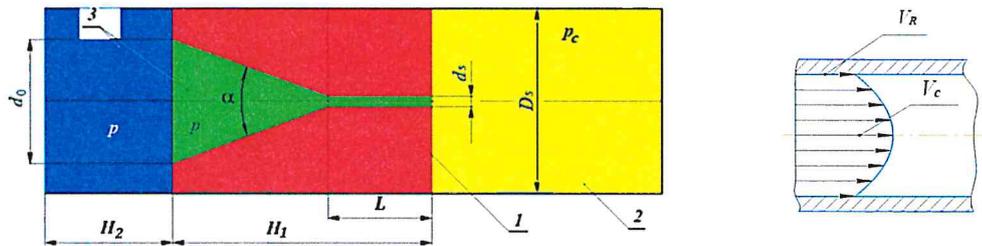


Рисунок 1. Параметрическая схема формирования струи гидроабразивной суспензией (слева): 1 – сопловой блок; 2 – окружающая среда (вода под давление  $p_c$ ); 3 – вода с абразивом под давлением  $p$ ; и распределение вектора скорости по сечению струеформирующего канала (справа)

Задача прошивки отверстий в конструкционных материалах также решалась в двумерной осесимметричной постановке в эйлеровых координатах. С целью определения влияния параметров режущей струи, таких как ее скорость, диаметр и концентрация в ней абразивных частиц, а также физико-механических свойств обрабатываемого материала, на время и скорость прошивки отверстий, использовалась параметрическая расчетная схема, представленная на Рисунке 2, слева. Для описания разрушения металлических элементов конструкции под действием струи использовался критерий предельных пластических деформаций  $\epsilon_p = \epsilon_p^*$  ( $\epsilon_p$  – интенсивность деформаций,  $\epsilon_p^*$  – предельная пластическая деформация – подбиралась расчетным путем). После достижения указанного условия разрушенная субстанция ведет себя как сыпучее твердое тело. В качестве преграды на данном этапе рассматривалась пластина из алюминиевого сплава АМгб толщиной  $h_M = 4$  мм. В процессе исследования осуществлялось варьирование скоростью ( $V_c$ ) и диаметром ( $d_c$ ) гидроабразивной струи, плотностью суспензии ( $\rho_c$ ), критическими условиями разрушения обрабатываемого материала ( $\epsilon^*$ ), которые принимали следующие числовые значения:  $d_c = 0,28 \dots 0,6$  мм;  $V_c = 0,2 \dots 0,5$  км/с,  $\rho_c = 1,00 \dots 1,15$  г/см<sup>3</sup>;  $\epsilon^* = 0,01 \dots 0,001$ .

В результате проведенного исследования выявлено три фазы процесса прошивки отверстий (см. Рисунок 2, справа). А именно: формирование сквозной

трещины (1-я фаза), начало проникновения суспензии за тыльную сторону преграды (2-я фаза), формирование сквозного отверстия, диаметр которого соответствует диаметру режущей струи (3-я фаза). Оценка влияния перечисленных характеристик на интенсивность процесса обработки показала, что диаметр режущей струи не оказывает существенного влияния на скорость прошивки отверстий, а при резке целесообразно применять сопла меньших диаметров. Кроме того, было показано, что снижение времени обработки обеспечивается увеличением скорости режущей струи и повышением концентрации абразивных частиц в суспензии.

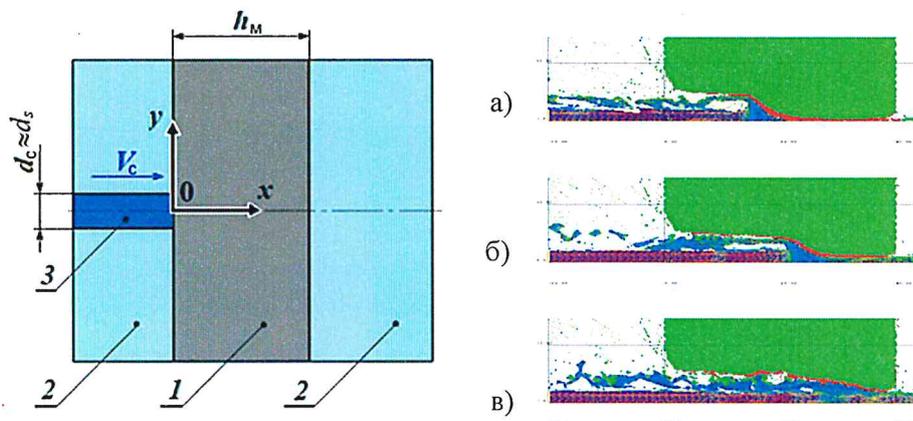


Рисунок 2. Параметрическая схема процесса прошивки (слева): 1 – преграда, 2 – вода, 3 – суспензия; и стадии развития процесса прошивки отверстия гидро- и гидроабразивной струей (справа): а – формирование сквозной трещины, б – проникновение суспензии за преграду, в – формирование отверстия

В случае применения технологии ГАО под водой, имеет место эффект гидроудара. В целях оценки степени влияния этого эффекта на реализацию технологических процессов ГАО, разработан комплекс параметрических схем (см. Рисунок 3 и Рисунок 4). Разработанные модели позволяют исследовать влияние скорости и плотности гидроабразивной суспензии, расстояния от среза сопла до преграды, угла отклонения вектора скорости струи от нормали к поверхности заготовки и длины струеформирующего канала на интенсивность гидроудара, оцениваемого амплитудой ударных волн вдоль канала в процессе обработки.

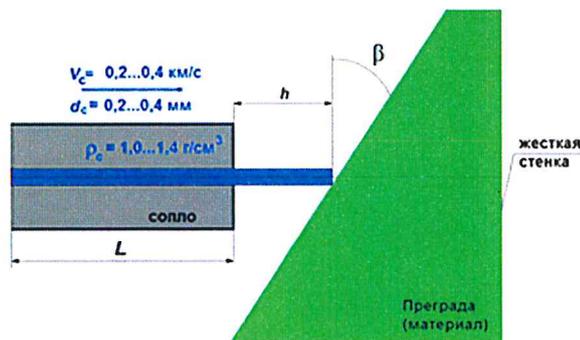


Рисунок 3. Параметрическая схема исследования гидроудара в двумерной плоской и трехмерной постановках

В результате выполненного численного исследования с использованием разработанных и описанных выше расчетных схем показано, что интенсивность

гидроудара при подводной ГАО зависит от длины струеформирующего канала, а его интенсивность может быть снижена путем подбора технологических параметров. А именно: путем увеличения угла между осью струи и нормалью к обрабатываемой поверхности или увеличением расстояния от среза сопла до преграды. Однако в силу того, что скорость струи с увеличением расстояния до преграды снижается, а наибольшее давление возникает в струеформирующем канале в моменты времени, близкие к началу соударения струи с обрабатываемым материалом, предлагается включать систему заранее и плавно подводить сопло с истекающей струей к преграде под небольшим углом  $\pm 5^\circ$ .

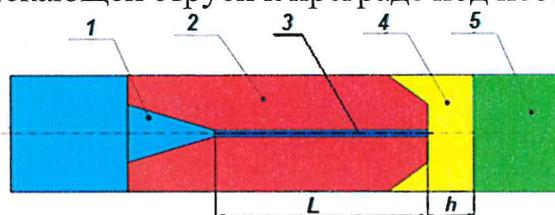


Рисунок 4. Параметрическая схема для оценки степени влияния длины струеформирующего канала на интенсивность гидроудара в нем, где 1 – гидроабразивная суспензия под давлением, 2 – сопло, 3 – формируемое струйное течение, 4 – окружающая среда (вода), 5 – обрабатываемый материал

В четвертой главе приведены результаты расчетного исследования технологии прошивки отверстий с использованием двухфазной среды, позволяющего на микроуровне определить особенности влияния объемной концентрации абразива в суспензии, геометрических и физико-механических параметров абразивных частиц на особенности процесса формирования струи и скорость прошивки отверстий в конструкциях из разнообразных материалов. При этом показано, что форма частиц не оказывает существенного влияния на глубину их проникновения в обрабатываемый материал, и расчетным путем обоснована возможность использования двумерной осесимметричной расчетной схемы, схематично показанной на Рисунке 5, для анализа операции прошивки отверстий гидроабразивной струей. Поставленная задача решалась численно на примере прошивки металлических конструкций совместным эйлеро-лагранжевым методом (СЭЛ) в ANSYS / AUTODYN.

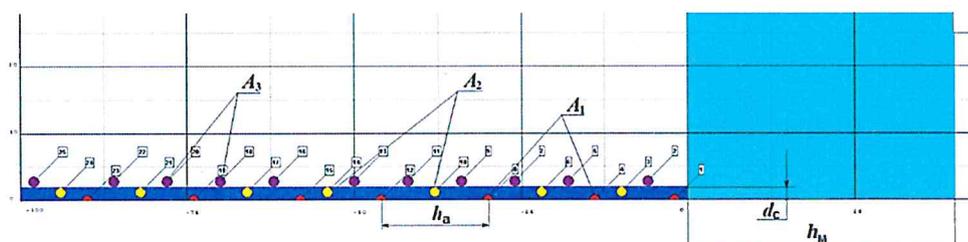


Рисунок 5. Расчетная схема прошивки отверстий гидроабразивной струей с использованием двухфазной модели (на микроуровне)

Учитывая, что в реальных условиях количество абразивных частиц достаточно велико, и частотность их соударения с преградой исчисляется миллионами штук в секунду, ударное взаимодействие, показанное на Рисунке 6, удалось описать путем применения пользовательской системы отсчета, использующую размерности мм, мг, мкс. В этом случае, задаваясь

расходом суспензии ( $Q$ , л/мин), объемной концентрацией абразивных частиц в суспензии ( $K_{Va}$ , %) и средним диаметром абразивных частиц ( $D_{mesh}$ , мм), по формуле (1) можно определить количество частиц, взаимодействующих с обрабатываемым объектом в единицу времени (1 мкс).

$$N_{mesh} = \frac{Q}{6 \cdot 10^6} \cdot \frac{K_{Va}}{V_{mesh}}, \quad (1)$$

где  $V_{mesh} = 4/3 \pi (D_{mesh}/2)^3$  – объем микрочастицы. Тогда, зная скорость струи ( $V_c$ , мм/мкс), по формуле (2) нетрудно рассчитать расстояние между частицами ( $h_a$ , мм)

$$h_a = \frac{N_{mesh} \cdot V_c}{n}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество частиц, приходящихся на диаметр струи.

Особенностью работы мобильных установок является то, что в отличие от стационарных, формирование режущей струи в них происходит из суспензии, уже содержащей абразив. Вследствие этого частицы абразива располагаются равномерно по всему объему струи (см. Рисунок 6, а, б), а не на ее периферии (см. Рисунок 6, д). В связи с этим, анализ влияния структуры гидроабразивной струи на характер взаимодействия с обрабатываемым материалом проводился для трех возможных «конфигураций» режущей струи: абразивные частицы находятся внутри струи (что характерно для мобильных установок ГАО), абразивные частицы располагаются снаружи струи (что характерно для стационарных установок ГАО) и промежуточный вариант, при котором частицы находятся как внутри струи, так и на ее поверхности.

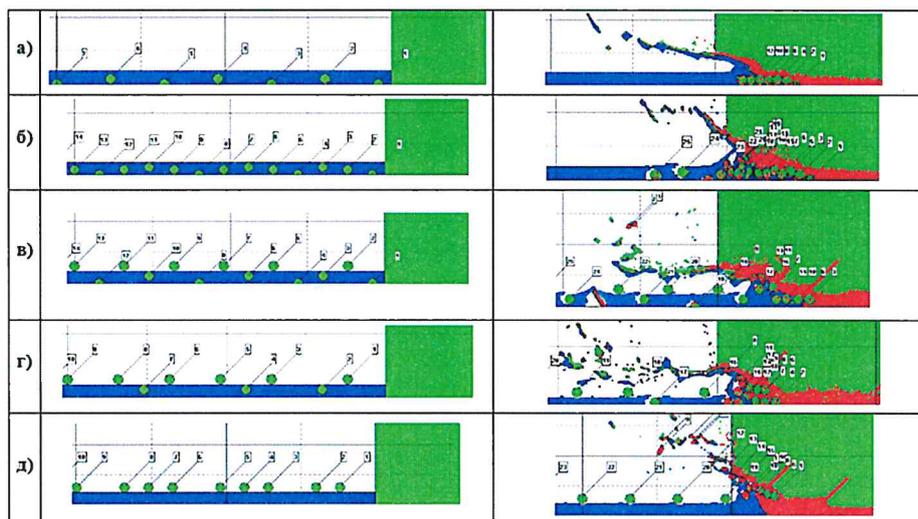


Рисунок 6. Характер взаимодействия гидроабразивной струи с обрабатываемым материалом в зависимости от концентрации и способа подачи абразивных частиц в струю (красным цветом выделены области разрушенного материала обрабатываемого объекта)

В результате выполненных расчетов показано, что при осуществлении ГАО мобильными установками, режущая струя которых формируется за счет истечения из сопла гидроабразивной суспензии, существенно возрастает вероятность засорения прошиваемого отверстия абразивом по сравнению с обработкой на традиционных стационарных установках, в которых абразив подмешивается в

сформированную струю посредством эффекта эжекции (см. Рисунок 6). В этом случае частицы, движущиеся внутри струи, при соударении с преградой затормаживаются и не вымываются из формируемого отверстия, создавая предпосылки к его засорению. Кроме того, установлено, что при наличии в струе абразивных частиц, она в процессе своего движения к обрабатываемому объекту превращается из однородной в кавитирующую жидкость.

Для исследования характера набора скорости гидроабразивными частицами при движении по струеформирующему каналу на микроуровне, в параметрическую схему, показанную на Рисунке 1, добавлены лагранжевы частицы (см. Рисунок 7).

В результате выполненных расчетов удалось установить особенности движения абразивных частиц в процессе формирования гидроабразивной струи. При этом показано, что удлинение сопла не способствует увеличению скорости абразивных частиц (см. Рисунок 8). Для снижения времени набора абразивом максимальной скорости, равной скорости движущейся жидкости, рекомендуется предварительно включить подачу в сопло чистой воды без абразива. Показано также, что в целях снижения риска засорения сопла рекомендуется понизить объемную концентрацию абразива и чередовать подачу чистой воды и гидроабразивной суспензии с частотой переключения режимов в соотношении 2:1 (20...30 с – подача воды, 10...15 с – подача гидроабразивной суспензии), а для предотвращения засорения струеформирующего канала при выключении установки, рекомендуется перед выключением насоса осуществить подачу через сопло воды без абразива.

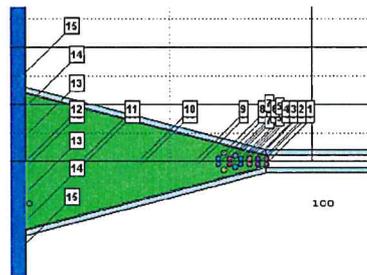


Рисунок 7. Расчетная схема формирования струи при использовании двухфазной модели гидроабразивной суспензии (на микроуровне)

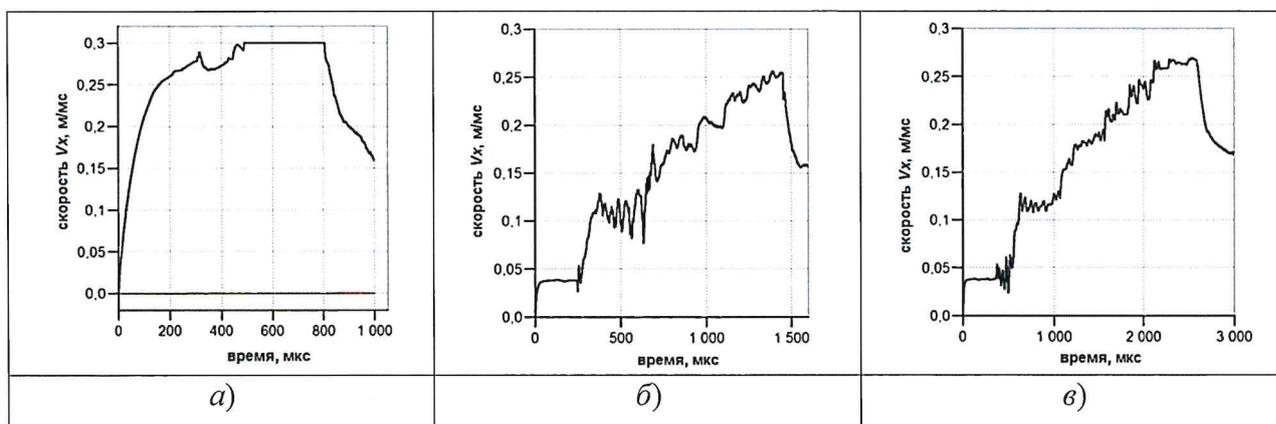


Рисунок 8. Набор скорости сферической абразивной частицей при движении в коротком (а) струеформирующем канале без противодействия, в коротком (б) и длинном (в) струеформирующих каналах с противодействием

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований операций прошивки отверстий в стальной заготовке и резки металлических пластин под водой. Выполнено обобщение результатов комплексных расчетных и экспериментальных исследований, на основании которых предложены варианты конструктивного исполнения струеформирующих сопел, а также рассмотрены возможные технологии их изготовления. С учетом давления в окружающей водной среде выявлена совокупность КТП струеформирующего тракта — геометрических характеристик (формы внутренней поверхности, длины и диаметра струеформирующего канала), давления в гидросистеме, концентрации абразивных частиц (гранатового песка или корунда), положения относительно заготовки, — обеспечивающих рациональные условия подводной фрагментации (прошивки, резки) обрабатываемых объектов в конкретных условиях работы.

Предложена модификация функциональной схемы ГАУ (см. Рисунок 9), в которой рабочий цикл функционирования складывается из следующих этапов:

- 1) включение установки – подача через сопло воды без абразива, выход на рабочее давление;
- 2) прошивка – чередование подачи воды и гидроабразивной суспензии с частотой переключения режимов 10...15 секунд.
- 3) выключение установки – подача через сопло воды без абразива.

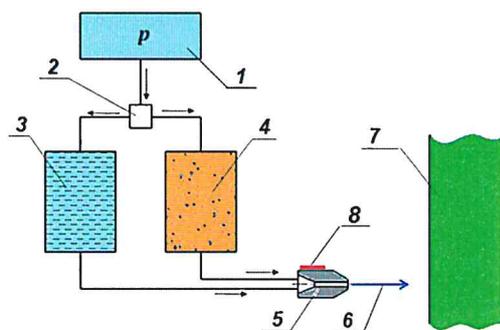


Рисунок 9. Схема модернизированной мобильной ГАУ, где 1 – насос высокого давления, 2 – клапан-переключатель, 3, 4 – баки с водой и суспензией, 5 – струеформирующая трубка, 6 – режущая струя, 7 – преграда, 8 – пьезоэлектрический датчик

Для осуществления контроля над завершением операции прошивки отверстий или резки конструкций в условиях ограниченной видимости предложено устанавливать на сопло или непосредственно в воду пьезоэлектрический датчик, улавливающий акустические колебания (поз. 8 на Рисунке 9).

На основании выполненных расчетных и экспериментальных исследований, получены аналитические зависимости, описывающие влияние параметров технологического процесса на скорость прошивки отверстий в стальной преграде и подачу, для резки металлических пластин

$$U_x = U_p U_3 = [0,015p + U_c(K_{V\alpha})]U_3 \quad (3)$$

Здесь  $U_p = 0,015p + U_c(K_{V\alpha})$  – безразмерная функция, определяющая скорость прошивки от давления в гидросистеме ( $p$ , МПа) и объемной концентрации абразивных частиц в суспензии ( $K_{V\alpha}$  %);  $U_0 = 6,6$  мм/мин – нормирующий экспериментальный коэффициент;  $U_c(K_{V\alpha})$  – безразмерная константа, определяющая степень влияния объемной концентрации абразива на скорость прошивки и рассчитываемая по формуле

$$U_c(K_{V\alpha}) = -36 \cdot 10^{-5} K_{V\alpha}^2 + 0,02193 K_{V\alpha} - 0,184.$$

С учетом (3) подачу для подводной гидроабразивной резки ( $S$ , мм/с), предложено рассчитывать по формуле

$$S = k_3 U_p \cos(\beta) / h. \quad (4)$$

Здесь  $h$ , мм – толщина пластинчатой заготовки;  $\beta$  – угол встречи (угол отклонения вектора скорости струи от нормали к поверхности заготовки);  $K_3$  – экспериментальный коэффициент (для стали 3  $K_3 = 1,1$ ; для сплава титана ВТ5 – 4,3; для алюминиевого сплава Д16Т – 3,5 и для резины – 22,3).

Результаты расчетов по формулам (3) и (4) в сравнении с экспериментальными данными представлены на Рисунке 10 и в Таблице 1. Максимальная ошибка представленного сравнения не превышает  $\pm 3\%$ .

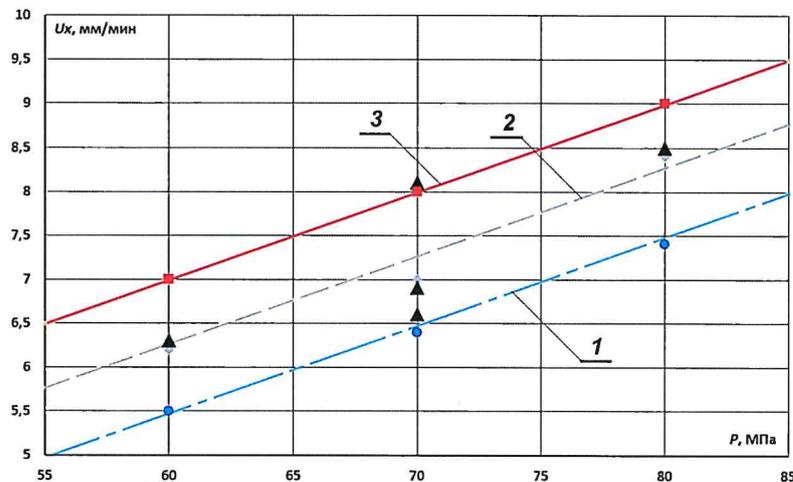


Рисунок 10. Результаты расчетов (прямые 1, 2 и 3) по формуле (3) для  $K_{V\alpha} = 5,2, 13$  и 30% соответственно; ■, ◆, ● – экспериментальные данные; ▲ – расчетные данные

Таблица 1

Результаты расчетов подачи по формуле (4) при резке под водой в сравнении с экспериментальными данными

№ п/п	$K_{V\alpha}$ %	$S$ , мм/с (расчет/эксперимент) ( $p = 60$ МПа)			
	Материал	Сталь 3	ВТ5	Д16Т	Резина
1	30	0,15	1,13	0,62	1,69
2	13	0,13 / 0,13	1,0 / 1,0	0,55 / 0,55	1,5 / 1,5
3	5,2	0,1	0,87	0,48	1,31

С учетом данных, представленных в Таблице 1, можно оценить результативность резки пластин из разных металлов и резины под водой,

см. Таблицу 2, в которой введены следующие обозначения:  $L_p$  – длина реза в пластине,  $T$  – расчетное время реализации операции резки при разном объеме резервуара с песком и объемной концентрации абразива в суспензии.

Таблица 2

Оценка результативности подводной гидроабразивной резки

Абразив	$K_{V\alpha}$ , %	$T$ , мин	$L_p$ , мм			
			Сталь 3 (8 мм)	ВТ5 (4 мм)	Д16Т (6 мм)	Резина (14 мм)
Гранат. песок (1 литр) $\rho_a = 2,38 \text{ г/см}^3$	30	2,7	24	185	102	277
	13	4,6	36	281	155	421
	5,3	10,2	69	537	296	803
Гранат. песок (5 литров) $\rho_a = 2,38 \text{ г/см}^3$	30	13,7	119	925	509	1383
	13	23,4	182	1407	775	2104
	5,2	51,1	346	2683	1478	4013
Эл. корунд (1 литр) $\rho_a = 2,1 \text{ г/см}^3$	37	2,4	21	164	90	246
	16	3,9	32	245	135	367
	6,5	8,3	58	448	247	669

Анализ данных, представленных на Рисунке 10 и в Таблице 1 показывает, что операция прошивки отверстий более трудоемка, чем операция резки, т.к. реализуется с меньшей скоростью. Действительно, в первом случае скорость прошивки стальной пластины при концентрации абразива 13% составляет  $\sim 7$  мм/мин, а во втором случае при тех же параметрах струи подача при резке составляет  $0,13 \text{ мм/с} \approx 8 \text{ мм/мин}$ . Из этого следует, что для снижения временных затрат на прошивку ее следует осуществляться при большей концентрации абразива. Кроме того, из данных Таблицы 2 видно, что при меньшей насыпной плотности абразива разделительные операции менее производительны (см. гранат (1 литр)  $\rho_a = 2,38 \text{ г/см}^3$  и корунд (1 литр)  $\rho_a = 2,1 \text{ г/см}^3$ ).

### Основные выводы работы

1. Показана высокая эффективность гидроабразивной обработки, в качестве многофункционального инструмента которой выступает высокоскоростная гидро- и / или гидроабразивная струя, способная в едином компактном комплексе в рамках ограничений по мощности (до 2...5 кВт), габаритам и длительности автономной работы реализовать выполнение разнообразных технологических операций (резку и прошивку) под водой.

2. Разработаны и апробированы научно-методические рекомендации (методика) поэтапного моделирования на макро- и микроуровнях процессов формирования высокоскоростных гидро- и /или гидроабразивных струй и их (струй) последующего воздействия на заготовки из различных конструкционных материалов, основанные на численном решении взаимосвязанных задач механики сплошной среды в программном комплексе ANSYS / AUTODYN, в комплексе реализующих технологию гидроабразивной обработки под водой.

3. На основе разработанного методического аппарата выявлены существенные особенности, определяющие влияние конструктивно-технологических параметров струеформирующего тракта и давления в окружающей водной среде на результативность гидроабразивной прошивки отверстий и резки металлических конструкций с учетом давления в окружающей водной среде.

4. Определены аналитические соотношения, описывающие кинематические характеристики формируемой гидроабразивной струи, расход гидроабразивной суспензии и параметры, определяющие результативность гидроабразивной обработки (скорость прошивки, величину подачи при резке металлических конструкций) от давления в гидросистеме установки и в окружающей водной среде, объемной концентрации абразива в суспензии, физико-механических и геометрических характеристик абразива и свойств материалов обрабатываемых конструкций.

5. Обоснованы конструктивно-технологические параметры струеформирующего тракта гидроабразивной установки.

- Показано, что для установок мобильного типа, в которых давление в гидросистеме находится в пределах 60...100 МПа, оптимальная величина диаметра ( $d$ ) струеформирующего канала составляет 0,4 мм, а его длина ( $L$ ) не должна превышать  $L = (25...50) d$ . В этом случае формируемая струя гидроабразивной суспензии отвечает условиям компактности на значительном удалении от тыльной поверхности струеформирующего тракта, обращенной к обрабатываемой заготовке. С увеличением длины канала до  $L \geq 50d$ , растет вероятность гидроудара и засорения канала частицами абразива в течение реализации технологического процесса и в момент выключения установки.

- Обоснована целесообразность чередования режимов использования воды и гидроабразивной суспензий в течение реализации технологического процесса и при включении и выключении установки.

- Показано, что для типовых стационарных установок рациональная длина струеформирующего канала существенно выше, чем у мобильных установок. Например, для установок с давлением в гидросистеме 400 МПа его величина составляет  $L \approx 100d$  и продолжает расти с ростом давления в гидросистеме.

6. Экспериментально установлено и теоретически подтверждено, что в рамках имеющихся ограничений по мощности и габаритам гидроабразивной установки с целью увеличения длительности ее автономной эксплуатации под водой следует использовать гидроабразивные смеси с объемной концентрации гранатового песка (5...13 %) или электрокорунда (6,5...16%). При этом меньшие значения концентрации из указанного диапазона рекомендуется использовать для резки, а более высокие – для прошивки отверстий.

7. Показано преимущество использования составной конструкции струеформирующего тракта в установках, реализующих гидроабразивную обработку под водой, по сравнению со стандартной фокусирующей трубкой.

Выявлено влияние отдельных элементов составной конструкции на характер формирования струи в процессе функционирования установки и возможность снижения расхода гидроабразивной суспензии в 1,5 раза при идентичном давлении в гидросистеме.

8. Показано, что расстояние между срезом сопла и обрабатываемой заготовкой при реализации подводной гидроабразивной резки должно составлять  $\sim 5 \dots 10$  диаметров струеформирующего канала. Указанные значения минимизируют эффект гидроудара в струеформирующем канале и при покачивании инструмента в диапазоне углов  $-5^\circ \dots +5^\circ$  способствуют более интенсивному удалению гидроабразивных частиц из формируемого отверстия, что существенно увеличивает результативность обработки.

9. Показано, что при выполнении подводных работ, особенно в условиях плохой видимости, для определения начала и окончания операции целесообразно использовать пьезоэлектрические датчики, улавливающие акустические колебания и устанавливаемые на струеформирующий тракт или фиксируемые в воде.

10. Полученные и представленные результаты интегрированы в конструкцию первой российской мобильной установки, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана для реализации подводной гидроабразивной обработки.

#### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Илюхина А.А. Численное моделирование процесса гидроабразивной резки сотовых панелей летательных аппаратов // Молодежный научно-технический вестник. 2017. № 7. С.13. (0,06 п.л.)

2. Экспериментальное определение рациональных параметров элементов струеформирующего тракта установки для подводной гидроабразивной резки материалов / А.А. Илюхина [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 7(68). С.4-12. (0,56 п.л./ 0,11 п.л.)

3. Особенности процесса гидроабразивной резки сотовых панелей космических аппаратов / А.А. Илюхина [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2018. № 4. С.101-107. (0,44 п.л./ 0,11 п.л.)

4. The features of hydroabrasive cutting of honeycomb panels of space vehicles / A.A. Ilyukhina [et al] // Moscow University Physics Bulletin. 2018. Vol.73. No 4. Pp.441-446. (0,36 п.л./ 0,09 п.л.)

5. Анализ взаимосвязанности функционально-физических возможностей аддитивных и ультраструйных технологий / А.А. Илюхина [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. №3 (329). С.73-81. (0,56 п.л. / 0,09 п.л.)

6. Анализ возможностей глубоководного применения ультраструйных гидрофизических технологий / А.А. Илюхина [и др.] // Сборник трудов II Международной молодежной конференции : Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. М.: Диона, 2018. С.100-105. (0,32 п.л./ 0,08 п.л.)

7. Ilyukhina A.A., Kolpakov V.I. Specifics of mathematical modeling of erosion of structures made out of different materials by high-speed hydro-abrasive water jet // AIP Conference Proceedings. Published Online: 15 November 2019. Pp.170002-1—170002-6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5133313>. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)

8. Илюхина А.А., Колпаков В.И. Особенности математического моделирования разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 9 (93) С.1-8. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-9-1913. (0,50 п.л./ 0,25 п.л.)

9. Разработка физико-математической модели функционирования гидроабразивной установки подводного резания / А.А. Илюхина [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2020. № 2. С.53-59. (0,45 п.л./ 0,09 п.л.)

10. The Development of a Physico-Mathematical Model for the Functioning of an Underwater Waterjet Cutting Machine / A.A. Ilyukhina [et al] // Moscow University Physics Bulletin. 2020. Vol. 75. No 2. Pp.167-174. (0,50 / 0,10 п.л.)

11. Илюхина А.А., Колпаков В.И., Вельтищев В.В. Обоснование конструктивных параметров составного струеформирующего сопла для мобильных установок подводной гидроабразивной резки / Известия высших учебных заведений. Машиностроение (Раздел: машиностроение и машиноведение. Рубрика: технология и оборудование механической и физико-технической обработки. 2021. № 4(733). С.30-39 DOI: 10.18698/0536-1044-2021-4-30-39. (0,66 п.л./ 0,22 п.л.)

12. Колпаков В.И., Илюхина А.А. Обоснование параметров составного струеформирующего тракта мобильной установки гидроабразивной резки под водой // Сборник докладов III международной молодежной конференции : Новые подходы в технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. М.: Издательский дом «Спектр», 2019. С.86-94. (0,56 п.л./ 0,28 п.л.)

13. Илюхина А.А., Колпаков В.И., Лихачев А.С. О влиянии параметров технологического процесса на интенсивность гидроудара в струеформирующем тракте гидроабразивной установки // Сборник докладов IV Международной молодежной конференции : Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники. М.: Издательский дом «Спектр», 2020. С.177-178. (0,12 п.л./ 0,04 п.л.)

14. Вельтищев В.В., Колпаков В.И., Илюхина А.А. Подводная гидроабразивная резка // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021): XVII Международная научно-техническая конференция. Том. II. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021. С.143-147. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

15. Заявка 2021118225 Российская Федерация, МПК 7 В 05 В 1/02. Струеформирующая головка для подводной гидроабразивной резки / Илюхина А.А. [и др.], заявл. 23.06.21. – 12 с. (0,76 п.л./ 0,19 п.л.)