**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ** ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ АВТОМАТИКИ И ГЕОМЕХАНИКИ

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**

Диссертационный совет Д 05.24.703

На правах рукописи  
УДК: 622-822

Райымбабаев Таалай Өмүрбекович

**Обоснование параметров и разработка уплотнительных и смесительных устройств гидроабразивной машины для обработки природных камней**

05.05.06 – «Горные машины»

Авторефератдиссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Бишкек, 2024**

**Работа выполнена в** Институте машиноведения и автоматики НАН Кыргызской Республики в лаборатории «Камнедобывающих комплексов»

|  |  |
| --- | --- |
| **Научный руководитель:** | **Усубалиев Женишбек**  кандидат технических наук, профессорИнститута машиноведения и автоматики НАН КР, гл. вед. науч. сотр., г. Бишкек |
| **Официальные оппоненты:** | **Мендекеев Райымкул Абдымананович** доктора технических наук, профессор  директор НИИ Сейсмостойкое строительство при КГУСТА им. Н. Исанова, г. Бишкек |
|  | **Мелис уулу Данислан**  кандидата технических наук, доцент, директора Института **международного и дистанционного образования** КНАУ им. К.И. Скрябина, г. Бишкек |
| **Ведущая организация:** | кафедра «Физические процессы горного производства» **Кыргызско-Российский Славянский университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина**  город Бишкек, просп. Чуй, 6 |

Защита состоится « » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2024 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д.05.24.703при Институте машиноведения автоматики и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики и Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова Министерства образования и науки Кыргызской Республики по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23. Ссылка для доступа к видеоконференции защиты диссертации:

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (720044, г. Бишкек, ул. Проспект Ч. Айтматова, 66), Института машиноведения Национальной академии наук Кыргызской Республики   
(г. Бишкек, ул. Скрябина, 23) и на сайте Национальной аттестационной комиссии пр Президенте Кыргызской Республики: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2024 года.**

|  |  |
| --- | --- |
| Ученый секретарь  диссертационного совета,  к.т.н., с.н.с | Эликбаев К. Т. |

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы диссертации.** Состояние современной техники, основанной на использовании рабочей жидкости для привода машин или в качестве режущего инструмента, характеризуется применением гидравлических цилиндров и усилителей давлений до 300 МПа.

Дальнейшее развитие современных технологий разрушения и обработки материалов различной прочности требует использования высоких и сверхвысоких давлений порядка 250-500 МПа, с ростом которых усложняется работа уплотнений. В связи с этим исследования разработка и создание современных надежных уплотнительных устройств для машин возвратно-поступательного действия является актуальным.

При струйной резке материалов для увеличения разрушительной силы водяной струи в нее добавляются частицы высокотвердого абразивного материала. Однако применение технологии гидроабразивной обработки различных материалов требует правильного формирования и использования качественной гидроабразивной струи, так как плотность смеси влияет на производительность, долговечность оборудования и качество продукции. Поэтому исследование процесса смешивания абразивных частиц с водяной струей и разработка смесительных устройств для формирования гидроабразивной струи также актуальна.

**Целью работы является** обоснование параметров и разработка уплотнительных и смесительных устройств гидроабразивной установки для обеспечения надежной герметизации гидроусилителя и повышения долговечности гидроабразивной машины.

**Задачи исследования:**

* обзор, анализ и обоснование эффективного способа струйного разрушения и обработки природного камня и других материалов;
* обзор существующих конструктивных схем смесительных устройств;
* обзор существующих конструкции уплотнительных устройств
* исследование, разработка конструкции и создание уплотнительного устройства гидроцилиндров для высоких и сверхвысоких давлений;
* разработка методики инженерного расчета уплотнительного устройства высокого и сверхвысокого давления;
* исследование влияния параметров абразивных частиц на процесс разрушения материала;
* разработка конструктивной схемы смесительного устройства;
* разработка методики и проведения экспериментальных исследований нового уплотнительного устройства и устройства смешивания абразива со струей.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Уплотнительное устройство для герметизации подвижных соединений, состоящее из 2-х конических и обратноконических металлических колец с полыми проточками, устанавливаемых попарно в цилиндре, которые, деформируясь под действием давления жидкости, обеспечивают гарантированное уплотнение соединения.
2. Методика расчета геометрических параметров профиля уплотнительного устройства (толщина стенок, угол конусности, ширина), основанная на определении деформации стенок колец в зависимости от давления в гидросистеме.
3. Зависимость скорости резания материалов от плотности гидроабразивной струи для различной формы и размеров абразивных частиц.
4. Усовершенствованная конструкция смесительного устройства рабочей жидкости с абразивом, которое исключает поперечное движение абразивных частиц.

**Научная новизна** заключается в следующем**:**

* новая конструкция уплотнительного устройства отличается от известных устройств специальным профилем уплотняющих колец, обладающих повышенной чувствительностью к изменению давления. Новизна уплотнительного устройства защищена патентами КР №1688 и №1781;
* методика расчета геометрических параметров профиля уплотнительного устройства высокого и сверхвысокого давления с учетом изменяющегося перепада давления разработана впервые;
* зависимости скорости резания материалов, позволяющие выбрать рациональное значение плотности гидроабразивной струи и скорость ее подачи установлены впервые;
* усовершенствованная конструкция смесительного устройства отличающейся отсутствием смесительной камеры

**Практическая значимость работы полученных результатов** диссертационного исследования состоит:

* в разработке уплотнительного устройства для герметизации пары «плунжер-цилиндр» в гидросистемах высоких и сверхвысоких давлений до 300 МПа, позволяющее снизить утечки жидкости;
* в разработке методики инженерного расчета параметров уплотнительных устройств в зависимости от давления от 130 до 300 МПа;
* в разработке рекомендаций по определению рациональной плотности гидроабразивной струи;
* в разработке конструкции смесительного устройства для гидроабразивной обработки, в которой за счет рационального способа смешивания струи и абразива увеличена износостойкость направляющих трубок;
* в разработке рекомендаций по выбору материалов абразива и их плотности в струе жидкости (воды);

**Личный вклад соискателя**

Основные научные результаты исследований получены соискателем в соавторстве (Усубалиев Ж., Эликбаев К.Т.). Предложена оригинальная конструкция уплотнительного устройства для герметизации камер с высоким и сверхвысоким давлением, разработана методика расчета параметров уплотнительного устройства, обоснованы параметры для разработки его конструкции, определена закономерность влияния формы, размеров и расхода абразивных частиц на скорость гидроабразивной смеси. Установлена зависимость скорости резания материалов от плотности гидроабразивной струи для различной формы и размеров абразивных частиц. Совместно с сотрудниками лаборатории «Камнедобывающих комплексов» Института машиноведения разработана конструкция смесительного устройства, разработана методика и проведении эксперимента.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на международной научно-практической конференции «Теория машин и рабочих процессов», посвященной 90-летию акад. Алимова О. Д. (Бишкек, 2013 г.), на научно-практической конференции молодых ученых Кыргызстана «Старт в большую Науку». (Бишкек, 2013 г.), на международной научно-практической конференции КГУСТА, посвященной 70-летию Н. Исанова. (Бишкек, 2013 г.), на IV Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии», (Омск, 2014 г.), на Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в Азии: состояние, проблемы и перспективы», (Бишкек, 2014 г.), на Международной конференции «Современное состояние и перспективы развития горнодобывающей отрасли», посвященная 80-летию академика У. Асаналиева, (Бишкек, 2014 г.), на Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современной науки», (Бишкек, 2016 г), на V международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике», (Барнаул, 2018 г), на VI международной научно-практической конференции «Современные проблемы теории машин», (Новокузнецк, 2018 г.), На ученом совете института Машиноведения НАН КР, 2013-2018 гг.

**Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.** По результатам выполненных исследований опубликовано 18 печатных работ, в том числе 3 - в зарубежных изданиях входящих в систему индексирования Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), получено 2 патента Кыргызской Республики.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и 3-х приложений. Содержит 156 страниц машинописного текста, включающего 32 таблицы, 76 рисунков и библиографический список из 78 наименований.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна и направления практической реализации результатов исследования.

**В первой главе** выполнен обзор и сравнительный анализ существующих методов и способов разрушения каменных материалов, инновационных технологий и оборудований для гидроабразивной обработки.

Анализ существующих методов и способов разрушения различных материалов показал, что наиболее технологически выгодным, инновационным способом обработки различных материалов является гидроструйный способ, обладающий широким диапазоном преимуществ различного применения. В сравнении с аналогичными струйными способами обработки (лазерный, плазменный, электроэрозионный) гидроструйный способ, отличается высокой эффективностью разрушения материалов, технологической универсальностью, возможностью передачи энергии на расстояние.

Условие разрушения материала, когда под давлением высокоскоростной струи сжимающая сила Fсж, воздействующая на небольшую площадку контакта Sк, преодолевает предел прочности материала [σсж] описывается выражением:

σсж=Fсж/Sк > [σсж], (1)

В общем случае на гидродинамическое давление Р*ГД* самой гидроабразивной струи влияют множество параметров, таких как:

*РГД = f (Vст1, dc, l, ρсм, μ, σ);* (2)

где *Vст1 -* средняя скорость струи в начальном сечении; *dc -* диаметр отверстия коллиматора; *l* - расстояние от насадки до поверхности обрабатываемого материала; *ρсм* - плотность смеси; *μ* - вязкость воды; *σ* - поверхностное натяжение.

Требуемая скорость струи *Vст1*, которая зависит только от плотности рабочей струи и прочности материала, описывается уравнением:

, (3)

Следует отметить, что на скорость струи смеси V*аст*  и на процесс резания оказывают влияние наличие абразивных частиц в струе воды.

Из сравнительной диаграммы (рисунок 1) видно, что при гидроабразивном способе резания сравнении с гидроструйным необходимая скорость гидравлической струи для разрушения различных материалов требуется значительно меньше.

На эффективность резания, также оказывает влияние количество абразивных частиц в рабочей смеси (т.е. плотность ρсм), размер абразивной частицы и её форма.

|  |
| --- |
| D:\Документы к Дисс. совета\Фото листов\диаграмма 1,5.jpg |
| Рисунок 1 – Сравнительная диаграмма зависимости необходимый скорости гидравлической и гидроабразивной струи от прочности материала |

Рассмотрение обобщенную схему показывает что, водоструйное оборудование (рисунок 2) можно представить, как состоящее из нескольких модулей, обеспечивающих их быструю замену при ремонте, модули: модуль гидравлического привода (0); модуль усиления (I), включающий в себя ступенчатый поршень-шток в цилиндре; уплотнительный модуль (II), модуль распределения и управления (III), содержащий золотниковое устройство; модуль формирования струи (IV), состоящий из сопла и смесительного устройства, также направляющих трубок (коллиматоров).

|  |
| --- |
| D:\Документ\Таалай\док. диссертации\Диссертация\Дисс по главам\Диссертация\ДИССЕРТАЦИЯ\Листы дисс\Фото графики для листа Дисс\5565656.jpg |
| *1 - поддон, 2 - фильтр предварительной очистки,3 - насос, 4 - предохранительный клапан,*  *5 - манометр низкого давления,6 - обратный клапан,7 - кран переключения, 8 - золотник,*  *9 - гидроцилиндр, 10 - уплотнители,11,12 - обратные клапаны,13 - предохранительный клапан высокого давления,14 - манометр высокого давления,15 – фильтр тонкой очистки,*  *16 – смесительное устройство.* |
| Рисунок 2 – Принципиальная схема гидроструйного оборудования высокого и сверхвысокого давления |

Одним из существенных проблем при применении высоких и сверх высоких давлений является герметизация подвижного соединения пары «плунжер-цилиндр» и малоизученными вопросы способа смешивания воды с абразивом, влияние плотности рабочей жидкости, формы и размеров абразивных частиц на процесс резания, обеспечение надежной герметизации гидроцилиндров при высоких и сверхвысоких давлениях.

На основе анализа существующих способов и конструкций уплотнительных устройств высоких и сверхвысоких давлений, порядка 500 МПа и более, выявлено, что наиболее подходящим способом, с точки зрения простоты и надежности, является – контактный способ. При этом, наиболее приемлемым, в данном случае, является конструкция уплотнителей с коническими контактными кольцами, позволяющая разбивку одного большого давления на ряд меньших давлений, с предварительным поджатием. Проведен обзор и анализ существующих конструктивных схем смесительных устройств и методов смешивания.

В общем случае смесительные устройства состоят из одних и тех же элементов конструкции, включающих в себе (рисунок 3) корпус 1 со смесительной камерой 5, сопло 2 для создания высокоскоростной струи, направляющей трубки 3 и защитного кожуха 4.

|  |
| --- |
| C:\Users\КДК\Pictures\смеситель схема.jpg |
| Рисунок 3 – Смесительное устройство |

Известны три метода смешивания: первое – а) виде суспензии при предварительном смешивании абразива мелких фракции; второй метод – б) смешивание «вода+абразив»; третий метод – в) смешивание «абразив+вода» (рисунок 4).

Недостаток первого метода (рисунок 4 а) – повышенный износ сопла; второго метода (рисунок 4 б) – наличие камеры смешивания, вызывающий снижение долговечности стенок камеры из-за отскока абразивных частиц от высокоскоростной струи воды; третьего метода (рисунок 4 в) – сложности обеспечения высокоскоростной тонкой струи.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\КДК\Pictures\11.jpg  а) | C:\Users\КДК\Pictures\10.jpg  б) | C:\Users\КДК\Pictures\12.jpg  в) |
| Рисунок 4 – Методы смешивания абразива с водой | | |

Из практики известно, что наиболее распространенный метод это метода смешивания «вода+абразив».

**Во второй главе** выполнено методика исследования уплотнительных и смесительных устройств для герметизация высоких и сверхвысоких давлений и влияние плотности смеси на скорость резания в зависимости от твердости материалов.Для повышения надежности герметизации была создана новая конструкция уплотнительного устройства сверхвысокого и высокого давления, отличительной особенностью, которой является чувствительность стенки к перепадам давления и дифференцирование давления рабочей жидкости, т.е. происходит «разбивка» давления по каскадам (рисунок 5).

На разработанную схему уплотнительного устройства высоких и сверхвысоких давлений был получен Патент КР №1688.

Принцип работы уплотнительного устройства жидкость по каналу А поступает в торцевую камеру первой пары колец, прижимая внутреннее кольцо к наружному кольцу и за счет угла конусности разжимая её прижимает к корпусу, выбирая наружный зазор. Жидкость, просочившаяся через кольцевую щель между внутренним кольцом и штоком воздействует на вторую пару колец; оставшаяся жидкость, просочившаяся через вторую пару колец – воздействует на третью пару колец, при этом с каждым разом величина давления снижается, вызывая все меньшую деформацию колец.

|  |
| --- |
|  |
| *1-цилиндр, 2-корпус, 3-наружное кольца, 4-внутреннее кольца.*  Рисунок 5 – Уплотнительное устройство с автоматической выборкой зазора сопряженных герметизируемых поверхностей |

Инженерная методика расчета геометрических параметров уплотнительных колец подробно изложена в диссертационной работе.

Далее рассматривается два условия 1) *Fтр > F1*, т.е. сила трения, между наружным кольцом и отверстием цилиндра должна быть больше осевой силы, действующей на внутреннее кольцо, т.е. надо обеспечить неподвижность наружного кольца. 2) у ≥ δ, т.е. деформация цилиндрической стенки внутреннего кольца должна быть больше зазора между плунжером и внутренней поверхностью внутреннего кольца.

Для выполнения первого условия необходимо обеспечить неподвижность наружного кольца относительно корпуса цилиндра. Для определения действующих сил составлена расчетная схема (рисунок 6).

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 6 – Расчетная схема для определения сил трения |

На кольцо действует осевая сила от действия давления на торцевую поверхность внутреннего кольца

; (4)

где *P1* - давление в полости плунжера; *dнар* – максимальный наружный диаметр внутреннего кольца; *Dmin* – минимальный диаметр отверстия внутреннего кольца; *Sтор* – площадь торцевой поверхности внутреннего кольца (см. рисунок 6):

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 7 – Расчетная схема размеров внутреннего кольца |

Длина образующего конуса *С*, определяется как (рисунок 7)

, (5)

где *l* - ширина внутреннего кольца *мм*; *α* - угол конуса, град.

Суммарная раздвигающая сила на цилиндрической поверхности наружного кольца *FN*  можно записать таким образом

 (6)

Теперь сила трения определяется следующей зависимостью

 (7)

где *fтр* – коэффициент трения, *fтр* = 0,1÷0,5.

Окончательно имеем следующую зависимость

 (8)

Из условия *Fтр ≥ F1* сила трения должна быть больше осевой силы или с учетом (8) можно это же условие представить, как, тогда:

.

После преобразования окончательно имеем

 (9)

Из выше приведенных зависимостей (4), (8) и (9), воспользуемся параметрами при давлениях *Р* = 300÷500 МПа, *k* = 0,3; *Dmах* = 52 *мм*, *Dmin* = 36 *мм*, *lц* = 8 ÷ 22 *мм*, *в2* = 1 ÷ 3 *мм.* Для определения силы трения в зависимости от угла конусности кольца, найденные значения которой приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сила трения в зависимости от угла конусности при различных давлениях в полости плунжера

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P1, МПа* | *F1, кН* | *αо, град* | | | | | | | | |
| 10о | 15 о | 20 о | 25 о | 30 о | 35 о | 40 о | 45 о | 50 о |
| *Fтр>F1* | | | | *Fтр<F1* | | | | |
| *Fтр, кН* | | | | | | | | |
| 300 | 38,1 | 51 | 44,4 | 40,9 | 38,0 | 37,5 | 36,4 | 35,6 | 34,9 | 34,3 |
| 400 | 50,8 | 68 | 59,1 | 54,6 | 50,8 | 49,9 | 48,6 | 47,4 | 46,5 | 45,8 |
| 500 | 63,5 | 85 | 73,9 | 68,2 | 64,7 | 63,4 | 60,7 | 59,3 | 58,2 | 57,3 |

Из полученных данных таблицы 1 был построен график отношений сил трения *Fтр* и осевой силы *F1* в зависимости от угла конусности уплотнительного кольца (рисунок 6). На рисунке 8 показана сила трения в зависимости от угла конусности уплотнительного кольца, т.е. здесь стенка наружного кольца прижимается к цилиндру (корпусу) и обеспечивает его

|  |
| --- |
| C:\Users\КДК\Pictures\ТРЕНИЯ 30гр.jpg |
| Рисунок 8 – график сила трения в зависимости от угла внутреннего кольца |

неподвижность за счет силы трения *Fтр*, возникающий из-за расклинивающего действия осевой силы *F1*. При этом должно обеспечиваться следующее условие *Fтр>F1*.

Вторая условия определения деформации кольца рассматривается по двум случае: ***Первый случай*** – как деформация цилиндрической тонкостенной трубки (оболочки) (рисунок 9, 10), когда давление наружное;

***Второй случай*** – как деформация тонкостенной трубки вдоль образующей, другими словами деформация продольного сечения стенки трубки, защемленной с одного конца (рисунок 10).

В **первом случае**, расчет деформации тонкостенной трубы статически не определима, при осесимметричной деформации цилиндрической оболочки (рисунок 9) точка срединой поверхности *А0* (рисунок 10) получает смещения по оси оболочки *u0* и вдоль радиуса *ук0*.

|  |  |
| --- | --- |
|  | D:\Документы к Дисс. совета\Фото листов\Новая папка\оболочка.bmp |
| Рисунок 9 – Цилиндрическая оболочка | Рисунок 10 – Схема деформации оболочки |

Точка *А*, отстоящая от срединной поверхности на расстояние z, будет иметь перемещения *u0*, *yк*, нормаль к срединной поверхности повернется на угол *φ*. По гипотезе жесткой нормали получим

. (10)

Если пренебречь деформацией материала тонкостенной оболочки в радиальном направлении, то

. (11 )

Деформации в слое z

,  (12)

где  – деформация в точках срединной поверхности.

Деформация срединной поверхности через усилия

 ,  (13)

где *в2* – толщина стенки, назначаемая конструктивно.

Для оценки прогиба тонкой цилиндрической стенки внутреннего уплотнительного кольца под действием различных внешних давлений достаточно определить деформацию по следующей зависимости, для этого конструктивно зададимся толщиной цилиндрической стенки кольца в интервале *в2* = 1 ÷ 3 мм с шагом 0,2 мм.

Тогда деформацию стенки определим следующей зависимостью

. (14)

Найденные значения деформаций в зависимости от толщины стенки внутреннего кольца, занесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Деформация стенки внутреннего кольца в зависимости от её толщины

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *в2*, мм | 1 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3 |
| Р1, МПа | 100 | | | | | | | | | | |
| *ув*, мм | 0,032 | 0,027 | 0,023 | 0,02 | 0,018 | 0,016 | 0,014 | 0,013 | 0,012 | 0,011 | 0,01 |
| Р1, МПа | 300 | | | | | | | | | | |
| *ув*, мм | 0,096 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,052 | 0,05 | 0,043 | 0,04 | 0,036 | 0,033 | 0,031 |
| Р1, МПа | 400 | | | | | | | | | | |
| *ув*, мм | 0,12 | 0,1 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,062 | 0,06 | 0,052 | 0,05 | 0,045 | 0,042 |
| Р1, МПа | 500 | | | | | | | | | | |
| *ув*, мм | 0,16 | 0,13 | 0,11 | 0,1 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,065 | 0,06 | 0,056 | 0,052 |

|  |
| --- |
| D:\Документы к Дисс. совета\Фото листов\График деформации 100-500.bmp |
| Рисунок 11 – График деформация кольца в зависимости толщины стенки кольца |

По данным таблицы 2 построен график деформации стенки внутреннего кольца в зависимости от её толщины для выборки зазора (рисунок 11).

Таким образом видно, что при давлении 300 МПа для гарантированной

выборки зазора δср = 0,075 мм толщина *в2* должна быть до 1,2 мм;  для δср = 0,05 мм *в2* - до 2 мм; для зазораδmin = 0,025 мм *в2* - до 3 мм. При давлении 400 МПа для выборки зазора δmax = 0,075 мм *в2* должна быть 1,6 мм; для зазора δср = 0,05 мм необходимая толщина *в2* должна быть до 2,6 мм; для зазораδmin = 0,025 мм *в2* от 3,0 мм. А при давлении 500 МПа условие герметизации *у*≥ *δ* выполняется при толщине стенки *в2* от 1 до 3 мм

Если рассматривать сечение стенки цилиндрической части кольца как защемленную балку, то здесь действует сконцентрированная сила Q от распределенной нагрузки *q*, возникающая вследствие действия давления *Р*1, создающая изгибающий момент *Ми*, приводящий к деформации свободного конца защемленной балки (рисунок 12).

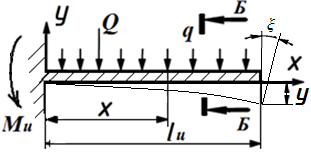
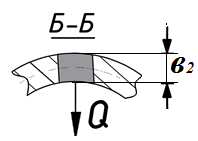
 

Рисунок 12 – Схема защемленной стенки кольца

. (15)

В связи с малостью деформации балки (уmax = 0,001÷0,01) *lц*; (***ξ***max < 1o).

Тогда дифференциальное уравнение можно переписать в виде

 (16)

где Е – модуль упругости материала, кг/см2; *Jх* – момент инерции сечении бруса принимаемого нами прямоугольной форме, см4.

Дважды проинтегрировав данного выражения при начальных ***ξ*** = 0, *у* = 0, при х = 0, окончательно получим зависимость деформацию, также отметим что деформация и зазор должны быть равны т.е. отвечать условию *у*≥ *δ*.

 (17)

Отсюда можно найти длину кольца *lц* обеспечивающая заданию, деформацию которая может выбрать конструктивный зазор

. (18)

Во **втором случае** – деформация стенки кольца, рассмотренная как защемленная с одного конца балка, где для определения длины стенки кольца воспользуемся зависимостью (17) и (18) и найденные значения которых занесем в таблицу 3.

Таблица 3 –Длина цилиндрической стенки внутреннего кольца в зависимости от ее деформации, толщины и действующего давления

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *δ, мм* | 0,05 | | | | | 0,075 | | | | |
| *в2, мм* | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
| *Р1 , МПа* | 100 | | | | | | | | | |
| *у, мм* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *lц, мм* | 4,5 | 7 | 9 | 12 | 14 | 5,2 | 8 | 11 | 13 | 16 |
| *Р1 , МПа* | 200 | | | | | | | | | |
| *у, мм* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *lц, мм* | 3,6 | 5 | 7 | 9 | 11 | 4 | 6 | 8 | 11 | 13 |
| *Р1 , МПа* | 300 | | | | | | | | | |
| *у, мм* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *lц, мм* | 3 | 5 | 6 | 8 | 10 | 4 | 6 | 7 | 9 | 11 |
| *Р1 , МПа* | 400 | | | | | | | | | |
| *у, мм* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *lц, мм* | 2,8 | 4 | 6 | 7 | 9 | 3 | 5 | 7 | 8 | 10 |
| *Р1 , МПа* | 500 | | | | | | | | | |
| *у, мм* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *lц, мм* | 2 | 4 | 5 | 7 | 8 | 3 | 5 | 6 | 8 | 9 |

По данным таблицы 3 построен график изменения деформации в зависимости от длины цилиндрической стенки внутреннего кольца, толщины и действующего давления (рисунок 13).

|  |  |
| --- | --- |
| D:\Документы к Дисс. совета\2020 Дисс\График деформации.bmp | Исходя из выше приведенных зависимостей, можно считать, что основными параметрами для определения геометрических параметров уплотнительного кольца являются угол конусности кольца, толщина стенки кольца и длина цилиндрической поверхности кольца.  Как видно из графика (рисунок 13), чтобы обеспечить выборку зазора 0,075 мм, при толщине стенки 1 мм, при давлении 300 МПа потребуется сделать длину кольца 17 мм, а при толщине стенки 3 мм, при этих же условиях требуется *lц* = 22 мм. |
| Рисунок 13 – График деформация кольца для выбора зазора в зависимости от длины  толщины стенки кольца |

При давлении 500 МПа и при толщине 1 мм для выборки зазора 0,075 мм требуется длина кольца 15 мм, а при толщине 3 мм, при этих же условиях *lц* = 19 мм.

Материал: наружного кольца – легированная сталь 2Х13Н4Г9, термообработка 260 *НВ*, механические свойства: предел текучести *σт*=690 *МПа*, *σ-1*=380 *МПа*; внутреннего кольца – серый чугун СЧ 15, [*σизг*]=350 *МПа*, как антифрикционный материал.

Для определения размеров геометрических элементов уплотнительного кольца (ширины, толщины стенок и угла конусности колец) достаточно задаться минимально допустимой величиной размера диаметра плунжера (см. рисунок 7).

Так, для размера диаметра плунжера *dшт**∅36f7* находятся предельные размеры, допуски *d* и *d*, *мм* [48];

для диаметра отверстия кольца *Dвн* = *∅36H7*,

*Dmin* = 36,0 *мм,Dmах*= 36,025 *мм*.

Зазоры в соединении

*δmin* = *Dmin*- *dmах* =36,0-35,975=0,025 *мм*;

*δmах* = *Dmах*- *dmin* = 36,025-35,950=0,075 *мм*;

 *мм*.

Получив параметры кольца по данной методике приступаем к конструированию и разработке рабочего чертежа комплекта колец уплотнительного устройства (рисунок 14).

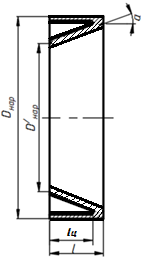
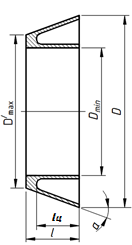
а)  б) 

Рисунок 14 – Рабочие чертежи уплотнительных колец

а) – наружное кольцо, б) – внутреннее кольцо

Далее проведем расчеты количества утечки жидкости через зазор герметизируемой полости.

Расход жидкости на утечки через кольцевую щель определяется как

, (19)

где ν - кинематический коэффициент вязкости жидкости; *h* – ширина внутреннего кольца; ρ=1000 кг/ м3- плотность воды; d*ср* - средний диаметр щели.

По результатам расчета данной зависимости построен график (рисунок 15).

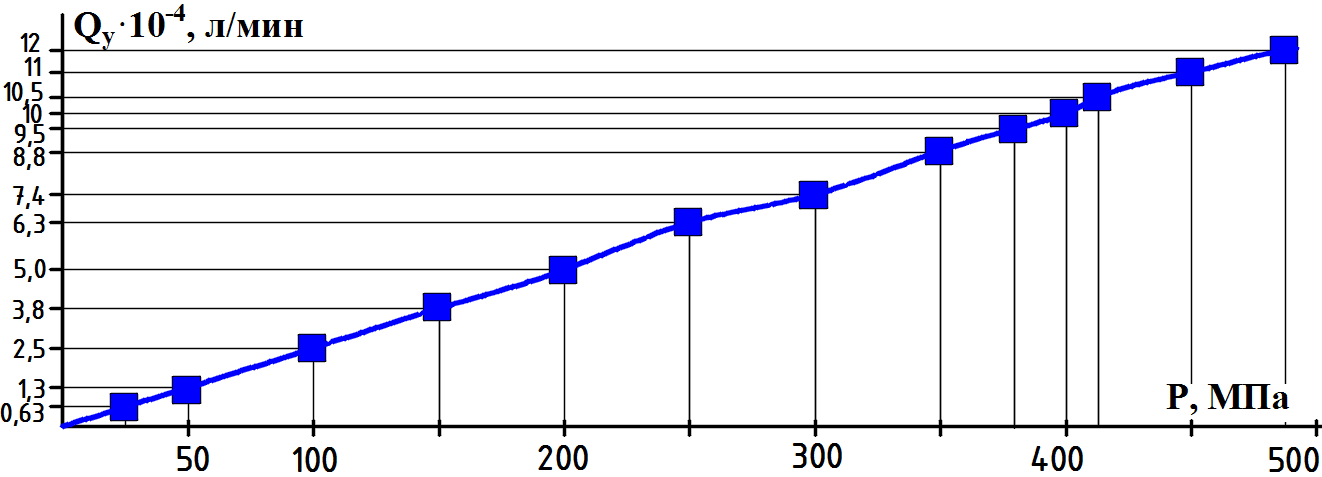


Рисунок 15 – График зависимости давления от утечек

Как видно, при повышении давления в полости цилиндра даже на порядок, расход жидкости на утечки через уплотнительное устройство лишь два раза возрастает, однако количество, т.е. практически утечки пренебрежимо малы Qу ≈ 0.

Проведенные расчеты показывают, что для полной герметизации полости гидроцилиндра при давлении 480 МПА достаточно в комплекте уплотнительного устройства использовать три пары колец.

Для гидроабразивной резки применяются наконечники из высокопрочных материалов (рубин, сапфир, твердые минералы, карбиды, керамика и сверхтвердые сплавы).

Наиболее подходящим с экономической и технологической точки зрения для работы в качестве материала смесительного устройства и направляющих трубок является спеченный твердый сплав марки ВК6 по ГОСТ 3882-74, σизг=150 кгс/мм3, твердость HRC=88,5, плотность 14,6÷15,0 г/см3.

На рисунке 16 приведена такая схема смешивания, когда при попадании абразивных частиц в смесительную камеру, они увлекаются высокоскоростным потоком воды в направлении направляющей трубки. При этом траектория движения абразивных частиц имеет сложный криволинейный характер.

|  |
| --- |
| C:\Users\КДК\Pictures\Безымянный.jpg  Рисунок 16 - Схема смешивания абразива со струей воды |

Соударяясь с внутренней поверхностью смесительной камеры, направляющей трубки абразивные частицы оказывают истирающее действие, увеличивая внутренние диаметры и искажая их геометрические параметры.

Для предотвращения этих проблем была предложена новая схема смесительного устройства, в которой отсутствует смесительная камера, предотвращающая поперечные движения абразивных частиц при соударении их высокоскорстной струей воды в момент смешивания (рисунок 17).

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 17 – Расчетная схема, предлагаемого смесительного устройства |

Для достижения этой цели подводящие абразив трубки подведены непосредственно к направляющей трубке или наконечнику (коллиматору). В которой вода из плунжерной камеры 1 выдавливается через сопло 2, образуя высокоскорстную тонкую струю попадает в направляющую трубку 4, захватывая частицы абразива, подаваемые через трубки 3, тем самым создавая гидроабразивную струю.

Составим расчетную схему соударения потока воды с частицами абразива (рисунок 18) для определения минимально возможного значения угла соударения α/2, т.е. угла конусности смесительной трубки α.

В качестве абразива применяются различные материалы с твердостью по Моосу от 6,5 (гранатовые и т.п.). Для повышения срока службы сопла и смесительной трубки необходимо минимизировать радиальные перемещения Х1 частиц абразива, чтобы уменьшить число контактов их с внутренней поверхностью канала и уменьшить скорость отскока абразивной частицы после соударения с потоком водяной струи.

Представим, что частица абразива массой *m*, двигаясь со скоростью Va1, соударяется под углом α/2 с потоком струи воды, имеющей скорость Vст. После соударения частица абразива отскакивает, приобретая скорость Va2.

Используя известную зависимость величину скорости струи воды в момент соударения с абразивной частицей можно определить по формуле

|  |
| --- |
| C:\Users\КДК\Pictures\Расчетная схема.jpg C:\Users\КДК\Pictures\схема соударения 2.jpg |
| Рисунок 18 – Расчетная схема  соударения частицы абразива  с потоком струи |

 (20)

где Vo – скорость струи на выходе из сопла; сх – коэффициент лобового сопротивления воздуха; ρвоз – плотность воздуха; ρсм – плотность рабочей жидкости; *в* – расстояние от сопла до соударения абразивной частицы с потоком струи; х0 – дальность полета струи. Соответственно съем металла за один удар абразивной частицы: 

где *ks –* коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; *D* - диаметр описанной окружности абразивной частицы размером *da*; *kc* – коэффициент стружкообразования; *рач* – плотность абразивной частицы; *ск* – коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности; σs – предел текучести допускаемой прочности материала направляющей трубки; *рс –* плотность материала смесителя; *f* - коэффициент пропорциональности.

Соответственно, зависимость для определения объема срезаемого металла при гидроабразивной обработке примет вид:

, (21)

где  = 0,29- коэффициент, учитывающий угол падения струи при обработки стали; *Sк* - внутренняяплощадь поверхности усеченного конуса; *Р\*2* - вероятность события; *λ* – интенсивность потока, т. е. среднее число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки;

*е1* – основание десятичного логарифма (число Эйлера), *е1*=2,71828; *t* - время обработки; *q* - съем металла за один удар абразивной частицы; *da* – диаметр частицы абразива.

Зависимость (21) позволяет определить величину износа внутренней поверхности смесительной камеры и направляющей трубки.

В качестве примера, результаты вышеприведенных расчетов предлагается использовать в разработанной конструкции режущей головки ручного гидроабразивного инструмента, который состоит из корпуса 1, в который под углом 250 ввинчен штуцер 9, соединенный с подающим механизмом абразива гибким рукавом 11 и высокоскоростная струя воды, подаваемая по стальной трубке 7 (рисунок 19).

В свою очередь, угол α определяется формулой

,

где *hmax* – максимальная глубина внедрения частицы; *Рдин —* динамическое давление смеси; *рсм —* плотность рабочей смеси жидкости и частиц; *c* – образующая усеченного конуса; *KL -* коэффициент потерь, учитывающий расстояние от сопла до поверхности обрабатываемой детали.

Внутри корпуса соосно расположены втулка-смеситель 4, корпус сопла 6, с самим соплом 5, прижимаемые с передней стороны коллиматором 3, находящимся в стакане 2, ввинчиваемым в корпус. С обратной стороны корпус сопла 6 и само сопло 5 удерживают от осевого смещения стальные трубки 7 и 8, вставленные один в другой и фиксируемые винтом 10. Во избежание возможных утечек, на трубке 8 установлены два уплотнителя 12.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\КДК\Pictures\12121конструкция пистолета.bmp | *1 – корпус, 2 – стакан, 3 – каллиматор,*  *4 – втулка-смеситель, 5 – сопло,*  *6 – корпус сопла, 7 – трубка, 8 –трубка,*  *9 – штуцер, 10 – винт, 11 – рукав,*  *12, 13 – уплотнители.* |
| Рисунок 19 – Гидроабразивная режущая головка | |

В данной конструкции частицы абразива увлекаются потоком струи воды непосредственно перед входом в коллиматор, чем уменьшается путь отскока от высокоскоростной струи, снижается хаотичность их движения и уменьшается истирающее воздействие абразивных частиц на внутренние поверхности деталей головки. К сожалению, исключить полностью износ коллиматора невозможно, поэтому конструкция головки позволяет производить быструю замену коллиматора без разборки других элементов конструкции.

На следующем этапе рассмотрены абразивные материалы, из которых наиболее доступным является гранатовый песок.

Исследовано влияние формы и размеров абразивных частиц на интенсивность разрушения.Для сравнительного анализа рассматривался абразивный песок мелких фракций (*dа* = от 0,1 до 0,4 мм) и крупных фракций (*dа* = от 0,4 до 1,2 мм).

Исходя из опытных данных, процентное соотношение воды и абразива должно составлять примерно 14 -17 % абразива от расхода воды. Тогда, при расходе воды через сопло Qв ≤ 2,05 л/мин, весовой расход абразивного материала должен составлять Qа=0,005 ÷ 0,01 кг/с.

При определении энергетических и количественных параметров гидроабразивной струи в первом приближении в качестве абразивного материала применяется гранатовый песок со следующими характеристиками: плотностью ρ= 4,0 г/см3 = 0,004 кг/см3; средними размерами фракций от 0,1 до 1,2 мм; твердостью по Моосу 7,0 – 9,0; удельной массой m = 4,0 гр/см3.

При известных геометрических размерах массу одной гранулы можно определить по формуле;

, (22)

где Wк, Wс – объем одной гранулы кубической и сферической формы, (м3):

  (23)

Тогда энергию единичного удара можно будет определить по формуле:

  (24)

где *V -* среднее значение скорости струи воды м/с.

Количество гранул, К проходящих через поперечное сечение направляющей трубки диаметром dт=1 мм гидроабразивной струи в единицу времени для кубической и сферической форм зерна при заданном расходе частиц абразива Qmin а=0,005 кг/с и Qmax а=0,01 кг/с определяется по формуле

, (1/с). (25)

Мощность удара абразивных частиц в единицу времени определяем по формуле

N=А·K (26)

|  |
| --- |
| C:\Users\КДК\Downloads\диаграмма 3в1.bmp |
| Рисунок 20 – Диаграмма изменения энергии, мощности удара частиц и количества абразивных частиц в зависимости от размеров гранул |

На рисунке 20 приведена комплексная диаграмма зависимости мощности удара абразивных частиц при максимальном и минимальном расходах абразива двух форм (сферической и кубической), определенная по формуле 18.

Здесь же, приведены зависимости количества гранул абразива, проходящих через поперечное сечение направляющей трубки в единицу времени в зависимости от и их размеров, а также диаграмма изменения энергии удара частиц, найденные по формулам 24 и 25.

Из данной диаграммы наблюдается увеличение энергии удара частиц с ростом размеров гранул абразива с одновременным сокращением количества самих гранул в рабочей смеси гидроабразивной струи, при этом мощность остается практически неизменной. В зависимости от расхода абразивных частиц, мощность изменяется от минимального значения до максимального (заштрихованное поле).

Далее определим влияние твердости абразивных частиц различных пород на разрушающую мощность струи смеси на площадке контакта при обработке одной породы природного камня, например, габбро. Здесь за обрабатываемый материал принят природный камень – габбро, как наиболее крепкий, обладающий прочностью на сжатие σсж= 350 МПа, плотностью до 3,1 кг/см3, и твердостью по Моосу 6-7.

На диаграмме (рисунок 21) показана зависимость энергии единичного удара в зависимости от размеров гранул. Здесь хорошо видно, что энергия единичного удара при кубической форме гранулы в два раза выше, чем при Приведенные диаграммы построены по результатам зависимости (24) с учетом значений зависимости (26), на которых мощность единичного удара частицы абразива изменяется в зависимости от энергии удара одной частицы при сферической и кубической их форме.

Если в зависимости (26) энергию удара определять с точки зрения разрушающей способности, и подставив зависимость (24), то с учетом механической прочности материала, мощность можно будет выразить в следующем виде

*,* (Вт) (27)

По результатам вычислений построена диаграмма зависимости мощности от плотности смеси и крепости абразивных частиц рисунок 22.

|  |
| --- |
| D:\Документы к Дисс. совета\Фото листов\Мощность абразива 2.jpg |
| Рисунок 21 - Зависимость требуемой мощности гидроабразивной струи в зоне реза от плотности и крепости абразивных частиц |

Изданной диаграммы видно, что для разрушения конкретного хрупкого природного камня с увеличением крепости абразивных частиц требуется относительно меньшая мощность. Здесь также можно видеть, что с уменьшением количества расхода абразивных частиц в пределах их максимального и минимального значений мощность в зоне реза также снижается.

В случае применения одного типа абразивного материала, например – гранат, и при обработке различных природных камней, то требуемая мощность для разрушения в зоне реза определяется той же зависимостью (27), однако здесь плотность рабочей смеси неизменна, изменяется прочность обрабатываемых материалов.

|  |
| --- |
| C:\Users\КДК\Pictures\диаграмма мощность11 прочность матер.bmp |
| Рисунок 22 – Изменение требуемой мощности удара в зависимости от формы частицы и расхода абразива для разрушения прочности различных материалов |

Построена диаграмма изменения мощности в зависимости от формы абразивной частиц, их расхода и прочности обрабатываемого материала рисунок 22. Из этой диаграммы видно, что при одинаковом расходе абразива для разрушения (резке) материала, развиваемая энергия при кубической форме гранул требуется меньшая мощность, чем при сферической форме гранул. Это можно объяснить, что при кубической форме гранулы имеют грани, из этого в одном сечении вместимости количество гранулы меньше.

**Влияние плотности смеси на скорость резания в зависимости от твердости материалов**

Из теории прочности материалов известно, что разрушение возникает при превышении силы действующей на площадку контакта предела прочности материала, т.е. при условии

,

где σв сж – напряжение сжатия (МПа); F - сила давления (Н); Sк - площадь контакта (см2); [σсж] - допускаемое напряжение сжатия.

Из уже выше найденной зависимости (1), с учетом коэффициента запаса прочности материала *кв*, равный для хрупких материалов *кв*= 3,0 ÷ 9,0 определим необходимую скорость гидроабразивной струи при обработке определенного материала:

, (28)

где σсж ≈ σв– напряжение сжатия для того же обрабатываемого материала - габбро (см. выше), МПа, ρсм – плотность гидроабразивной смеси, г/см3.

В свою очередь, по работе Тихонова А.А. изменение плотности потока при добавлении абразивного материала определяется зависимостью

, (29)

где Ко = Qа.ч. /Qсм – объемная концентрация рабочей смеси, здесь Qа.ч.- расход абразивных частиц (кг/мин), Qсм – расход рабочей смеси (л/мин). По рекомендациям величина этого коэффициента может колебаться в пределах Ко = 0,14 ÷ 0,17; ρв - плотность воды (ρв= 103 кг/м3), ρач - плотность абразивных частиц (г/см3), ρчн - насыпная плотность абразивных частиц (г/см3).

Плотности и твердости некоторых минералов, которые потенциально можно использовать в качестве абразива. Приняв среднее значение объемной концентрации *Ко=0,155*, для коэффициента запаса прочности обрабатываемых материалов *квmin=3,0* и *квmax=9,0* необходимая скорость струи смеси при применении абразивных частиц различной твердости определяется зависимостью:

. (30)

Найденные значения скорости рабочей гидроабразивной струи по зависимости (30) построим картину изменения скорости струи *Vст,* гидроабразывной смеси (ρсм) в зависимости от применяемого абразивного матераиала (рисунок 23).

|  |
| --- |
| D:\Документы к Дисс. совета\Фото листов\Диаграмма скорость на плотность смеси.jpg |
| Рисунок 23 – Диаграмма зависимости требуемой скорости струи гидроабразивной смеси от твердости абразивного материала |

Из приведенной диаграммы (рисунок 23) видно, что для разрушения хрупких материалов требуется меньшая скорость гидроабразивной струи, а с увеличением плотности смеси потока скорость снижается.

Повышение расхода абразива позволяет существенно увеличить скорость резания. Однако сказанное справедливо лишь до определенной предельной величины расхода абразива, по достижении которой скорость резания практически не изменяется. При прочих фиксированных параметрах оптимальный массовый расход абразива линейно растет с увеличением диаметра фокусирующего сопла и массового расхода воды, но его величина обратно пропорциональна длине фокусирующего сопла.

Выбор абразивного материала и размера абразивных зерен представляет важную задачу технологического проектирования. Как правило, фирмы ­ производители оборудования рекомендуют определенный вид абразивного материала. Теоретически в качестве абразивного материала можно использовать различные материалы, плотность которых больше плотности воды. Однако, устойчивость истечения и эффективность воздействия двухфазной струи обеспечиваются оптимальными размерами частиц, равные 10…30% диаметра режущей струи.

**В третьей главе** выполненырезультаты собственных исследований уплотнительных и смесительных устройств и исследование влияние абразивных частиц на процесс разрушения и обработки материалов.

Для проведения экспериментального исследования уплотнительного устройства высокого и сверхвысокого давления разработан стенд (рисунок 24) и методика проведения экспериментов. Теоретические результаты количества утечки рабочей жидкости, были сравнены с экспериментальными.

|  |  |
| --- | --- |
|  | C:\Users\КДК\Pictures\121.jpg |
| Рисунок 24 – Схема определения количества утечек РЖ | |

**Порядок эксперимента**

Испытание машины должно производиться при температуре окружающей среды 15 – 300С, нормальной влажности и атмосферном давлении порядка 760 мм рт. ст. (0.1 МПа).

Определение расхода количества рабочей жидкости Q через дренажный канал слива. В емкость заливается 10 л. воды, затем надо запустить установку и дать ей поработать в холостом режиме 1 мин. После этого количество жидкости в емкости вновь нужно довести до 10 л. и включив установку, засечь время и дать проработать ей 5 мин. и выключить двигатель. Далее, поступившая жидкость из специального канала на слив попадает в емкость, из емкости в отдельную мерную посуду, из которой производится замер количества утечки.

Сравнение экспериментальных результатов с теоретическими составило:

 л/мин



Обычно, экспериментальные данные гидроусилителей сверхвысокого давления утечки в гидросистемах высокого давления составляют до 3 л/мин, в нашем случае утечки составили 0,00135 л/мин, что меньше от обычного объема утечек. Испытания показали, что утечки в полости «плунжер-цилиндр» при давлении 130 МПа практически отсутствуют.

**Экспериментальное исследование влияния плотности гидроабразивной струи**

Для проведения эксперимента были поставлены задачи:

- расхода абразива и воды в режущей головке;

- скорости резки при разной плотности гидроабразивной струи;

- скорости резки при обработке различных пород камней.

|  |
| --- |
| D:\Документ\Таалай\док. диссертации\Диссертация\Дисс по главам\Диссертация\Новая папка\Чертеж1.bmp |
| Рисунок 25 – Гидроабразивная установка TECHNI Waterjet TJ 3000-X2 |

Испытанияпроводились на заводе ОАО «Дастан». г. Бишкек, на гидроабразивной установке TECHNI Waterjet TJ 3000 – X2 (рисунок 25).

В гидроабразивной установке подачу жидкости под высоким давлением осуществляет сервонасос нового поколения Quantum ESP, с расходом воды Q = 2,05 л/мин. Процесс обработки гидроабразивной струей производится в ванной под небольшой толщиной воды, что полностью избавляет от шума и пыли. Смешивание абразива с водой происходит в предложенной режущей головке. Достоинством данной установки является удобство в эксплуатации и универсальность.

**Исходные данные, инструменты и приборы:** давление воды 300-310 МПа; абразивный песок - Австралийский гранат GMA 80 меш (0,18 мм), размер частицы 150-300 микрон, объемная плотность: 2,38 г/см³ твёрдость 7,5-8 по Моосу, форма частицы - сферическая; штангенциркуль, рулетка.

Для проведения испытания были подготовлены, различные природные камни, приведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Свойства природных камней в используемых экспериментах

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Природные  камни | [Плотность](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C),  г/см³ | Прочность сжатия, [МПа](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D1%8C_(%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B0_%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F)) | Твёрдость, по Моосу | Размеры,  мм |
| 1 | Гранит | 2,54-2,78 | 100-300 | 5-7 | 120х80х20 |
| 2 | Мрамор | 2,6-2,9 | 50-250 | 2,5-3 | 112х103х20 |
| 3 | Габро | 2,9-3,1 | 85-350 | 6-7 | 165х130х35 |
| 4 | Кварц | 2,5-2,65 | 215 | 7 | 55х53х43 |

**Порядок проведения эксперимента**

Измерения параметров проводились при постоянном давлении и различных скоростях резки, расходе абразивного песка и подачи жидкости (воды).

При одинаковых давлениях менялась плотность суспензии, и подача резки (скорость перемещения струи по поверхности материала). Эксперименты проводились для различных пород камней (см. табл. 1), при толщине образца 20 мм, при давлении 350 МПа, расходе воды 2,05 л/мин.

При проведении эксперимента с датчиков гидроабразивной установки TECHNI Waterjet TJ 3000 – X2 (рисунок 26) снимались показания параметров резки, которые представлены ниже.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| Рисунок 26 – Расходные характеристики гидроабразивной установки | | |

В экспериментах варьировались три параметра: расстояние между фокусирующей трубкой и поверхностью обрабатываемого образца L=3-5 мм, расход абразива от 0,4-0,5 *lb/min* (181,4-226,8) *гр/мин*, диаметр фокусирующей трубки от 0,95-1,013 мм. Остальные параметры оставались неизменными: угол атаки струи относительно поверхности образца α = 90о, скорость гидроабразивной струи *u0* = 814 м/с, давление воды 45000 Psi (310,3 МПа ), давление подачи абразива 0,3 МПа. \

При резке камней подача струи менялась (рисунок 27): красная линия – средняя 215 мм/мин; желтая – средне тонкий 180 мм/мин; зелёный – тонкий 140 мм/мин, синий - экстра тонкий 105 мм/мин.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 27 – Изменение подачи струи |

По полученным результатам обработки двух пород камней (гранита и мрамора), при одинаковых условиях (толщине 20 мм; давлении 350 МПа, расходе воды 2,05 л/мин) построена диаграмма зависимости скорости подачи (реза) от изменения расхода абразива (плотности струи) (рисунок 28).

|  |
| --- |
| D:\Документы к Дисс. совета\Фото листов\Безымянный.jpg |
| Рисунок 28 – Диаграмма зависимости скорости подачи (реза) от изменения расхода абразива (плотности струи). |

Как видно из диаграммы скорость подачи струи смеси для гранита выше, чем мрамора, это объясняется тем, что при большей твердости и хрупкости, скорость реза выше, т.к. имеет место более хрупкое разрушение. Разность результатов между теоретическими и экспериментальными данными объясняется ограниченностью регулировки расхода абразива техническими возможностями самого оборудования.

Также результаты экспериментальных исследований показали, что увеличение плотности гидроабразивной смеси или увеличение расхода абразивных частиц до величины 300 г/мин приводит к увеличению скорости реза (подачи) на

%.

Однако, с увеличением скорости подачи резко снижается качество обработанной поверхности, появляются волнообразный след гидроабразивной струи (рисунок 29). При скорости подачи порядка 105 -140 мм/мин качество поверхности достаточно хорошее, порядка Ra2,5…Rz40 (рисунок 30).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рисунок 29 – Качество поверхности реза при скорости подачи 180 мм/мин. | Рисунок 30 – Качество поверхности реза при скорости подачи 105 мм/мин. |

Установлено что при увеличении подачи абразива (количества абразивных частиц) в рабочую смесь до допустимого оптимального значения, скорость резания (подачи) увеличивается. Увеличение расхода абразива (плотности рабочей смеси) выше предельного значения не дает повышения эффекта разрушения твёрдых материалов, в противном случае это приводит к ухудшению качества поверхности резания.

На основании подтверждения теоретических исследований экспериментальными данными была разработана конструкция ручного гидроабразивного ручного инструмента, в которой были применены разработанные уплотнительные и смесительное устройства. Данный ручной инструмент предназначен для использования как непосредственно на карьерах по добыче и переработке природных камней, так и в других случаях (рисунок 31).

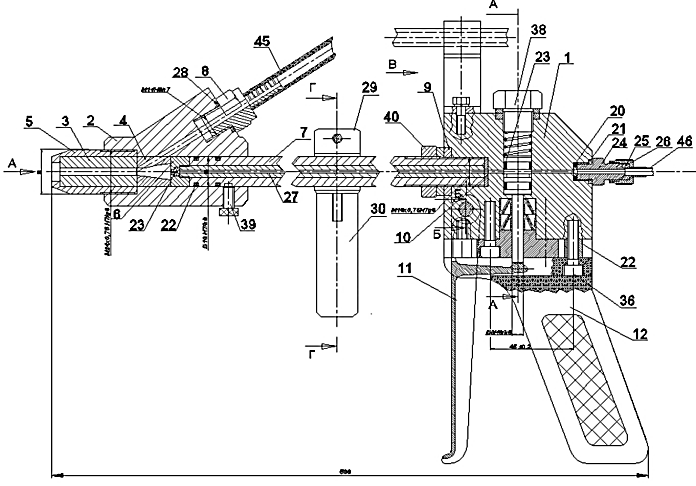


Рисунок 31 - Гидроабразивный ручной инструмент

**ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие общие выводы и рекомендации для их применения.

1. Проведенный обзор и сравнительный анализ существующих методов и способов разрушения различных материалов показал, что наиболее экономически и технологически выгодным, инновационным способом обработки различных материалов является гидроструйный способ. Гидроструйный способ, отличающийся высокой эффективностью разрушения материалов, технологической универсальностью и возможностью передачи энергии на расстояние, в свою очередь предъявляет высокие требования к герметичности пары «плунжер-цилиндр», а также качеству рабочей струи.

Рассмотрение процесса гидроабразивной обработки показал, что для разрушения требуется сверхвысокая скорость рабочей струи, сопровождаемая созданием сверхвысокого давления в усилителе давления, что приводит к необходимости создания и исследования надежных уплотнительных устройств. Обзор существующих конструкций гидроабразивных устройств показал, что одним из наиболее ответственных узлов обеспечивающий качественную рабочую струю является смесительное устройство, долговечность которого регламентирует работоспособность установки в целом. Здесь внимание было процессу смешивания абразива с водой и влиянию формы, размеров и количества расхода абразива на эффективность разрушения.

1. На основе исследований выявлено, что наиболее подходящим способом герметизации пары «плунжер-цилиндр» является контактный способ. При этом, наиболее приемлемым является конструкция уплотнителей с коническими контактными кольцами, позволяющие разбивку одного большого давления на ряд меньших давлений. Была разработана оригинальная конструктивная схема уплотнительного устройства сверхвысокого и высокого давления, подтвержденная Патентами КР №1688, №1781 и методика его расчета, а также создана новая конструкция уплотнительного устройства, надежность работы которого подтверждается экспериментальными данными и актом испытания.
2. Проведенные теоретические исследования процесса создания эффективной рабочей струи показали, что кубическая форма абразивной частицы размерами порядка 0,008 мм является предпочтительной, при давлении 350 МПа, расходе абразива от 130-165 гр/мин, обеспечивая скорость резания от 100-300 мм/мин. Установлено, что при увеличении количество абразивных частиц в рабочей смеси не дает повышения эффекта разрушения твёрдых материалов, а ведет к ухудшению качества резания.

Разработанная новая конструкция смесительного устройства повышает срок службы направляющих трубок на 8 часов, увеличивая их стойкость.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. **Райымбабаев, Т.О.** Обзор техники для гидроабразивной обработки материалов [Текст]: сб. науч. тр. Машиноведение / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Илим, 2012. – № 8. – С. 25-35.
2. **Райымбабаев, Т.О.** Абразивные материалы при гидрорезании [Текст]: сб. науч. тр. Машиноведение / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Илим, 2012. – №8. – С. 35-42.
3. **Райымбабаев, Т.О.** Уплотнительные устройства для высоких и сверхвысоких давлений [Текст]: Сборник матер. научно-практической конф. молодых ученых «Старт в большую науку» НАН КР / Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Илим, 2013. – С. 27-28.
4. **Райымбабаев, Т.О.** Обзор и анализ уплотнительных устройств для высоких давлений жидкости [Текст]: сб. науч. тр. Машиноведение / Ж. Усубалиев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Илим, 2013. – С. 238-243.
5. **Райымбабаев, Т.О.** Технологические параметры процесса гидроабразивной резки [Текст]: сб. науч. тр. Машиноведение / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Илим, 2013. – С. 243-248.
6. **Райымбабаев, Т.О.** Применение технологии гидроабразивной обработки материалов [Текст]: Вестник КГУСТА Научно-практической конференции Н. Исанова / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Авангард, 2013. – №4 (42), – С. 75-79.
7. **Райымбабаев, Т.О.** Автоматизация технологического процесса гидроабразивной резки [Текст]: IV-Международная научно-техническая интернет-конференция молодых ученых «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии» / Т.О. Райымбабаев. – Омск: ОМГТУ, 2014. – С. 16-19.
8. **Райымбабаев, Т.О.** Гидроабразивное сверление отверстий в материалах. [Текст]: Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в Азии: состояние, проблемы и перспективы ITPA-2014», Вестник КГУСТА / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Авангард, – 2014. – №2 (44). – С 141-146.
9. **Райымбабаев, Т.О.** Природные абразивные камни и минералы Кыргызстана [Текст]: матер. международной конф. современное состояние и перспективы развития горнодобывающей отрасли. Известия КГТУ им. Раззакова / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев.– Бишкек: Текник, 2014. – №33. – С. 255-258.
10. **Райымбабаев, Т.О.** Технология гидроабразивной резки облицовочных плит в горных условиях [Текст]: сб. науч. тр. Машиноведение / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Илим, 2014. – №9. – С. 128-133.
11. **Райымбабаев, Т.О.** Влияние плотности смеси гидроабразивной струи на эффективность разрушения [Текст]: сб. науч. тр. Машиноведение / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Илим, 2014. – №9. – С. 133-138.
12. **Райымбабаев Т.О.** Уплотнительное устройство сверхвысоких давлений [Текст]: /Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев // Патент KG №1688 С1 заявл. 22.10.2013 опуб. 31.10.14, Бюл. № 11.
13. **Райымбабаев Т.О.** Уплотнительное устройство сверхвысоких давлений [Текст]: /Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев // Патент KG №1871 заявл. 26.05.2015 опуб. 30.06.16, Бюл. № 6.
14. **Райымбабаев, Т.О.** Уплотнительное устройстводля высоких и сверхвысоких давлений давления [Текст]: Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы современной науки – 2016 г». Известия НАН КР / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Илим, 2016. – №2. – С. 10-16.
15. **Райымбабаев, Т.О.** Экспериментальное и аналитическое определение количества утечек в уплотнительных устройствах высокого и сверхвысокого давления [Текст]: науч. техн. журнал Машиноведение / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек, 2017. – № 5.
16. **Райымбабаев, Т.О.** Определение геометрических параметров уплотнительных колец устройства герметизации высокого и сверхвысокого давления с учетом влияния герметизируемого давления [Текст]: науч. техн. журнал Машиноведение / Усубалиев Ж., К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Бишкек: Илим, 2017.– № 2(6),– С. 57-66.
17. **Райымбабаев, Т.О.** Определение величины износа коллиматора при гидроабразивной обработке [Текст]: Сборник статей по материалам V международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике» / Усубалиев Ж., К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев. – Уфа: Дендра, 2018. – С. 66-80.
18. **Райымбабаев, Т.О.** Смесительное устройство ручного гидроружья для обработки материалов [Текст]: Материалы VI международной научно-практической конференции «Современные проблемы теории машин» / Усубалиев Ж., К.Т. Эликбаев, Т.О. Райымбабаев.– Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – №6. – С. 81-86.

**РЕЗЮМЕ**

**диссертации Райымбабаева Талайа Омурбековича на тему: «Обоснование параметров и разработка уплотнительных и смесительных устройств гидроабразивной машины для обработки природных камней», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.06 - Горные машины**

**Ключевые слова:** уплотнительное устройство; смесительное устройство; абразивные частицы; гидроабразивная обработка материалов; сверхвысокое давление; скорость струи; смешивание и др.

**Объект исследования:** гидроабразивная машина.

**Предмет исследования:** уплотнительное и смесительное устройства.

**Целью работы является** обоснование параметров и разработка уплотнительных и смесительных устройств гидроабразивной установки для выбора эффективного режима работы и повышения долговечности гидроабразивной машины.

**Методы исследования и аппаратура:** исследование выполнялось на основе инженерных расчетов. Экспериментальные исследования проводились на гидроабразивной установке Waterjet 3000x2, на заводе ОАО «Дастан». При измерениях использованы камера 13 Мг пикселя, штангенциркуль, электронные весы, секундомер гидроабразивной установки.

**Полученные результаты и их новизна:**

* уплотнительное устройство отличается от известных устройств специальным профилем уплотняющих колец, обладающих повышенной чувствительностью к изменению давления. Новизна уплотнительного устройства защищена патентами КР №1688 и №1781;
* методика расчета геометрических параметров профиля уплотнительного устройства высокого и сверхвысокого давления с учетом изменяющегося перепада давления разработана впервые;
* зависимости скорости резания материалов, позволяющие выбрать рациональное значение плотности гидроабразивной струи и скорость ее подачи установлены впервые;
* усовершенствованная конструктивная схема смесительного устройства отличается от известных, отсутствием смесительной камеры и подбором угла между направлениями подачи гидравлической струи и подачи абразивных частиц.

**Степень использования:** конструкция уплотнительного устройства внедрена в гидроабразивной машине, методика расчета уплотнительного устройства высокого и сверхвысокого давления внедрена в учебный процесс.

**Область применения:** горная промышленость.

**05.05.06 – Тоо кен машиналары адистик боюнча техникалык илимдер кандидатына талапкер Райымбабаев Талай Ёмщрбековичтин «Табыгый таштарды иштетщщ щчщн гидрочарыктык машинадагы тыгыздооч жана араштыргыч тщзмёктётёрдщ иштеп чыгаруу жана ёлчём мщнёздёгщчтёрщн негиздёё» темадагы диссертациялык иштин**

**БИЛДИРМЕСИ**

**Тщйщн сёздёр:** тыгыздооч тщзмёк; аралаштыргыч тщзмёк; чарык бёлщкчёлёр; материалдарды гидрочарыктык иштетщщ; ётё жогору басым; чуурдун ылдамдыгы; аралаштыруу ж.б.

**Изилдёё объекти:** гидрочарыктык машина.

**Изилдёё буюму:** тыгыздооч жана араштыргыч тщзмёктётёр.

**Иш максаты:** гидрочарыктык иштетщщ ыкмасы менен майнаптуу уратуусун камсыздоочу «сщмбё-цилиндр» жуптагы жогору жана ётё жогору басымдарды тыгыздоо щчщн тыгыздооч жана аралаштыргыч тщзмёктётёрдщ изилдёё жана конструкцияларын иштеп чыгаруу.

**Изилдёё ыкмалары жана аппаратура:** изилдёё инженердик эсептёёнщн негизинде аткарылды. Экспериманталдык изилдёёлёр Waterjet 3000x2 гидрочарыктык орнотмодо, ОАО «Дастан» зоотунда аткарылды. Ченёёлёрдё 13 Мг пикселдщщ камера, штангенциркуль, электрондук тараза, гидрочарыктык орнотмонун секунд ёлчёгёчщколдонулду.

**Алынган жыйынтыктар жана алардын жаъылыгы:**

* окшош конструкциялардан автоматтык жёндёмдёёсщ жана басымдын ёзгёрщщсщнё ички шакектердин ётё сезимдщщлщгщ менен айырмаланган жогору жана ётё жогору басымдарды тыгыздооч тщзмёктщн конструкциясы иштеп чыгарылды, алардын жаъылыгы №1688 КР патенти менен корголонгон;
* шакектердин геометриялык ёлчём мщнёздёгщчтёрщн аныктоого мщмкщндщк берген жогору жана ётё жогору басымдарды тыгыздооч тщзмёктщ инженердик эсептёёсщнщн усулдугу иштеп чыгарылды;
* чарык бёлщкчёлёрдщн оптималдык формасын, ёлчёмдёрщн жана кёлёмщн тандоого мщмкщндщк тщзгён бёлщкчёлёрдщн сокуусунун энергисынын жана кубатуулугунун чарыктык бёлщкчёлёрдщн ёлчём мщнёздёгщчтёрщнён кёз карандылыгы аныкталды;
* багытооч тщтщктёрдун туруктуулугун жогурулатуусуна мщмкщндщк берщщчщ аралаштыргыч тщзмёктщн конструкциясы иштеп чыгарылды;
* аралаштыргыч жана тыгыздооч тщзмёктёрдщ камтыган кётёрмё гидрочарыктык аспаптын кончтруктивдик сёлёкётщ жана иш долбоору иштеп чыгарылды.

**Колдонуу дэъгели:** тыгыздооч тщзмёктщн конструкциясы гидрочарыктык машинга сиъирилди, жогору жана ётё жогору басымдарды тыгыздоочтун эсептёё усулдугу окуу жараянына сиъирилди.

**Колдонуу тармагы:** тоо кен ёндщрщшщндё.

**SUMMARY**

**dissertations of Raimbabaev Talai Omurbekovich on a theme: "Ground of parameters and development of уплотнительных and mixer devices of hydroabrasive machine for treatment of natural stones", on the competition of graduate degree of candidate of engineering sciences on speciality**

**05.05.06 are the Mountain machines**

**Keywords:** packoff; mixer device; abrasive particles; hydroabrasive treatment of materials; hyperpessure; speed of stream; mixing of and other.

**Research object:** hydroabrasive machine.

**Article of research:** compactor and mixer devices.

**The purpose of the work is:** substantiation of parameters and development of sealing and mixing devices of the waterjet installation to select the effective mode of operation and increase the durability of the waterjet machine.

**Research methods and equipment:** the study was performed on the basis of engineering calculations. Experimental studies were carried out on abrasive Waterjet installation 3000x2, at the plant "Dastan". The measurements used camera 13 Mg pixel, caliper, electronic scales, stopwatch waterjet.

**The results and their novelty:**

* the design of the sealing device of high and ultrahigh pressure differing from similar designs by automatic adjustment and the increased sensitivity of internal rings to change of pressure which novelty is protected by the patent No. 1688 KR is developed;
* developed a method of engineering calculation of the sealing device of high and very high pressure, which allows to determine the geometrical parameters of the rings;
* the dependences of the energy and power of the particle impact on the parameters of abrasive particles of the water jet are established, allowing to choose the optimal parameters of the shape, size and number of abrasive particles;
* developed design of mixing devices to enhance the resistance of the guide tubes;
* developed the constructive scheme and detailed design of a portable waterjet tool that contains mixing and sealing device.

**Degree of use:** the design of the sealing device is introduced in the waterjet machine, the method of calculation of the sealing device of high and ultrahigh pressure is introduced in the educational process.

**Application:** mountain industry