

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

УДК 622.236.32(043)

На правах рукописи

БУКАЕВА АМИНА ЗАХАРОВНА

**Исследование и разработка конструкции термодинамического рабочего
органа для поверхностной обработки блоков из крепких горных пород**

6D071200 – Машиностроение

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты
Поветкин В.В.
докт. техн. наук, профессор
КазННТУ им. К.И.Сатпаева,
Республика Казахстан
Хандожко А.В.
докт. техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО БГТУ,
Российская Федерация

Республика Казахстан
Алматы, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 ПРОБЛЕМА РАЗВИТИЯ КАМНЕДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ ДОБЫЧИ И ОБРАБОТКИ БЛОЧНОГО КАМНЯ ИЗ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД	14
1.1 Месторождения гранитов Казахстана и проблемы добычи блочного камня	14
1.2 Добыча и обработка блочного камня из крепких горных пород	18
1.3 Анализ развития конструкций огнеструйных термоинструментов для обработки и резки крепких горных пород по патентным материалам	21
1.4 Оценка огнеструйного способа добычи и обработки блочного камня и перспективы его применения	29
1.5 Цели и задачи исследования	39
Выводы по 1 разделу	39
2 ПРОЦЕССЫ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДОБЫЧИ И ОБРАБОТКИ БЛОЧНОГО КАМНЯ ИЗ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД	40
2.1 Теоретические основы огнеструйного разрушения горных пород .	40
2.2 Теоретическое обоснование механизма разрушения горных пород при добыче гранитных блоков термическим способом	46
2.3 Технология и оборудование для разработки гранитных месторождений с использованием бензовоздушных термоинструментов	51
Выводы по 2 разделу	56
3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ БЕНЗОВОЗДУШНОГО ТЕРМОИНСТРУМЕНТА С ИНТЕНСИФИКАТОРОМ ГОРЕНИЯ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД	57
3.1 Практика конструирования бензовоздушных термоинструментов для разрушения крепких горных пород с интенсификаторами горения	57
3.2 Методика расчета основных параметров горелки бензовоздушного термоинструмента	61
3.3 Интенсификация процесса горения в сверхзвуковом газодинамическом насадке	72
3.4 Обоснование применения газовых эжекторов для повышения мощности бензовоздушных термоинструментов	77

3.5	Расчет передачи теплового потока через стенку эжекционного насадка	81
3.6	Обоснование и расчет геометрических параметров новой конструкции бензовоздушного термоинструмента с эжекционным насадком	83
3.7	Методика определения кинематических параметров манипулятора для поверхностной огнеструйной обработки гранитных блоков методом крупного скола	88
	Выводы по 3 разделу	97
4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГРАНИТНЫХ БЛОКОВ	99
4.1	Методика расчета и обоснование параметров бензовоздушного термоинструмента и технологии огнеструйной обработки гранитных блоков	99
4.2	Исследование технологических параметров огнеструйного разрушения горных пород при поверхностной обработке блочного камня	103
4.3	Обоснование параметров новой конструкции бензовоздушного термоинструмента для разрушения горных пород	117
4.4	Технико-экономическое обоснование применения новой конструкции огнеструйных рабочих органов для обработки каменных блоков.....	121
	Выводы по 4 разделу	123
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	129
	ПРИЛОЖЕНИЯ	138

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:
ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 6666-81. Камни бортовые из горных пород.

ГОСТ 9479-98. Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий.

ГОСТ 9479-2011. Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий.

ГОСТ 9479-84 (СТ СЭВ 6315-88). Блоки из природного камня для производства облицовочных изделий.

ГОСТ Р 54122-2010. Безопасность машин и оборудования. Требования к обоснованию безопасности.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяются следующие термины и соответствующие определения:

Термоинструмент – предназначен для поверхностной обработки крупных блоков при их пассировке, а также при других видов обработки.

Камера сгорания, сопло – основные детали термоинструмента, выполненные из жаропрочных сталей.

Ударная волна – в окружающей среде (газовой, жидкой, твердой) скачок давления или волна возмущений, вызываемые быстро расширяющимися сжатыми газами.

Горная выработка – искусственная полость, сделанная в недрах земли или на поверхности.

Эжектор – устройство для эжектирования (всасывания) атмосферного воздуха.

Пассировка – метод крупного скола горной породы для доработки поверхности блоков до требуемого размера.

Манипулятор – автоматическое устройство для ориентации рабочего органа в различных направлениях (плоскостях).

Промышленный робот (ПР) – предназначенный для выполнения двигательных и управляющих функций в производственном процессе, манипуляционный робот, т.е. автоматическое устройство, состоящее из манипулятора и перепрограммируемого устройства управления, которое формирует управляющие воздействия, задающие требуемые движения исполнительных органов манипулятора.

Рабочий орган ПР – составная часть его исполнительного устройства для непосредственного выполнения технологических операций и (или) вспомогательных переходов.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ФГБОУ ВО БГТУ - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет";

США – Соединенные штаты Америки;

ЭВ 200 – Эмис вихрь 200 (вихревой расходомер);

ПППВ – поступательная пара, вращательная пара;

АЗОК – Алматинский завод по обработке камня;

МВТУ им. Н.Э.Баумана – Московское высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана;

Гипрорудмаш – Государственный институт по проектированию машин для горнорудной промышленности;

КазПТИ им. В.И.Ленина – Казахский политехнический институт имени В.И.Ленина;

ХАИ – Харьковский авиационный институт;

ТРВ-12М1, БВР-60М1 – бензовоздушные термоинструменты;

ТР-14/22-5 – керосино-кислородный термоинструмент;

ПКС-5, ЗИФ-55, ДК-9М – воздушные компрессорные станции;

МГИ – Московский горный институт;

ГОК – Горно-обогатительный комбинат;

ФРГ – Федеративная Республика Германия;

ИГТМ – Институт геотехнической механики;

КПД – коэффициент полезного действия;

СНГ – Содружество Независимых Государств;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

САПР – система автоматизированного проектирования;

ПР – промышленный робот;

КП – кинематическая пара;

ГП – гранитный прямолинейный.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технологической проблемы

В настоящее время в Казахстане наблюдается ряд тенденций, требующих развития и модернизации инфраструктуры. В условиях переходного периода Казахстана от плановой к рыночной экономике её минерально-сырьевые ресурсы приобретают исключительно важное значение. В условиях жесткой международной конкуренции Президентом Республики Казахстан поставлена задача диверсификации отечественной экономики [1].

Несмотря на то, что запасы гранитов в странах содружества значительно выше, чем в зарубежных странах, добыча и обработка их отстает в 3 - 4 раза по сравнению с Италией, Бельгией, США, Великобританией.

Природный камень занимает особое место среди обширной номенклатуры строительных материалов. За последние 70 лет мировое производство природного камня увеличилось почти в 25 раз, при этом в течение последних двадцати лет ежегодный прирост производства и потребления камня в среднем составлял 7,4%. По прогнозным оценкам, на ближайшие десятилетия, этот рост продолжится и мировая добыча камня увеличится более чем в 4 раза. Гранит удивительно прочен, несложен в обработке и, главное, невероятно красив, причем обладает колоссальным множеством расцветок.

На казахстанском рынке природного камня также прослеживается устойчивая тенденция роста объемов потребления данного материала. Начиная с 1999 г. потребление природного камня в Казахстане возрастает в среднем на 10...12 % в год [2].

Однако, из-за низкого технического уровня предприятий отрасли, обусловленного отсутствием эффективных средств добычи и обработки крепких пород, эти природные богатства используются недостаточно. Потребности народного хозяйства стран содружества в изделиях из природного камня обеспечиваются лишь на 10...15 %, а запросы экспорта – на 5...10 %. Развитие камнеобрабатывающих отраслей промышленности рассматривается как одна из перспективных задач, решение которой возможно за счет внедрения совершенной технологии и высокопроизводительного оборудования.

Вместе с тем, столь стремительный рост спроса на природный камень отнюдь не означает аналогичных темпов развития отечественной камнедобычи и камнеобработки. Чтобы устоять конкуренции импортных производителей каменных изделий необходимо внедрить в отечественную промышленность высокоэффективные инструменты, машины и технологические линии, не уступающих своим зарубежным аналогам.

Основание и исходные данные для разработки темы

Основанием для разработки темы диссертационной работы является в выборе и обосновании параметров термоинструментов для поверхностной обработки горных пород, позволяющих повысить их производительность разрушения при обработке блоков горных пород и резке щелевых выработок.

Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы

В работе рассмотрены вопросы технологического и конструктивного совершенствования термоинструмента, в результате которого разработан экспериментальный образец термоинструмента с повышенными теплофизическими параметрами.

Основание необходимости проведения научно-исследовательской работы заключается в повышении тепловых потоков термоинструментов для обработки крепких горных пород, за счет организация нового способа горения топливных компонентов в ударных волнах, инициируемых в специальном эжекционном насадке в высокоскоростной сверхзвуковой струе термоинструмента, без развития размеров их конструкции и снижение расходных характеристик топливных компонентов за счет полноты сгорания.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, о патентных исследованиях и выводы из них

В планируемую научно-техническую разработку входило теоретическое обоснование и практическое подтверждение эффективности предлагаемой конструкции термоинструмента, реализующего новый вид горения топливной смеси в сверхзвуковой струе горелки, истекающей из сопла Лавалья в цилиндрическую полость эжекционного насадка, в ударных волнах. Научно-технический уровень разработки подтверждается использованием современных методов исследования и анализа литературных данных и патентных материалов в области развития конструкций огнеструйных горелок для разрушения крепких горных пород при добыче и обработке блочного камня.

Патентный поиск в направлении развития конструкции термоинструментов и их исследования показал наличие ряда запатентованных работ, близких к предложенным техническим решениям: Прибор для термической резки и обработки горных пород / А.с. SU 160019 Кл. В28D 1/00; Огнеструйная горелка / А.с. SU 1017504 Кл. В28D 1/00, 1983; Горелка термоинструмента / Патент 15191 Кл. В28D 1/00, 2004; Устройство для термического разрушения минеральных сред струями раскаленного газа / А.с. SU 575418 Кл. E21C 21/00, 1977; Огнеструйная горелка для термического разрушения минеральных сред / А.с. SU 724720 Кл. E21C 21/00, 1980; Устройство для термического разрушения твердых сред / А.с. SU 1209855 Кл. E21C 37/16, 1986; Устройство для термического разрушения горных пород / Патент 20976 Кл. В28D 1/00, 2009; Устройство для термического разрушения горных пород / Патент 23135 Кл. В28 D 1/00, 2010; Термический резак для резки камня с двумя соплами / Патент 29758 Кл. E21C 37/16, 2015.

Однако, в результате исследования патентных материалов, видно, что авторы своих изобретений кардинально не подошли к решению проблемы повышения тепловой мощности термоинструментов без увеличения их конструктивных размеров. Нами предложен способ повышения тепловой мощности термоинструментов путем сжигания топливных компонентов в сверхзвуковой струе, истекающей из сопла Лавалья термоинструмента. Для этого разработана новая конструкция термоинструмента, реализующей выше

указанный способ.

По результатам исследований подано 3 зарегистрированных заявки на «Устройство для термического разрушения горных пород» и «Способ и устройство для разработки месторождений тяжелой нефти или битума», регистрационные номера №2018/0227.1, №2018/0228.1 от 12.04.2018 г. и №2018/0948.1 от 14.12.18 г. в РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК на получение патентов на изобретение, подтвержденных положительным результатом формальной экспертизы.

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации

Исследования по теме диссертации выполнены с использованием современных приборов и оборудования. Эксперименты были обеспечены контрольно-измерительными приборами по замеру весовых характеристик, приборов по измерению давления топливных компонентов и расходомера ЭВ200 (давление до 25 атм., расход воздуха до 810 м³/час), установленного на воздушном магистрале.

Исходными материалами для исследования служили стенд по испытанию термоинструментов. Результаты, полученные в работе, основываются на известных апробированных инженерных методов расчета, методов математической статистики при обработке данных с использованием ЭВМ. Сходимость экспериментальных данных и теоретических расчетов подтверждена актами испытания и внедрения.

Актуальность темы

Создание термоинструментов повышенной мощностью, при сохранении конструктивных параметров, является важной конструктивной и технологической задачей, а при оснащении этими инструментами манипуляционных устройств, позволит полностью механизировать ручной труд, защитить рабочего и окружающую среду от шума, повысить производительность и культуру труда, обеспечить безопасность работы.

Однако существуют нерешенные проблемы в теории разрушения и в практике конструирования механизированных термоагрегатов, с разработкой которых необходимо их решение. А именно, уточнение механизма разрушения горных пород при различных способах ориентации газовых струй и физико-механических свойств разрушаемых пород; определение рациональных технологических параметров обработки и конструктивных параметров термоинструментов; разработка эффективных рабочих органов термоинструментов, реализующих новые способы сгорания топливной смеси; обеспечение нормальных санитарно-гигиенических условий работы работающих.

Следовательно, задачи исследования процесса разрушения крепких горных пород, разработка на этой основе инженерного метода расчета параметров термоинструментов, совершенствование технологии механизированной добычи и обработки блочного камня, являются актуальными, решение которых позволяет повысить эффективность термического способа разрушения.

Научная новизна темы заключается в разработке термоинструментов для поверхностной обработке и резке блочного камня из крепких горных пород,

реализующих в своей конструкции новый способ горения топливных компонентов в сверхзвуковой высокотемпературной струе горелки, истекающей из сопла Лавалья в специальный эжекционный насадок.

Установлено и экспериментально доказано, реализация этого способа горения топливных компонентов в специальном эжекционном насадке, установленного на срезе выходного диаметра сопла Лавалья.

Диссертация выполнялась в соответствии с инновационным проектом кафедры «Стандартизация, сертификация и технология машиностроения» №753.МОН.ГФ.13.5 «Разработка новой конструкции машины с мощным термодинамическим рабочим органом для проведения щелевых выработок при добыче гранитных блоков» и целевой программой Министерства науки и новых технологий Республики Казахстан «Научно-технические проблемы машиностроения и создание новых высокоэффективных машин и аппаратов» №04-1-1/1015.

Целью исследований является разработка конструкции термодинамического рабочего органа для поверхностной обработки блоков из крепких горных пород, реализующего новый вид горения – в ударных волнах в сверхзвуковой струе термоинструмента, позволяющего создать конструкцию повышенной мощности и экономичной в использовании.

Объект исследования - обработка блоков из крепких горных пород термоинструментами повышенной мощности.

Предмет исследования - инструменты для огнеструйной обработки крепких горных пород.

Задачи исследований, их место в выполнении научно-исследовательской работы в целом:

- анализ современного состояния камнедобывающей отрасли добычи и обработки блочного камня из крепких горных пород;
- обоснование использования высокоскоростных огневых струй в технологических процессах и производствах;
- исследование процессов, технологии и оборудования для добычи и обработки блочного камня из крепких горных пород с применением огнеструйных горелок;
- обоснование параметров конструкции бензовоздушного термоинструмента с интенсификатором горения для разрушения крепких горных пород;
- экспериментальные исследования новой конструкции бензовоздушного термоинструмента для обработки гранитных блоков;
- обоснование применения промышленного робота с огнеструйным рабочим органом для поверхностной обработки крупных блоков из крепких горных пород.

Исследования проводились в лабораториях кафедры «Стандартизация, сертификация и технология машиностроения» КазНУТУ им. К.И. Сатпаева, кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», в научно-исследовательской лаборатории «Модульного технологического оборудования» Брянского государственного технического университета (Россия, г.Брянск) и на

камнеобрабатывающем предприятии ИП «Титушин» (Алматы).

Методологическая база исследований

Результаты исследования получены на основе теоретических и практических положений теории газодинамики, теплопроводности и теория горения углеводородных топлив, а также теории планирования эксперимента и статистической обработки данных. Экспериментальные исследования проводились в стендовых условиях на действующем оборудовании с использованием оригинальных методик и современной измерительной аппаратуры, методов математического и физического моделирования.

Научная новизна работы

В работе получены следующие новые научные результаты:

- осуществлено моделирование процесса разрушения горных пород термоинструментами с интенсификаторами горения, с использованием многофакторного эксперимента, позволяющее получить уравнения регрессии для определения их режимных параметров работы;

- установлено, что в сверхзвуковом потоке газа, истекающего из сопла Лавалья горелки в цилиндрическую перфорированную камеру насадка, трением о внутренние стенки насадка и контакта с холодным атмосферным воздухом, образуется мощный стационарный скачок уплотнения – ударная волна, питающаяся кислородом из эжектируемого, через перфорацию насадка, атмосферного воздуха, чем обеспечивается интенсивное догорание горючего в струе;

- установлены аналитические зависимости теплового потока горелки термоинструмента, температуры газа на срезе сопла, температуры в камере сгорания и скорости истечения факела от коэффициента избытка окислителя, при различных расходах горючего, позволяющие обосновать структурные и режимные параметры новой конструкции термоинструмента с эжекционным насадком: определить температуру смешанного потока; параметры выходного сечения сопла эжекционного насадка, диаметр свободной струи и ее длину;

- экспериментально установлена эффективная зона разрушения горной породы по длине струи факела, составляющая 0,05...0,35 м, что обеспечивается бензовоздушной горелкой с насадкой – интенсификатором горения, при расходе топливных компонентов: бензина – 0,0035...0,0077 кг/с; воздуха – 0,1057...0,228 кг/с, при коэффициенте избытка окислителя $\alpha_T = 0,7...1,1$.

Положения, выносимые на защиту:

- построенная модель процесса разрушения горных пород термоинструментами с интенсификаторами горения, с использованием многофакторного эксперимента, позволяет получить уравнения регрессии для определения их режимных параметров работы;

- интенсивное догорание горючего в сверхзвуковом потоке газа, истекающим из сопла Лавалья горелки в цилиндрический перфорированный насадок, обеспечивается повышением тепловой мощности потока, за счет трения о внутренние стенки насадка и контакта с холодным атмосферным воздухом и, вновь образованного мощного стационарного скачка уплотнения – ударной

волны, питающейся кислородом из эжектируемого, через перфорацию насадка, атмосферного воздуха;

- методика расчета конструктивных и режимных параметров новой конструкции термоинструмента с эжекционным насадком, включает расчет теплового потока горелки базового термоинструмента, температуры газа на срезе сопла Лавалья, температуры в камере сгорания и скорости истечения факела от коэффициента избытка окислителя при различных расходах топливных компонентов;

- экспериментально определена эффективная зона разрушения горной породы по длине струи факела, которая обеспечивается бензовоздушной горелкой с насадкой – интенсификатором горения, при установленном расходе топливных компонентов – бензина и воздуха, а также коэффициента избытка окислителя.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- выполнено обоснование и расчет геометрических параметров новой конструкции бензовоздушного термоинструмента с эжекционным насадком, определены основные параметры давления во входном сечении камеры смешения, а также основные геометрические размеры газоструйного эжектора с диффузором, изготовлен опытный образец горелки с газодинамическим насадком;

- разработана методика определения технологических параметров огнеструйной обработки (разрушения) поверхности блоков из крепких горных пород, включающая: толщину отделяемой частицы; время отделения частиц от массива; линейную скорость разрушения; потребный тепловой поток; объемную производительность разрушения; продольную скорость перемещения обрабатываемого блока горной породы; производительность разрушения при грубом сбое; общую производительность разрушения;

- предложена структурная схема манипулятора промышленного четырехзвенного робота типа ПППВ, описываемая в виде матрицы однородного преобразования методом Денавита-Хартенберга и установлены аналитические зависимости четырехзвенного манипулятора с учетом действующих сил и моментов (инерциальные, центробежные, кориолисовы и гравитационные);

- на базе термоинструмента ТРВ-12М разработана новая конструкция бензовоздушного термоинструмента повышенной мощности, с эжекционным насадком, прошедшего производственные испытания и рекомендованного к внедрению;

- ожидаемая годовая экономическая эффективность внедрения термоинструментов с интенсификаторами горения для обработки крупных блоков из крепких горных пород составит более 2 760 тыс. тенге в год.

Результаты исследования переданы для внедрения в производство камнеобрабатывающего предприятия по обработке камня ИП «Титушин» (Казахстан) и использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров по специальности 5В071200 – «Машиностроение» в КазНУТУ имени К.И. Сатпаева.

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты исследования докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Геологоразведочное и нефтегазовое дело в XXI веке: технологии, наука, образование», посвященной 50-летию кафедры «Технология и техника бурения скважин» (Алматы, 2016); XII международной заочной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке» (Харьков, 2016); the 22-nd International conference on Vibroengineering "Dynamics of Strong Nonlinear Systems" (Moscow, 2016), the 24-th International Conference on Vibroengineering "Theories, Technologies and Applications in Vibration Engineering" (Shanghai, 2016), Международной научно-технической конференции Сатпаевских чтений «Научное наследие Шахмардана Есенова» (Алматы, 2017); XXIII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2016), XXIV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2017).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ККСОН МОН РК; 3 статьи в научных журналах РК и РФ, 9 публикации на международных конференциях, 7 из которых - зарубежных, из них 2 статьи в базе данных Scopus; 1 статья в научном журнале в базе данных Scopus; 3 зарегистрированных заявок в РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК на получение патентов на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 137 страницах, содержит 61 рисунок, 16 таблиц, 132 использованных источников и 7 приложений.

1 ПРОБЛЕМА РАЗВИТИЯ КАМНЕДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ ДОБЫЧИ И ОБРАБОТКИ БЛОЧНОГО КАМНЯ ИЗ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

1.1 Месторождения гранитов Казахстана и проблемы добычи блочного камня

Одним из наиболее надежных и эстетичных строительных материалов зарекомендовал себя гранит. Вот уже многие века этот массивный и в то же время элегантный природный камень широко используется при облицовке зданий, фасадных и цокольных работах, покрытии полов, в дорожном и гражданском строительстве, обладает долговечностью, прочностью и декоративностью.

В строительной практике гранитами называют собственно граниты, диориты и сиениты. Эти камни представляют собой массивные кристаллические породы, состоящие, в основном, из полевых шпатов, слюды и кварца, содержание кварца в гранитах – до 30 %.

Месторождения гранитов позволяет получать блоки объёмом в несколько кубических метров; отдельные карьеры дают очень крупные монолиты, которые используют для монументов [2-4].

По мере повышения объемов производства и развития техники и технологии, высокая стоимость натуральных строительных материалов будет постепенно снижаться, что будет способствовать дальнейшему распространению изделий из природного камня.

В 2008 – 2009 гг. произошло сокращение объемов добычи и переработки в связи с кризисом, и в 2013 г. рынок практически восстановился. К 2025 г. ожидается, что объем добычи природного камня возрастет до 200 млн.т в год или более, чем в 2-2,5 раза по сравнению с уровнем 2000 г. [5,6,7].

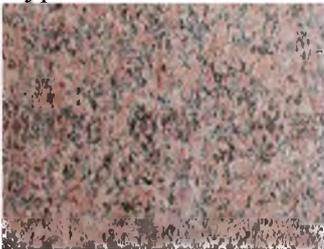
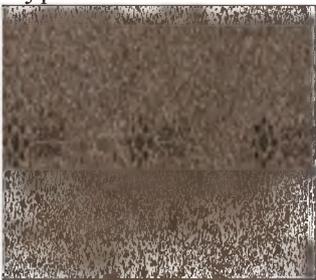
Природный камень – древнейший строительный материал, используемый человечеством на протяжении всей истории существования цивилизации. Из глубокой древности дошли до нас египетские пирамиды, индийские и греческие храмы, дворцы Европы и Азии.

Республика Казахстан располагает крупными запасами строительного камня крепких горных пород, пригодного для производства облицовочных и промышленных изделий. Значительные запасы этих пород в Восточном, Центральном и Южном Казахстане представлены гранитами разнообразного состава и различных расцветок. К ним относятся уже разрабатываемые уникальной голубовато-зеленоватой окраски амазонитовые граниты месторождения Майкуль, красные граниты Курдайского и Акбакайского месторождений, гранодиориты месторождения Кайракты, граниты месторождений Курты, Арасан-Капал, Алатагыл, Желтау и другие [8,9,10].

Различают три структуры гранита по величине зерен: крупнозернистую – выше 10 мм, среднезернистую – до 10 мм, мелкозернистую – до 2 мм. Граниты благодаря высокой механической прочности и силикатному характеру составляющих минералов отличаются высокой погодостойкостью.

В таблице 1.1 приведены основные месторождения гранитов Казахстана.

Таблица 1.1 – Месторождения гранитов в Казахстане

№ п/п	Наименование месторождения	Местоположение	Цвет и структура	Основные характеристики
1	Месторождение Джельтау Желтый 	Моинкумский район, Жамбылская область	Гранит месторождения Джельтау желто-коричневый. Структура среднезернистая.	Водопоглощение: 0,27 % Объемная масса: 2560 кг/м ³ Истираемость: 0,25 г/см ² Пористость: 1,3 % Предел прочности при сжатии: 110 МПа Радиационная характеристика: 1 класс Морозостойкость: 25 циклов
2	Месторождение Джельтау Красный 	Моинкумский район, Жамбылская область	Гранит месторождения Джельтау красного цвета. Структура среднезернистая.	Водопоглощение: 0,11 % Плотность: 2695 кг/м ³ Истираемость: 0,93 г/см ² Пористость: 1,4 % Предел прочности при сжатии: 138 МПа Радиационная характеристика: 1 класс Морозостойкость: 50 МРЗ
3	Месторождение Курдайское 	Жамбылская область, в 23 км от ж.д. станции Отар.	Гранит Курдайского месторождения красный, розовый. Структура мелкозернистая.	Водопоглощение: 0,29 % Средняя плотность: 2620 кг/м ³ Истираемость: 0,7 г/см ² Предел прочности при сжатии: 144 МПа
4	Месторождение Куртинское 	Куртинский район, 140 км к северо-западу от г. Алматы, в 28 км к западу от пос. Курты. Разведано в 1978 г.	Гранит Куртинского месторождения варьируется от светло-коричневого до темно-коричневого. Структура мелкозернистая.	Водопоглощение: 0,22 % Средняя плотность: 2880 кг/м ³ Сопротивление удару: 65 см Пористость: 1,35 % Предел прочности при сжатии: 209 МПа Предел прочности при изгибе: 40 МПа Истираемость: 0,21 г/см ²

Гранит сегодня является популярным отделочным материалом в мире. Его потребление уже давно превышает 500 млн. м², а обороты по его продаже исчисляются десятками миллиардов долларов.

Начиная с 1999 г. потребление природного камня в Казахстане возрастает в среднем на 10 – 12 % в год. Вместе с тем, столь стремительный рост спроса на

природный камень отнюдь не означает аналогичных темпов развития отечественной камнедобычи и камнеобработки [11].

В Казахстане насчитывается около 10 крупных месторождений крепких горных пород, таких как Курдайское (Кордайское), Куртинское, Акбакайское, Жалгызское, Майкульское, Жельтауское и др. [12,13].

Первые работы на казахстанских месторождениях проводились в 50-х годах прошлого столетия. Их целью было определение использования гранитов в качестве облицовочного материала.

В 1965 году, в связи со строительством Алма-Атинского завода по обработке камня, в числе прочих разведывалось и в Курдайском районе месторождение гранита. Скважинами оно было изучено до глубины 25 м. В 2000-2001 году был разведан участок «Раздольный» Курдайского месторождения гранита с запасом 641,6 тыс. куб. метров [14].

Горные породы имеют примерно одинаковый объемный вес и низкую пористость. Наибольшей пористостью обладает Алматинский (Куртинский) гранит. Граниты характеризуются почти одинаковыми теплофизическими свойствами. При сравнении скорости бурения гранитов термическим способом, в зависимости от их минералогического состава, наблюдается прямая зависимость скорости бурения от процентного содержания биотита. С увеличением содержания биотита снижается скорость термического бурения. Хорошо бурятся породы с содержанием биотита с 6 до 12 %, а свыше – труднобуримые. Влияние биотита на эффективность термобурения объясняется его способностью к дегидратации, резко снижающей упругие свойства и температуру плавления гранитов (таблица 1.2) [15,16,17].

Таблица 1.2 – Теплофизические свойства, минералогический состав и термобуримость гранитов

№	Показатели	Месторождение гранитов	
		Алматинское (Куртинское)	Курдайское (Кордайское)
1	Объемный вес, $g, g/cm^2$	2,56	2,59
2	Пористость, %	7,24	2,7
3	Предел прочности на растяжение σ_p , МПа	6,1	10,2
4	Предел прочности на сжатие, σ , МПа	190,0 - 220,0	200,0 - 250,0
5	Модуль упругости, $E, 10^6, Па$	1,3	3,1
6	Коэффициент Пуассона, μ	0,26	0,25
7	Коэффициент температуропроводности, $k, 10^3 м^2/ч$	9,59	4,73
8	Коэффициент теплопроводности, λ , ккал (м.ч.град)	2,3	2,69
10	Удельная теплоемкость, $C, \times 10^3$ ккал (м ³ /град)	0,24	0,22
11	Температура плавления, $T, ^\circ C$	1300	1250
12	Коэффициент термической пластичности	1,0	1,0

Продолжение таблицы 1.2

13	Показатели термобуримости, II	0,052	0,123
14	Содержание минералов в % по объему:		
	Плагиоклаз	25	41
	Калиевый полевой шпат	25	18
	Кварц	40	31
	Биотит	10	9
	Акцессорные	не опр.	1,0
15	Скорость термобурения:		
	Объемная, см ³ /мин	8,0	28,0
	Линейная, м/ч	4,0	14,0

Качество сырья для производства облицовочных материалов определяется физико-механическими свойствами, декоративностью и блочностью пород. Физико-механические свойства полезного ископаемого определяют способ добычи, обработку камня, затраты на обработку, износостойкость и долговечность [16,18].

Требования промышленности к физико-механическим свойствам и блочности пород определяются ГОСТ 6666-81 «Камни бортовые из горных пород», ГОСТ 9479-98 «Блоки из природного камня для производства облицовочных изделий», ГОСТ 9479-2011 «Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий».

Сопоставительный анализ добычи и переработки природного камня в мире и в Казахстане показывает, что, несмотря на большие запасы и разнообразие природного камня в нашей стране, огромный рынок сбыта камнепродукции, эта отрасль сильно уступает мировому уровню. Ряд стран наращивает объемы добычи и поставок камня разных видов и качества, особенно высококачественных изделий, тогда как отечественная камнепродукция в своем большинстве неконкурентоспособна на мировом рынке.

Техническое оснащение и производственные технологии карьеров и камнеобрабатывающих предприятий, сформированные еще при централизованной плановой экономике, ненаучности и неэффективны в современных условиях рыночных отношений. Все это обуславливает актуальность для отечественного камнепроизводства инновационной деятельности [19].

Специфика работы карьеров по добыче блочного камня накладывает условия, как на средства, так и на организацию добычных работ. Все подчинено сохранению целостности камня. Как показывает практика работы карьеров, даже при правильном использовании трещин и микроориентировки минералов выход крупных блоков из горной массы практически редко превышает 25...30%.

Большое значение при организации работы в карьере имеет знание анизотропности строения массива, которое следует учитывать при выборе способов и направления разработки. Анизотропность строения массивов

отмечается в гранитах, что облегчает раскол камня по определенным направлениям [20].

Все более растущий спрос на природный камень стимулирует развитие мировой камнедобычи и камнеобработки. За последние 70 лет мировое производство природного камня увеличилось почти в 25 раз, при этом в течение последних двадцати лет ежегодный прирост производства и потребления камня в среднем составлял 7,4%. Динамика мировой добычи природного камня представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Динамика мировой добычи природного камня, млн. т

Вид камня	1986	1996	2000	2001	2007	2011	2016
Мрамор	13,1	26,5	32,1	36,5	41,2	59,6	75,5
Гранит	7,4	17,6	23,3	29,7	36,0	51,3	69,8
Прочие	1,2	2,4	2,9	2,9	3,2	5,8	8,9
Всего	21,7	46,5	58,2	69,0	80,4	116,7	154,2

Рост мирового потребления природного камня связан с развитием строительной индустрии. Эта продукция подразумевает высокую степень стандартизации, что способствует широкому распространению изделий из камня [21,22].

1.2 Добыча и обработка блочного камня из крепких горных пород

Горные породы, содержащие кальцит, доломит, гипс и ангидрит, отличаются меньшей прочностью, но обладают повышенной вязкостью, ухудшающей их способность к раскалыванию, малой абразивностью и хорошей буримостью. Эти породы хорошо обрабатываются всеми механическими способами, но не поддаются термическому бурению и обработке (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Способы обработки блоков горной породы

Способ обработки, инструмент	Производительность, м ² /ч	Стоимость, долл/м ²	Область применения	Принцип разрушения	Примечание
Пильные абразивные диски	1,0 – 2,0	38,74 – 79,83	Облицовочные плиты	истирание	Московский камнеобрабатывающий завод
Керосино-кислородные термоинструменты	1,5 – 2,0	21,42	Тесаные изделия	шелушение	АЗОК и др.
Бензовоздушные термоинструменты	1,0 – 1,2	26,55	Тесаные изделия	шелушение	АЗОК и др.
Алмазные дисковые пилы	2,0 - 3,0	26,55	Ступени, плиты, бордюрные камни	истирание	Промышленное применение

Увеличение объемов добычи и обработки камня было достигнуто путем широкого внедрения прогрессивного термического (огнеструйного) способа разрушения, коренным образом отличающегося от всех известных способов разрушения, как по характеру физического воздействия, так и по технологической схеме.

Способ заключается в том, что на породу воздействует сверхзвуковой высокотемпературный газовый поток, в результате чего в ней возникают термические напряжения, приводящие к разрушению поверхностного слоя, положительное явление которого используется при поверхностной обработке блочного камня [17].

Способ огнеструйного направленного разрушения горных пород с 1950 г. начал применяться при бурении взрывных скважин, а с 1957 года по предложению ученых Казахского политехнического института и Харьковского авиационного институтов его внедрили для обработки природного камня [23,24,25,26].

Разработке принципов расчета и проектирования термобуров посвящены работы ученых А.В.Бричкина, М.И.Великого, И.П.Голдаева, А.П.Дмитриева, Е.П.Полевичека, И.П.Попова, А.Н.Москалева, А.А.Галяса, А.В.Моторненко, А.В.Ягупова, А.В.Болотова, Б.Р.Ракишева, Ю.Н.Бабина, А.Н.Генбача, В.В.Поветкина и др. В этих работах заложены основы теории реактивных горелок для термического бурения, обработки и резки горных пород, предложены методики их расчета и выбора конструктивных параметров.

На предприятиях США, занятых разработкой гранита, огнеструйные камнерезные установки, использующие в качестве окислителя кислород, достигают производительности от 1,35 до 1,5 м²/ч реза, производительность же бензовоздушных резаков – от 0,5 до 0,8 м²/ч. Такие же установки работают с 1960 года на карьерах Бренвуда (Англия), обеспечивая производительность резания 1,2...2.6 м²/ч (термоинструмент был приобретен в США у компании Linde) [27,28].

Успешно применяется термический способ на гранитных карьерах ФРГ (карьер «Реуль» в Фихтенберге), а также во Франции. Во Франции производительность резки гранитов достигает 2 м²/ч при ширине вруба 0,08 м. Стоимость отбойки гранитных блоков с применением термического способа составляет около 27 новых франков на 1 м³, при этом на кислород расходуется около 80...85 % общей суммы затрат на отбойку.

Для снижения себестоимости отбойки блоков применяется комбинированный способ отбойки, при котором продольные грани блока отделяются от забоя терморезаком, а торцевые – обычным клиновым способом.

Из ранее проводимых исследований огнеструйного способа направленного разрушения горных пород, широко известны работы МВТУ им. Н.Э.Баумана, института Гипрорудмаш, Харьковского авиационного института, горных институтов Москвы и Ленинграда, Днепропетровского института геотехнической механики, Казахского политехнического института им. В.И.Ленина и ряда других организаций.

Огнеструйный способ разрушения обеспечивает резание и обработку горных пород на современном уровне с высокими скоростями. Так, производительность резания кислородно-керосиновыми термоинструментами достигает $1,3 \text{ м}^2$ площади реза в час, а бензовоздушной – $0,8 \text{ м}^2/\text{ч}$ [29,30].

Разнообразные инструменты, применяемые при ударной и термической обработке камня, могут быть разделены по принципу действия на три основных вида: ручные ударные, пневматические и термические. В зависимости от назначения они делятся на инструменты для приближенной и для точной обработки камня [8].

В настоящее время на смену огнеструйной обработки поверхности блочного камня применяются алмазные диски и канатные пилы [31,32,33].

На рисунке 1.1 показан процесс распиловки гранитного блока дисковой алмазной пилой на Куртинском гранитном карьере.

На рисунке 1.2 представлены изделия, обработанные дисковой алмазной пилой.



Рисунок 1.1 – Процесс распиловки гранитного блока дисковой алмазной пилой



а) бортовой камень; б) распиловка на тонкие плиты

Рисунок 1.2 – Изделия, обработанные дисковой алмазной пилой

Способ нашел широкое применение из-за массового изготовления алмазнесущих элементов, сравнительно низкой себестоимости, имеется опыт применения дисковых алмазных пил до диаметра 3 м. Способ отличается снижением шумовых характеристик и возможностью их использования в закрытых помещениях. Алмазные канатные пилы с алмазнесущими элементами, начали широкое применение для добычи и распиловки блоков.

Канатная распиловка получила распространение для резания пород разной твердости. Ее развитие идет в трех направлениях: канатная распиловка с помощью абразива, алмазно-канатная распиловка и распиловка канатами, армированными твердосплавными шайбами [32].

Среди физико-технических методов обработки камня широкое применение нашел метод обработки камня терморреактивными газовыми горелками бензино-воздушного и керосиново-кислородного типов. Бензино-воздушные термоотбойники применяют для изготовления архитектурно-строительных деталей и монументов из пород высокой крепости. Использование термоотбойников повышает производительность и улучшает условия труда, снижая при этом себестоимость продукции.

Оригинальное решение по камнеобработке представляет плазменное разрушение пород кристаллической структуры. Вытекающая из плазматрона струя со скоростью до 1000 м/с и с температурой до 2400 °С практически режет камень [34].

Обработка камня лазерами проводится в направлении полного разрушения горной породы или ее ослабления для последующего разрушения горной породы механическими способами.

Перспективен способ обработки камня высокоскоростной водяной струей, подаваемой под давлением более 10 МПа через сопло диаметром в несколько миллиметров. За счет кинетической энергии струя прорезает за один проход камень на глубину до 4 см. Если сочетать водные струи с электрогидравлическим эффектом (пульсация струи до 300...3000 импульсов в минуту), то можно эффективно разрушить породу любой прочности [35,36].

Однако, эти три способа обработки горных пород плазменными горелками, лазером и высокоскоростной водяной струей находятся в стадии опытных исследований.

1.3 Анализ развития конструкций огнеструйных термоинструментов для обработки и резки крепких горных пород по патентным материалам

Существующие конструкции горелок для огнеструйной добычи и обработки блоков из крепких горных пород, работающие на тяжелых видах топлива (керосин, дизельное топливо, бензин) и в качестве окислителя использующие воздух, успешно используются на камнеобрабатывающих и камнедобывающих предприятиях. Эти горелки обладают высоким термическим эффектом [25].

Использование бензовоздушных горелок в качестве рабочих органов механизированных термоагрегатов сдерживается сравнительно низкой их мощностью, при увеличении которой быстро возрастают их габаритные

размеры, а также малыми размерами факела горелки (0,1...0,15 м), при использовании схемы обработки факелом горелки по всей его длине – "полосового источника". По этой схеме обработки газовая струя горелки направлена параллельно обрабатываемой поверхности и заглублена внутрь породы на 0,3...0,5 диаметра сопла горелки.

Однако ввиду простоты работы и организации питания топливными компонентами бензовоздушных термоинструментов их использование в качестве рабочих органов механизированных установок является актуальным. Повышение мощности бензовоздушных термоинструментов, без значительного развития их габаритных размеров и увеличения размеров факела горелки, соизмеримого с размерами обрабатываемых поверхностей изделий из камня (бортовой камень, ступени и др.), возможно за счет интенсификации процессов горения [37,38].

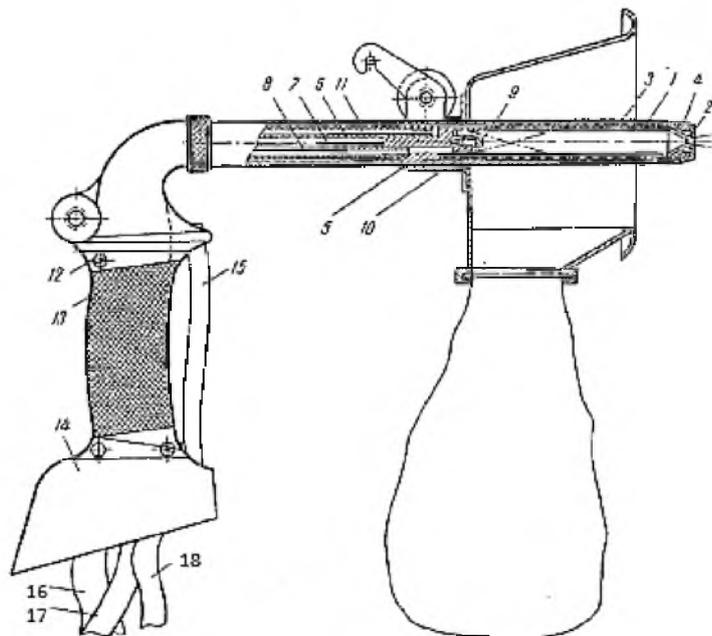
Одним из средств интенсификации горения свободных струй за пределами среза сопла Лавалья является дожигание продуктов неполного сгорания в сверхзвуковой струе факела горелки [14].

Основным инструментом для огнеструйного разрушения можно считать авторское свидетельство №160019 выданное А.В.Бричкину и А.Н.Генбач [25]. Описываемый прибор, для термической резки и обработки строительного камня струей газа с получением ровной поверхности заданной формы, отличается от известных тем, что он снабжен реактивной горелкой, работающий в режиме детонационного горения и оканчивающейся соплом Лавалья с укороченной диффузорной частью. Такое выполнение прибора позволяет получить пульсирующий направленный сверхзвуковой поток раскаленного газа для термической резки и обработки горных пород.

На рисунке 1.3 представлен прибор для резки и обработки горных пород.

Газовая струя с температурой свыше 2000°C создается в камере сгорания и разгоняется до необходимых скоростей (не менее 1600 м/сек) в сопле прибора. В целях обеспечения высокой эффективности процесса обработки, горелка работает в режиме детонационного горения, а благодаря применению сопла Лавалья с укороченной диффузорной частью, достигается пульсирование газовой струи.

Авторами [39] получено авторское свидетельство на изобретение огнеструйной горелки для термического разрушения минеральных материалов, которое может быть использовано в горном, геологоразведочном деле и в строительной промышленности для бурения, резки и разработки, мерзлых грунтов и горных пород.

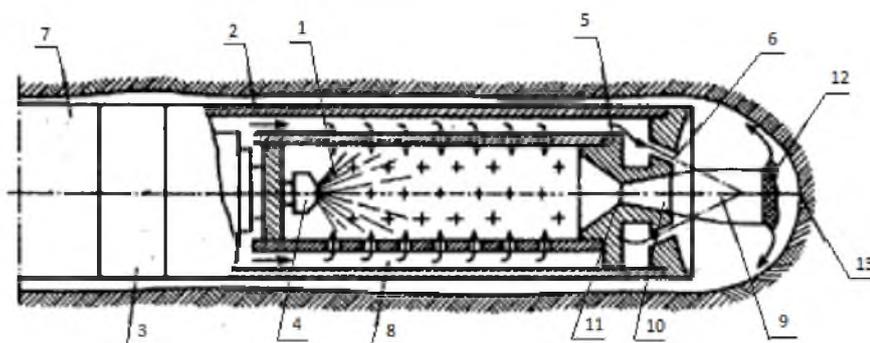


1 – камера сгорания, 2 – сопло, 3 – кожух, 4 – головка,
 5 – распределительная коробка, 6 – водяная труба, 7 – керосиновая труба,
 8 – кислородная труба, 9 – центробежная форсунка, 10 – завихритель,
 11 – соединительная труба, 12 – соединительный винт, 13 – эбонитовая
 рифленая щетка, 14 – кожух, 15 – пусковой рычаг, 16, 17, 18 – шланги

Рисунок 1.3 – Устройство для термической резки и обработки горных пород

На рисунке 1.4 изображена огнеструйная горелка, продольный разрез. Огнеструйная горелка включает камеру сгорания, кожух, образованную между камерой и кожухом кольцевую полость, форсунку, закрепленную у внешнего конца кожуха, крышку с центральным соплом и размещенными вокруг последнего наклонными каналами для подачи окислителя в струю горелки. Отличающаяся тем, что, с целью повышения эффективности сжигания топлива и разрушения каменных материалов, камера сгорания выполнена с перфорированной стенкой, а наклонные каналы соединены с кольцевой полостью, причем отношение площадей суммарного поперечного сечения каналов и критического сечения сопла составляет $0,2 \dots 0,3$, а оси каналов пересекаются с осью сопла за пределами его среза на расстоянии равном $3 \dots 6$ диаметрам критического сечения сопла.

Наибольшая эффективность работы горелки термоинструмента достигается в том случае, когда точка пересечения осей каналов 6 и сопла 10 удалена от его среза на расстояние, равное $3 \dots 6$ диаметрам критического сечения 11 сопла 10.

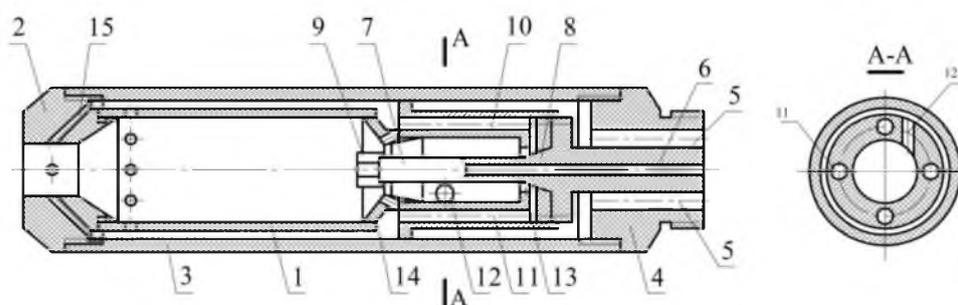


1 – камера сгорания, 2 – кожух, 3 – распределительная головка,
 4 – форсунка, 5 – сопловая крышка, 6 – канал, 7 – удлинительная штанга,
 8 – кольцевая полость, 9 – факел, 10 – сопло Лавалья, 11 – критическое сечение,
 12 – зона разрушения, 13 – забой

Рисунок 1.4 – Огнеструйная горелка

Авторами [40] разработана насадка, имеющая перфорационные отверстия для эжекции атмосферного воздуха, снабженная дополнительным соплом Лавалья. Насадка была предназначена для снижения шума горелок и уменьшения расхода кислорода, однако ввиду низкой стойкости при высоких температурах струи горелок не нашла применения.

Следующий этап исследования интенсификации горения свободных струй был проведен горелкой [41] (рисунок 1.5).



1 – камера сгорания; 2 – сопло; 3 – кожух; 4 – головка распределительная;
 5, 6 – каналы окислителя и горючего; 7 – полый шток;
 8 – конус; 9 – форсунка; 10 – завихритель; 11 – стакан; 12, 13 – отверстие тангенциальное и центральное; 14 – переходник; 15 – каналы.

Рисунок 1.5 – Устройство для разрушения горных пород

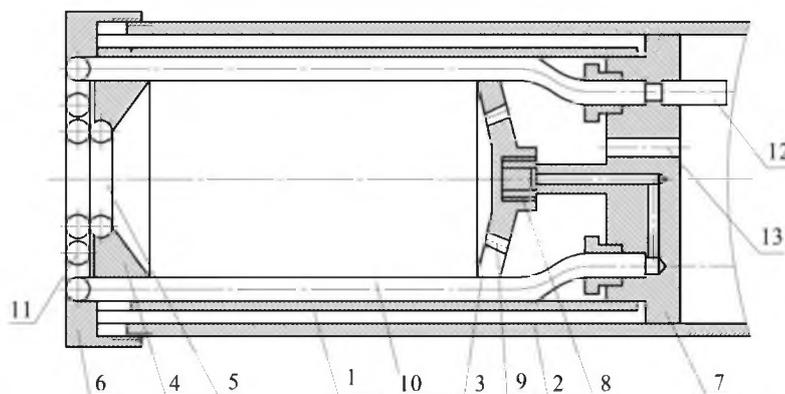
Устройство предназначено для разрушения горных пород, в нем реализуются два эффекта: разделение окислителя – воздуха на два потока – горячий воздух идет в камеру сгорания и участвует в процессе горения, другой поток – холодный идет на охлаждение камеры сгорания и через перфорацию попадает в камеру, участвуя в горении, а также через каналы в сопле – в закритическую часть сопла.

Эта особенность подачи окислителя в закритическую часть сопла вызывает в потоке газа возмущения – ударные волны, тем самым интенсифицируя процесс дожигания топливной смеси.

Разработанные, по авторскому свидетельству [41] конструкции термоинструментов ТРВ-12М и БВР-60 широко используются в промышленности для ручной огнеструйной обработки блочного камня и резки щелевых выработок при добыче блоков в карьерах.

Другой конструкцией огнеструйной горелки, повышающий термодинамические параметры струи за счет подогрева горючего до газообразного состояния и подачи его в камеру сгорания, является конструкция горелки, выполненная по изобретению [42] (рисунок 1.6).

Эта конструкция горелки позволила повысить тепловые и механические параметры струи горелки за счет организации горения газообразного горючего, предварительно подогретого в сопле до температуры испарения.



- 1 – камера сгорания; 2 – корпус; 3 – головка распределительная;
4 – сопло; 5 – поверхность сопла; 6 – торцевая гайка;
7 – поперечная перегородка; 8 – форсунка; 9 – каналы окислителя;
10 – магистраль горючего; 11 – спиральная трубка; 12, 13 – трубопроводы
подачи топлива

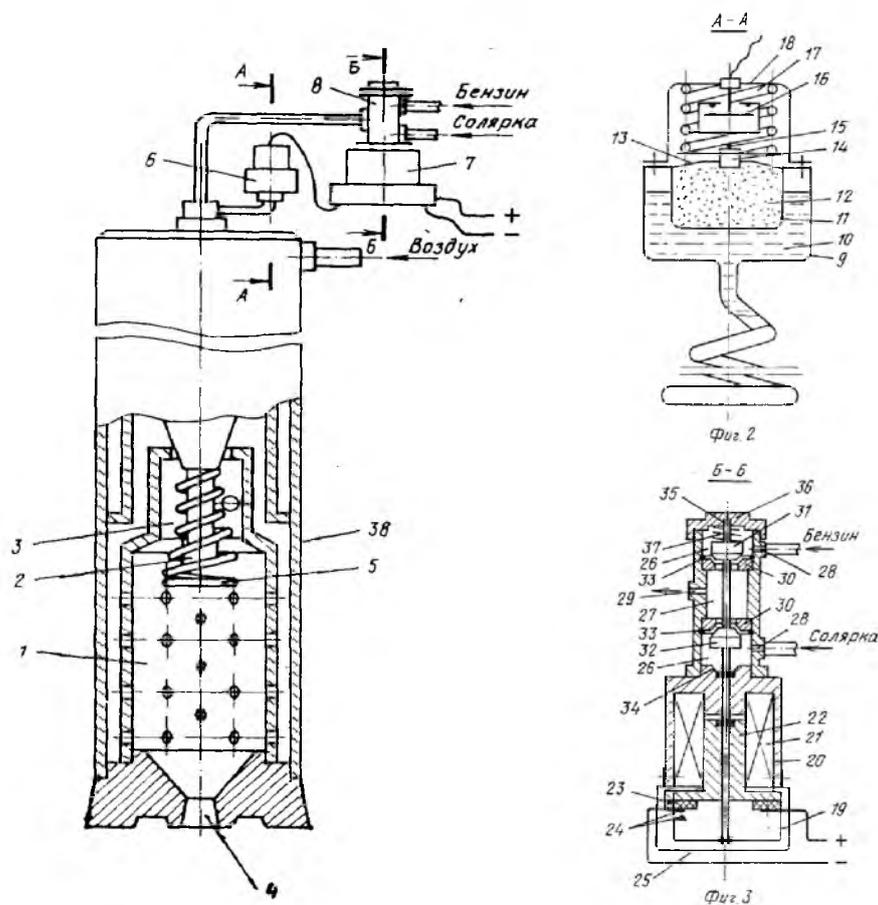
Рисунок 1.6 – Устройство для разрушения горных пород

Важным элементом создания термоинструментов, работающих на тяжелых топливных компонентах, является их запуск в работу, устойчивый запуск в работу возможен только в том случае, когда имеется комбинированная система подачи топливных компонентов в камеру сгорания. Сначала подается легковоспламеняемая смесь и ведется ее поджиг, затем перекрываются каналы легковоспламеняемого горючего (бензина) и открываются каналы тяжелого горючего.

Благодаря чему удается сократить время запуска для горелок, работающих на легковоспламеняемых видах топлива, и обеспечить надежный запуск горелок, работающих на тяжелых видах топлива, при сравнительно малых энергетических затратах на предварительный подогрев горючего.

Известно устройство горелки для бурения горных пород [43]. Однако в этих горелках способ поджига осуществляется вручную. Для автоматизации процесса запуска горелок в работу авторами [44] разработана конструкция горелки для разрушения горных пород (рисунок 1.7).

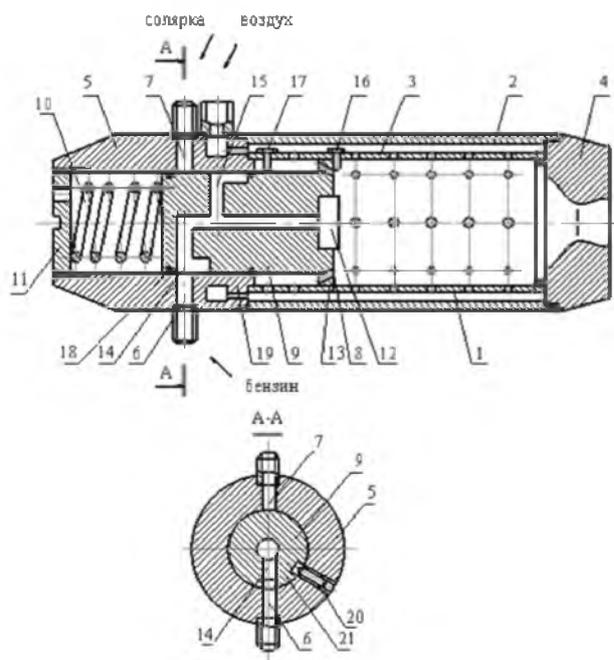
Работа устройства заключается в следующем: при подаче стартового топлива в камеру сгорания 1 горелки и включение ее в работу за счет повышения температуры у задней стенки горелки в области подачи воздуха 3 датчик температуры 5 подает сигнал на переключатель 6, который через промежуточное реле включает соленоидный клапан на переключение горючего на другой вид (соляровое масло). Устройство работает в автоматическом режиме.



- 1 – камера сгорания; 2 – форсунка; 3 – завихритель; 4 – сопло;
 5 – термодатчик; 6 – термопереключатель; 7 – клапан переключатель;
 8 – распределительная головка, 9 – емкость, 10 – быстроиспаряющаяся жидкость, 11 – баллон, 12 – нефтяной воск, 13 – резиновая диафрагма, 14 – буфер, 15 – шток, 16,19 – блок-контакты, 17, 37 – возвратная пружина, 18 – предохранительный кожух, 20 – электромагнит, 21 – катушка, 22 – сердечник-толкатель, 23 – колодка, 24 – контакты, 25 – защитный кожух, 26 – полость, 27 – смесительная камера, 28 – впускное окно, 29 – выпускное окно, 30 – перегородка, 31,32 – клапаны, 33 – распорное кольцо, 34 – резиновая диафрагма, 35 – центрирующий хвостовик, 36 – крышка

Рисунок 1.7 – Устройство для огнеструйного разрушения горных пород

Другим устройством автоматического переключения горючего со стартового на основной вид является устройство, изображенное на рисунке 1.8 [45].



- 1 – камера сгорания; 2 – наружный кожух; 3 – кольцевая полость;
 4 – сопло; 5 – распределительная головка; 6, 7 – каналы подачи бензина и
 дизельного топлива (солярка); 8 – подвижный поршень; 9 – шток;
 10 – пружина; 11 – гайка регулировочная; 12 – форсунка; 13 – каналы воздуха;
 14, 15 – каналы бензина, дизельного топлива; 16, 17 – ограничители;
 18, 19 – уплотнения; 20 – фиксатор

Рисунок 1.8 – Устройство для огнеструйного разрушения горных пород

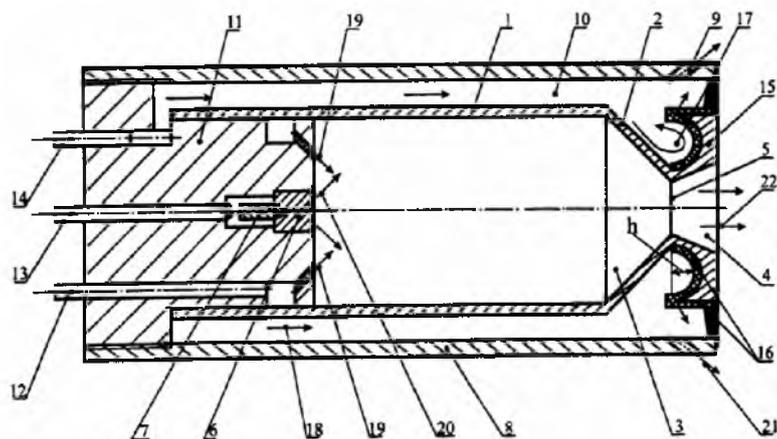
Устройство для огнеструйного разрушения горных пород работает следующим образом.

Подача бензина осуществляется по каналам 6 и 14 и через форсунку 12, а подача воздуха – через кольцевую полость 3 внутрь перфорированной камеры сгорания 1. После поджигания топливной смеси и втягивания факела, через сопло 4, внутрь камеры сгорания 1, в последней возникает давление газов, которые через сопло 4 выбрасываются на породу. Одновременно импульс давления воздействует на подвижный поршень 8 с форсункой 12 и завихрителем воздуха, передвигая его до ограничителя хода 17 в заднее положение, при котором сходятся канал 15 в штоке 9 и канал 7 в распределительной головке 5, а каналы 6 и 14 легковоспламеняющегося топлива разделяются, т.е. происходит переключение горючего. Ход поршня со штоком должен обеспечить оптимальный режим работы горелки на тяжелых видах топлива, т.к. для них требуется камера сгорания большого объема. Оптимальный объем камеры сгорания для тяжелых видов топлива регулируется положением ограничителя хода 17, в который упирается подвижный поршень 8 в крайнем заднем положении.

При выключении горелки шток 9 с подвижным поршнем 8 под действием пружины 10 возвращается в исходное положение до ограничителя хода 16, этим горелка подготавливается к запуску на легковоспламеняющемся топливе.

Авторами изобретения горелки термоинструмента для термической газоструйной обработки и разрушения минеральных сред, бетонов, железобетонов, камня, металла, может быть использовано в горном деле и при строительном-монтажных работах [46].

На рисунке 1.9 изображена горелка термоинструмента – продольный разрез.



- 1 – камера сгорания, 2 – сопло Лавалья, 3 – конфузор, 4 – диффузор, 5 – критическое сечение, 6 – завихритель, 7 – распылитель, 8 – кожух, 9 – отверстие, 10 – охлаждающая полость, 11 – распределительная головка, 12, 13, 14 – патрубки, 15 – вставка, 16 – капиллярно-пористое покрытие, 17 – канавка, 18 – охладитель, 19, 20 – подвод окислителя, 21 – каналы выброса охладителя, 22 – продукты сгорания

Рисунок 1.9 – Горелка термоинструмента

Горелка термоинструмента, содержащая установленные в кожухе камеру сгорания, сопло Лавалья с конфузорной и диффузорной частями и критическим сечением между ними, завихритель, распылитель и распределительную головку с патрубками подвода окислителя и горючего в камеру сгорания и охладителя в охлаждающую полость, образованную между кожухом и внешними стенками камеры сгорания и сопла Лавалья, в кожухе выполнены отверстия для отвода охладителя, отличающаяся тем, что диффузорная часть сопла Лавалья снабжена вставкой, имеющей со стороны, обращенной к охлаждающей полости, капиллярно-пористое покрытие, также отличающаяся тем, что капиллярно-пористое покрытие выполнено из многослойной сетки, размер ячеек в каждом из слоев которой возрастает по направлению к внешней поверхности покрытия и составляет 0,08 мм, 0,14 мм и 1,0 мм.

Разработанные конструкции терморезаков [40-47] решили ряд технологических задач – повысили производительность разрушения горных пород, автоматизировали запуск горелок в работу, что важно при разработке рабочих органов механических термоагрегатов, но существенного эффекта

увеличения термодинамических параметров горения в этих конструкциях горелок не было достигнуто.

Проводимые исследования для получения явления детонации в свободной струе горелок при сжигании в ней топливных компонентов в различных стехиометрических соотношениях не привел к созданию мощных ударных волн и, как следствие, детонационных явлений.

Однако введение в обогащенную горючим газовую струю горелки недостающего топливного компонента – окислителя и сжигание этих компонентов в призабойном пространстве, т.е. в отсоединенном от забоя скачке уплотнения, дало положительные результаты, но прирост производительности незначителен.

Проводимые исследования по интенсификации горения показывают перспективность применения явления детонационного горения для термического разрушения горных пород [48].

С увеличением ударного импульса струи (механической составляющей) разрушение горных пород протекает интенсивнее, а вероятность оплавления забоя уменьшается. Величина ударного импульса струи пропорциональна квадрату его скорости, следовательно, значительное увеличение динамической составляющей скорости струи можно получить, используя явление детонации.

1.4 Оценка огнеструйного способа добычи и обработки блочного камня и перспективы его применения

В связи с интенсивным развитием ракетной техники, послужившей импульсом к применению в горной промышленности малогабаритных горелок, работающих на углеводородных топливах в кислородной среде, способ поверхностной обработки блоков горных пород огнеструйными горелками, разработанными в КазПТИ им. В.И.Ленина и ХАИ, был внедрен на большинстве камнеобрабатывающих предприятий Союза.

Высокая температура и большая скорость газов, выбрасываемых через сверхзвуковое сопло из камеры сгорания горелок, обеспечивает интенсивный подвод тепла в породу и быстрое развитие в ней разрушающих напряжений [16,48]. Внедрение ручных термоинструментов для обработки тесаных изделий на Янцевском гранитном карьере позволило уже в первый год эксплуатации получить значительный экономический эффект [48,49,50,51]. Производительность огнеструйных горелок по массовому сбоя породы достигает 0,13 кг/с при различной толщине снимаемого слоя. Огнеструйный способ позволил увеличить производительность обработки по сравнению с механическим и ручным способами в 8...10 раз и снизить себестоимость изделия в 3...4 раза.

В работах [52,53,54] приведены результаты производственных испытаний огнеструйных термоинструментов и исследования обрабатываемости пород различных месторождений огнеструйным способом.

Производительность термической обработки гранитов бензовоздушными горелками равна 0,024...0,076 м³/ч, а керосино-кислородными – 0,036...0,108 м³/ч [8,26]. Установлено, что большинство гранитов хорошо разрушаются

термическим способом с высокой производительностью, значительно превышающей механическую обработку.

Огнеструйными термоинструментами изготавливаются разнообразные архитектурно-строительные, дорожные и облицовочные изделия: бордюрные камни, ступени, парапет, карнизы, фундаментальные блоки, облицовочные плиты и др., а также другие технические детали типа валов, жерновов, катков и т.п. для химической, бумажной, фарфоро-фаянсовой и пищевой промышленности.

При термической обработке горных пород установлено, что у большинства месторождений гранитов поверхностный слой не перегревается и не плавится. Поверхность гранитов, обработанная огнеструйным способом, сохраняет естественную фактуру, цвет и блеск кристаллов благодаря минимальному трещинообразованию. Такая поверхность требует малых затрат на полировку, так как толщина снимаемого слоя оказывается в 2...3 раза меньше, чем при бучардировании.

Термоинструменты также успешно применяются для изготовления монументов. Так, например, термоинструменты применялись при сооружении постаментов памятника Абаю в г.Алматы, монумента борцам за восстановление Советской власти в Семиречье в г.Алматы, памятников Вечной славы в г.Днепропетровске и Алматы, памятника А.С.Макаренко в г.Харькове и др.

До ввода в эксплуатацию термоинструментов, предназначенных для прорезания щелей непосредственно в массивах горных пород, проходка разрезных и врубовых траншей производилась буровзрывным способом с применением бризантных взрывчатых веществ (аммонита) [53,55].

С целью устранения недостатков, присущих буровзрывному способу проходки разрезных и врубовых траншей на Майкульском гранитном карьере (Казахстан), применяется технология добычи блоков с использованием термической резки. Разрезные и врубовые траншеи в массиве прорезаются двумя вертикальными щелями на глубину залегания пласта (до подошвы уступа). Термоинструменты позволяют прорезать щели глубиной до 4,5...5,0 м и шириной 0,15...0,20 м. Гранит из межщелевого пространства извлекается в виде блоков взрывом пороховых зарядов, затем производится его последующая разделка на заготовки.

Внедрение технологии добычи блоков с использованием термической резки на ведущих камнеобрабатывающих предприятиях Украины и Казахстана показало, что породы большинства гранитных месторождений хорошо разрушаются газоструйными термоинструментами с приемлемой для практики скоростью. Средняя производительность резания составляет 0,65 м² щели в час [27].

Производственные испытания позволили выявить, что интенсивность разрушения горной породы под действием факела реактивной горелки возрастает, если массив находится в напряженном состоянии за счет суммирования внутренних напряжений породы с термическими.

В работе [14] дана оценка применения термоинструментов в процессах добычи и обработки блочного камня из крепких горных пород.

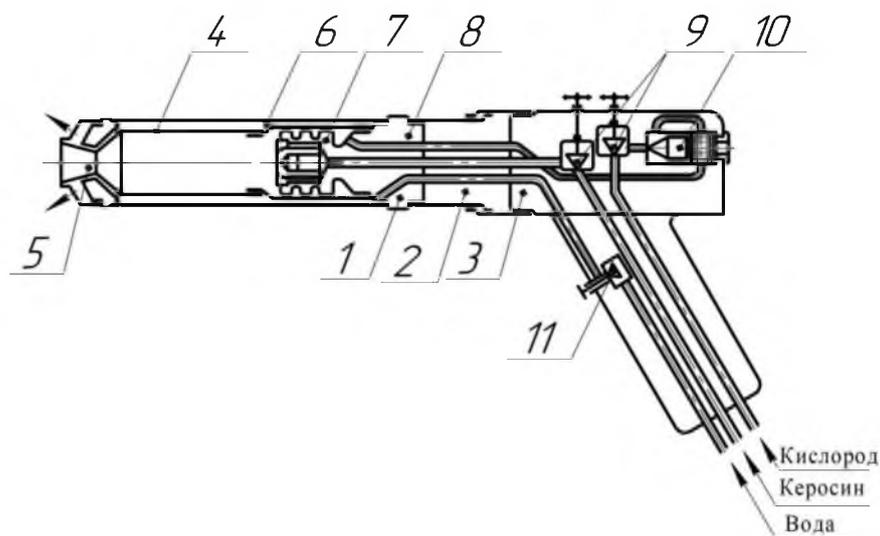
Эксплуатации термоинструментов, на карьерах блочного камня показывает, что один термоинструмент обеспечивает подготовку 800...1000 м³ в год отбойки, при этом выход блочности повышается до 80...85 %. Следует отметить, что применение для резки горных пород кислородно-керосиновых термоинструментов повышает производительность в 1,5...2 раза [27].

Переход предприятий на новую технологию добычи блоков с применением огнеструйной резки в массиве обеспечивает сокращение потерь делового камня за счет увеличения выхода блоков в 1,2...2 раза [3].

В качестве генератора тепла в промышленности используются два типа огнеструйных горелок, работающих на керосино-кислородной и бензовоздушной смеси. Простота устройства огнеструйных горелок, легкость управления, надежность работы, долговечность и высокая производительность позволяют считать огнеструйный способ одним из наиболее перспективных при добыче и обработке природного камня.

Положительная особенность бензовоздушных термоинструментов – простота внедрения на отдельных предприятиях и на камнеобрабатывающих карьерах позволяет использовать существующие на карьерах компрессорные установки.

Наибольшее распространение в камнеобрабатывающей промышленности нашел керосино-кислородный терморезак ТР-14/22-5 (терморезак ручной, диаметр камеры сгорания – 14 мм, калибратора – 22 мм, модель – 5) конструкции КазПТИ им. В.И.Ленина (рисунок 1.10). В рукояти терморезака размещены системы управления и защиты прибора.



- 1 – наконечник; 2 – переходник; 3 – хвостовик; 4 – камера сгорания;
5 – сопло; 6 – форсунка; 7 – завихритель; 8 – распределительная головка;
9 – вентили дросселирующие; 10 – система защиты от обратных ударов;
11 – клапан водяной

Рисунок 1.10 – Схема терморезака ТР-14/22-5

Терморезак ТР-14/22-5 является усовершенствованной моделью прибора ТР-14/22 [23] и имеет следующие показатели:

- производительность обработки – $1...2 \text{ м}^2/\text{ч}$ при толщине снимаемого слоя $0,05...0,06 \text{ м}$ или $100...150 \text{ кг/ч}$ отбиваемого материала;
- расход кислорода – $15..18 \text{ м}^3/\text{ч}$, керосина – $8...9 \text{ л/ч}$, охлаждающей воды – $160...200 \text{ л/ч}$;
- давление рабочих компонентов: кислорода – $1,2...1,5 \text{ МПа}$, керосина – $1,2...1,5 \text{ МПа}$, воды – $0,3...0,5 \text{ МПа}$.

Бензовоздушные термоинструменты и система их питания отличаются простотой устройства и обслуживания. Вместо сложных систем подачи горючего, окислителя и охлаждающей воды, как это имеет место при использовании керосино-кислородных термоинструментов, используется воздушный компрессор, емкость для горючего и терморезак.

Воздушным компрессором типа ПКС-5, ЗИФ-55 и др. воздух подается к терморезаку и в емкость с бензином, обеспечивая подачу горючего в горелку. Воздух, поступающий в камеру сгорания (жаровую трубу), делится на два потока. Первый поток направляется внутрь жаровой трубы через завихритель и принимает непосредственное участие в процессе сгорания горючего. Второй поток охлаждает наружную поверхность жаровой трубы и движется по кольцевому зазору между ними. Часть этого воздуха поступает внутрь камеры и участвует в процессе сгорания [30].

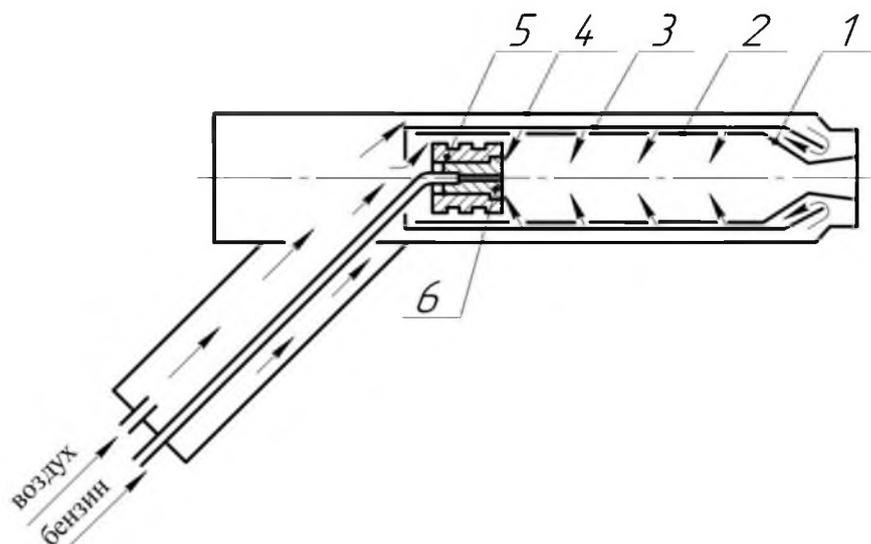
По описанному принципу работают термоотбойники Т-2 и Т-3 конструкции ХАИ. Термоотбойник Т-3 является более совершенной моделью [11,29,30] и имеет следующие показатели:

- производительность обработки – $0,9...1,0 \text{ м}^2/\text{ч}$ при толщине снимаемого слоя $0,03...0,035 \text{ м}$ или $80...85 \text{ кг/ч}$ отбиваемого материала;
- производительность резания щели – $0,4... 0,5 \text{ м}^2/\text{ч}$ при толщине $0,05... 0,06 \text{ м}$;
- расход сжатого воздуха – $2,5...3,0 \text{ м}^3/\text{мин}$, бензина – $8...9 \text{ л/ч}$;
- давление рабочих компонентов: воздуха – $0,5...0,7 \text{ МПа}$, бензина $0,5...0,6 \text{ МПа}$.

Термоотбойники, выполненные по данной схеме, расходуют часть воздуха на охлаждение сопла, выбрасывая его в атмосферу, что снижает экономичность прибора.

С целью устранения указанного недостатка МГИ была разработана новая конструкция термоинструмента (рисунок 1.11).

Экономичность и производительность ее повышена за счет использования всего подаваемого воздуха в процессе окисления горючего. По предлагаемой схеме воздух вначале подается на охлаждение сопла по зазору между основным и промежуточным (дополнительным) кожухами, затем охлаждает камеру сгорания. Охлаждая сопловой аппарат и камеру сгорания, воздух дополнительно нагревается и затем участвует в процессе горения, повышая теплофизические параметры факела.



- 1 – сопло; 2 – камера сгорания; 3 – кожух промежуточный;
4 – кожух наружный; 5 – завихритель; 6 – форсунка

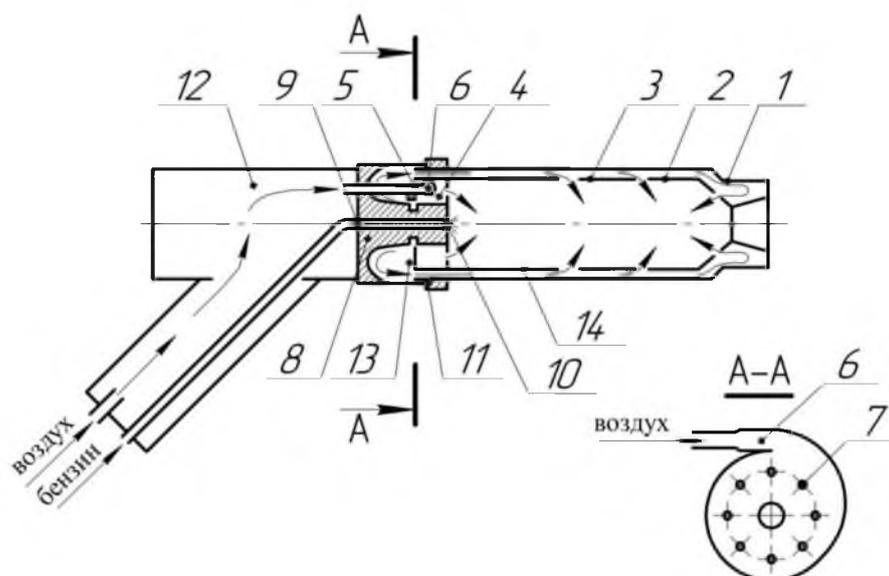
Рисунок 1.11 – Схема бензовоздушного термоотбойника

По данному принципу работают бензовоздушные терморезаки ЛТ-1, ЛТ-С, Т-5 и ТРВ-10, которые экономичнее и производительнее применяемых ранее термоотбойников Т-2 и Т-3 и имеют следующие показатели:

- производительность обработки – $1...1,2 \text{ м}^2/\text{ч}$ при толщине снимаемого слоя $0,035...0,04 \text{ м}$ или $85...90 \text{ кг/ч}$ отбиваемого материала;
- производительность резания щелей – $0,6...0,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ при ширине щели $0,06...0,08 \text{ м}$;
- расход сжатого воздуха – $2,5...3,5 \text{ м}^3/\text{мин}$, бензина – $12...15 \text{ л/ч}$;
- давление рабочих компонентов: воздуха – $0,5...0,7 \text{ МПа}$, бензина – $0,5...0,6 \text{ МПа}$.

Термоотбойники, выполненные по данной схеме, затрудняли запуск горелок при низких температурах, что требовало специальных навыков и очень высокой квалификации операторов.

С целью устранения указанного недостатка в КазПТИ им.В.И.Ленина была разработана более совершенная конструкция термоотбойника с вихревым энергоразделителем воздуха на горячий и холодный потоки. В новом инструменте горячий поток воздуха используется для воспламенения горючей смеси и непосредственного участия в процессе горения, холодный поток – для охлаждения камеры сгорания (рисунок 1.12) [41].



- 1 – сопло; 2 – жаровая труба; 3 – кожух; 5 – вихревая камера;
 6 – отверстия для прохода воздуха; 7 – наклонные отверстия; 8 – конус;
 9 – центральный канал; 10 – форсунка; 11 – контргайка; 12 – рукоять

Рисунок 1.12 – Термоотбойник с энергоразделителем

Сжатый воздух по каналу внутри рукоятки 12 через штуцер 6 поступает в вихревую камеру. В улитке воздух, закручиваясь, разделяется на два потока. Периферийная часть через тангенциальные отверстия 7 в дне корпуса поступает в камеру сгорания 2, создавая интенсивный вихрь, и, смешиваясь с бензином, образует топливную смесь. Центральная холодная часть воздуха через отверстия в диафрагме поступает в полость 13 и, проходя по кольцевому зазору 14, последовательно охлаждает камеру сгорания 2 и сопло 1.

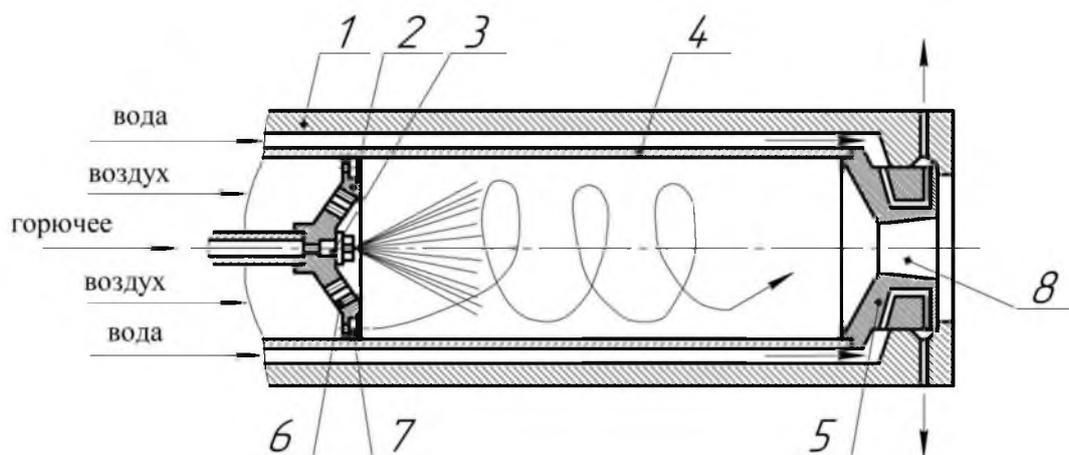
Для изменения расхода воздуха, идущего на охлаждение, необходимо переместить кожух 3 с вихревой камерой 5 вдоль оси относительно конического тела и зафиксировать контргайкой 12. При этом меняется площадь кольцевого зазора между коническим телом 8 и диафрагмой вихревой камеры 5 и, следовательно, расход воздуха, идущего на охлаждение. Регулирование соотношения температуры и количества воздуха, попадающего в камеру сгорания, обеспечивает лучшее перемешивание его с горючим, что улучшает запуск горелки и повышает теплофизические параметры факела за счет подачи горячего потока воздуха в камеру сгорания.

По описанному принципу созданы и работают бензовоздушные термоинструменты БВР-60 и ГВК-70, которые на 18...20 % экономичнее и производительнее терморезаков ТРВ-12 и имеют следующие показатели:

- производительность обработки при толщине снимаемого слоя 0,045...0,05 м составляет 1,3...1,4 м²/ч или 100...110 кг/ч отбиваемого материала;
- производительность резки щели – 0,7...0,8 м²/ч при ширине щели 0,1...0,12 м;
- расход сжатого воздуха – до 9 м³/мин, бензина – 20-25 л/ч;
- давление компонентов: воздуха – 0,5...0,6 МПа, бензина – 0,5...0,6 МПа.

На рисунках 1.13 и 1.14 представлены конструкторские разработки бензовоздушных рабочих органов, устройство которых нашли применение на карьерах Кривбасса и Лебедининском ГОКе [56].

Горелка с водяным охлаждением (рисунок 1.13), выполненная по этой схеме, состоит из корпуса 1, головки-завихрителя 2, форсунки для распыления горючего 3, жаровой камеры 4 и соплового аппарата 5. Горючее подается через центробежную форсунку в камеру сгорания. Применение центробежной форсунки с перепадом давления $(6...8) \cdot 10^5$ Па позволяет получать тонкий распыл горючего с достаточно равномерным распределением его по сечению камеры сгорания.

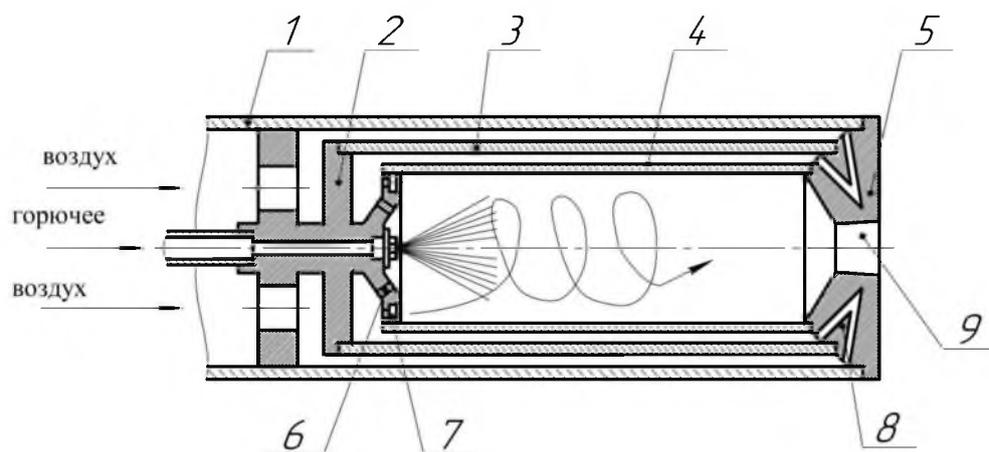


1 – корпус, 2 – головка-завихрителя, 3 – форсунка, 4 – жаровая камера, 5 – сопловой аппарат, 6 – отверстие, 7 – винтовой канал, 8 – сопло

Рисунок 1.13 – Горелка с водяным охлаждением

Сжатый воздух из штанги поступает в камеру сгорания через отверстия 6 и винтовые каналы 7 головки-завихрителя. Большая часть воздуха проходит через винтовые каналы, получая вращательное движение. В результате действия центробежных сил основная масса воздуха концентрируется у стенок жаровой трубы, защищая последнюю от перегрева и создавая благоприятные условия для сгорания топливной смеси. Часть воздуха, подаваемая через отверстия 6, способствует полноте сгорания топлива, при этом улучшается также процесс запуска горелки.

Горелка с воздушным охлаждением и промежуточной камерой, отличительной особенностью которой (рисунок 1.14) является воздушное охлаждение теплонапряженных деталей горелки и подогрев, за счет этого, воздуха, поступающего в камеру сгорания, что улучшает процесс сгорания топливной смеси.



1 – корпус, 2 – головка завихрителя, 3 – промежуточная камера,
4 – жаровая камера, 5 – сопловой аппарат, 6 – отверстие,
7 – винтовой канал, 8 – канал, 9 – сопло

Рисунок 1.14 – Горелка с воздушным охлаждением и промежуточной камерой

Воздух, проходя через отверстия в головке-завихрителе 2, поступает в зазор между корпусом 1 и промежуточной камерой 3. Оттуда через каналы 8 соплового аппарата 5 воздух поступает в межтрубное пространство между жаровой камерой 4 и промежуточной камерой. Далее через отверстия 6 и винтовые каналы 7 воздух попадает в камеру сгорания, где смешиваясь с горючим, распыленным форсункой, образует топливную смесь. Продукты сгорания топливной смеси выбрасываются наружу через сопло 9. Нагрев воздуха перед подачей его в камеру сгорания в указанной схеме происходит в основном за счет охлаждения деталей 4 и 5. Основная масса воздуха попадает в камеру сгорания по винтовым каналам 7 в головку-завихритель 2, поэтому вблизи внутренней стенки жаровой камеры образуется пристеночный воздушный слой, способствующий ее охлаждению.

Огнеструйные горелки нашли также широкое применение для вырезки блоков горных пород из массива в ФРГ, США и Франции [50]. В СССР этот способ добычи блочного камня впервые был внедрен на карьерах Украины, Казахстана, Киргизии. Огнеструйный способ позволяет резать горные породы со скоростью $2,7 \cdot 10^{-4}$ м²/с одной горелкой, при этом потери камня, по сравнению со взрывным способом, значительно уменьшаются [11].

В работе [57] исследованы оптимальные режимы работы горелок при различных коэффициентах избытка окислителя $\alpha_T = 1 \dots 1,2$ для бензовоздушных термоинструментов и $\alpha_T = 0,7 \dots 0,8$ – для керосино-кислородных. Автором работы [56] на основе теоретических исследований параметров газа керосино-кислородных термоинструментов для термической обработки крепких горных пород изучено влияние внутрикамерного давления в пределах $0,4 \dots 2,9$ МН/м² и коэффициента избытка окислителя на температуру газов внутри камеры сгорания и скорость истечения.

Рациональным режимом работы горелок является режим при коэффициенте избытка окислителя $\alpha_T=0,8...0,9$, установлено, что скорость истечения газов при повышении внутрикамерного давления с 0,5 до 1,0 МН/м² растёт на 18...19%, затем темп роста понижается до 4% при повышении давления внутри камеры с 2,4 до 2,9 МН/м². Повышение же температуры газа внутри камеры сгорания при изменении давления с 0,49 до 2,9 МН/м² составило 7...8 %.

Установлено, что при коэффициенте избытка окислителя, близкому стехиометрическому ($\alpha=1$), и повышении внутрикамерного давления газов от 0,39 до 0,58 МН/м² объемная производительность бензовоздушных термоинструментов возрастает почти вдвое [56].

В работах экспериментально найдены объем камеры сгорания и целесообразное внутрикамерное давление, приведен анализ зависимостей термодинамических параметров газовой струи от внутрикамерного давления. Отличительной особенностью процессов резания и обработки блочного камня является иная геометрия пятна растекания, чем при бурении. В этом случае струя не отражается от нагреваемой породы, а растекается по ней, создавая благоприятные условия для более полного использования ее энергии [57,58].

Критерием для выбора оптимального угла встречи с породой при обработке и резании является общее количество тепла, поступающего в нагреваемую породу в единицу времени. Установлено [59,60], что максимальное количество тепла, направленного в породу в единицу времени, имеет место при угле встречи струи с породой, равным 45⁰...60⁰.

Объемная скорость разрушения и скорость обработки поверхности породы зависит от расходных характеристик и критического сечения сопла применяемого термоинструмента [58].

Распределение эффективной температуры струи и удельного теплового потока в зависимости от расстояния сопла до нагреваемой поверхности и радиусу пятна растекания при ортогональной встрече довольно хорошо изучено и приведено в ряде работ [57,60,61]. Автором работы [61] установлено оптимальное расстояние от среза сопла до поверхности разрушения, составляющее 10...15 диаметров критического сечения сопла. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлены интервалы температур поверхностного слоя горных пород при их разрушении [62].

Первые попытки оценить термобуримость, исходя из комплекса свойств горных пород, отражены в работах [59], в них утверждалось, что склонность горной породы к термическому разрушению определяет модуль упругости и пределы прочности, коэффициент линейного теплового расширения, теплопроводность и теплоемкость.

Большой интерес представляют работы по изучению поведения горной породы под действием факела горелки [63,64], в которых указано на отсутствие химического воздействия на породу вследствие взрывного характера разрушения последней, при которой температура породы в момент разрушения не превышает 345⁰...563⁰К [65,66] и на глубине 0,04 м, вследствие низкой

теплопроводности породы, мало отличается от начальной температуры массива, а время отделения частиц породы составляет сотые доли секунды.

В работах [67,68] приводится сравнительный анализ качества обрабатываемой поверхности при огнеструйном разрушении и бучардировании, в результате исследования установлены максимальные отклонения высоты неровности, составляющие $4,1 \cdot 10^{-3}$ м для термического и $3,8 \cdot 10^{-3}$ м при пневмобучардировании.

Однако огнеструйный способ поверхностной обработки блочного камня из крепких горных пород, пришедший на смену малопроизводительным ручному и механическому способам, имеет ряд недостатков, к которым относятся:

- загазованность рабочего места продуктами сгорания углеводородных горючих;
- большой аэродинамический шум истекающей из камеры сгорания газовой струи;
- разлет раскаленных частиц породы, образующихся в процессе разрушения;
- пожароопасность.

Известно, что при сжигании углеводородных горючих в кислородной среде образуется большое количество газов, весовой состав которых с достаточной точностью изучен автором [69]. В настоящее время для поверхностной обработки используются горелки, сжигающие до 50 кг топливной смеси в час, наличие же в продуктах сгорания вредных для здоровья человека газов (CO_2 , CO , H_2 , OH , H) совершенно исключает их применение в закрытых помещениях без достаточно мощной вентиляции.

При обработке изделий из гранита горелки реактивного типа излучают мощный аэродинамический шум, во много раз превышающий санитарные нормы для шумных помещений.

Огнеструйной же способ добычи и обработки блочного камня широко применяется для производства щелевых выработок и обработки (пассировки) крупных блоков и в монументальных изделиях (постаменты и архитектурные изделия), при очистке трубопроводов газа и нефти от изоляционных покрытий, в дорожном строительстве и др. [70]

Поэтому совершенствование термогазоструйных инструментов с экономичным использованием топливных компонентов, повышение их мощности без развития станции питания и компрессорного оборудования, является актуальным.

В связи с развитием ракетной техники настало время использования их результатов в практике создания малогабаритных ракетных термоинструментов с интенсификаторами горения, то есть с использованием новых принципов горения в ударных волнах, инициируемых в камере сгорания и специальных насадках – новых конструкций соплового аппарата.

В связи с чем совершенствование конструкции малогабаритных термоинструментов, повышения их тепловых и динамических показателей, является актуальной задачей.

1.4 Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является исследование конструкции термодинамического рабочего органа для поверхностной обработки блоков из крепких горных пород, позволяющее создать конструкцию повышенной мощности и экономичной в использовании.

В соответствии с поставленной целью в работе сформулированы следующие задачи исследования:

- анализ современного состояния камнедобывающей отрасли добычи и обработки блочного камня из крепких горных пород;
- обоснование использования высокоскоростных огневых струй в технологических процессах и производствах;
- исследование процессов, технологии и оборудования для добычи и обработки блочного камня из крепких горных пород с применением огнеструйных горелок;
- обоснование параметров конструкции бензовоздушного термоинструмента с интенсификатором горения для разрушения крепких горных пород;
- экспериментальные исследования новой конструкции бензовоздушного термоинструмента для обработки гранитных блоков;
- обоснование применения промышленного робота с огнеструйным рабочим органом для поверхностной обработки крупных блоков из крепких горных пород.

Выводы по 1 разделу

1. Дана оценка месторождениям гранитов Казахстана и их характеристики;
2. Выполнен анализ современного состояния развития добычи и обработки природного камня из гранитов с применением огнеструйных горелок;
3. Рассмотрены процессы добычи и обработки блочного камня из крепких горных пород;
4. Рассмотрены этапы развития конструкций огнеструйных горелок для разрушения горных пород при добыче и обработке блочного камня из крепких горных пород по патентным материалам;
5. Выполнен анализ огнеструйного способа разрушения горных пород, используемого при добычи и обработки блочного камня и перспективы его развития;
6. Определена цель и сформулированы задачи исследования.

2 ПРОЦЕССЫ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДОБЫЧИ И ОБРАБОТКИ БЛОЧНОГО КАМНЯ ИЗ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

2.1 Теоретические основы огнеструйного разрушения горных пород

Анализ практического применения высокоскоростных сверхзвуковых газовых струй для различных технологических процессах разрушения горных пород и других искусственных материалов, а также создание целого класса термодинамических инструментов для газопламенного напыления металлов, даёт основание считать развитие интенсивных технологий, на базе сверхзвуковых тепловых потоков, актуальным.

Теплоносителем при термическом и комбинированном разрушении горных пород является высокотемпературная газовая струя, движущаяся с большой скоростью. Генератором тепла, как правило, является реактивная горелка. Сверхзвуковая струя газа, истекающая из сопла реактивной горелки, образует сложную структуру со скачками уплотнения и изменяющейся площадью поперечного сечения. После скачков уплотнения статическое давление в струе сравнивается с давлением внешней среды, периодические изменения параметров прекращаются и начинается основной участок струи [58, 71].

Экспериментальные замеры показывают, что при набегании сверхзвукового потока газа на разрушаемую поверхность породы (при угле встречи от 45 до 60°) в месте встречи образуется отсоединенный скачок уплотнения, а за ним происходит резкое изменение параметров газового потока. При ортогональной встрече потока с поверхностью породы в центральной точке струи (критическая точка) скорость падает до нуля. От критической точки начинается формирование пограничного слоя, толщина которого постепенно увеличивается в радиальном направлении.

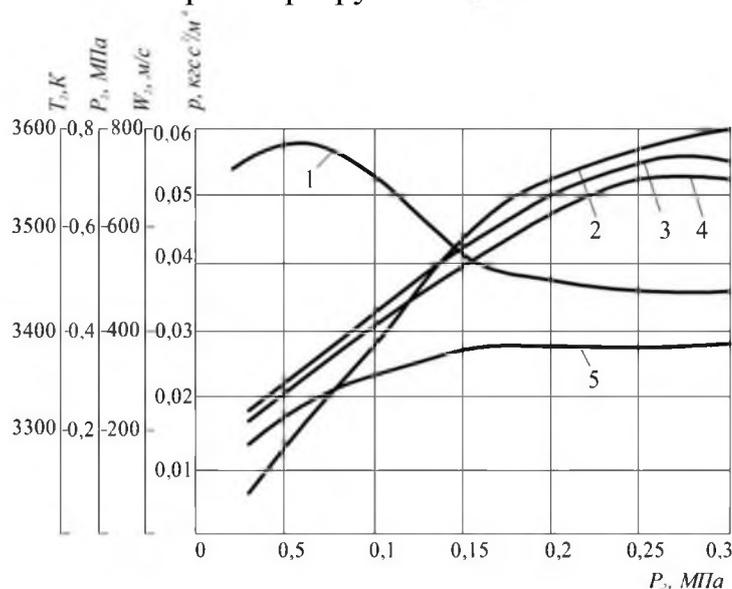
Основным режимным параметром, определяющим эффективность теплообмена струи с породой, является внутрикамерное давление P_k реактивной горелки. С увеличением P_k плотность, давление и температура газа в месте встречи с породой повышаются вначале по линейному закону, а затем (при $P_k > 2,0 \div 2,5$ МПа) практически не изменяются (рисунок 2.1) [58].

Скорость газового потока в пограничном слое растет, при увеличении P_k до $0,3 \dots 0,7$ МПа, дальнейшее увеличение внутрикамерного давления приводит к снижению скорости потока в пограничном слое.

С физической точки зрения параметры теплообмена зависят от плотности теплоносителя, его скорости, температуры и состояния поверхности породы. Произведение плотности на скорость называется массовой скоростью струи. Этот показатель является наиболее важным, так как позволяет, при его изменении, управлять параметрами теплообмена.

С изменением термодинамических параметров газовой струи по длине изменяются и ее теплопередающие свойства, что в конечном итоге оказывает влияние на скорость термического хрупкого разрушения горных пород. Поэтому расстояние от среза сопла горелки до поверхности породы должно быть строго определенным, удовлетворяющим условиям обеспечения

максимальной линейной скорости разрушения.



Кривые: 1 – W_2 ; 2 – T_2 ; 3 – ρ_2 ; 4 – P_2 ; 5 – $\rho_2 W_2$

Рисунок 2.1 – Графики зависимости скорости W_2 , температуры T_2 , плотности ρ_2 , давления P_2 и массовой скорости $\rho_2 W_2$ заторможенной струи за скачком уплотнения от внутрикамерного давления P_k ($\alpha_{0k}=1$, $P=0,1$ МПа)

Например, коэффициент теплоотдачи приближенно можно оценить по формуле [58]

$$\alpha = St C_p \rho W_g, \quad (2.1)$$

где St – критерий Станстона, представляющий собой комбинацию критериев Рейнольдса и Прандтля, $St = 0,0296/Re^{0,2} Pr^{2/3}$;

C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;

ρ и W – плотность и скорость газа на верхней границе пограничного слоя;

g – ускорение свободного падения.

Выбор геометрической и тепловой моделей необходимо учитывать как единое целое с учетом пространственного взаимодействия горной породы с теплоносителем и его теплопередающих параметров.

В качестве модели процесса может быть принято упругое полупространство со свойствами горной породы и внешняя высокотемпературная среда с некоторым законом распределения температуры на поверхности нагрева (рисунок 2.2). Теплообмен внешней высокотемпературной среды с упругим полупространством происходит по закону конвекции.

Допущения, которые необходимо принять при описании процесса, следующие: горная порода рассматривается как изотропное и упругое твердое тело; свойства горной породы не зависят от температуры и принимаются равными средним, в диапазоне от начальной температуры до температуры разрушения; высокотемпературная среда (теплоноситель) является химически неактивной. Под температурой разрушения понимается средняя температура по

толщине отделяющихся, при термическом бурении, частиц [56,72,73].

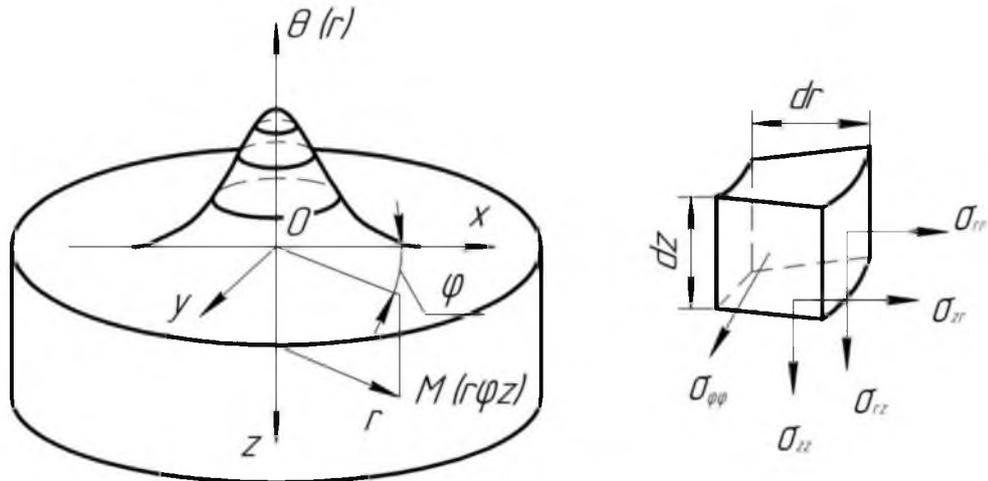


Рисунок 2.2 – Термодинамическая модель системы «теплоноситель – порода»

Для принятой модели с учетом изложенных допущений уравнения, описывающие перемещения и напряженное состояние, известны [60] и имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 U_x}{\partial r^2}; \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 U_y}{\partial r^2}; \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2}; \end{aligned} \right\}, \quad (2.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2G \left[\frac{\mu}{1-2\mu} l + \varepsilon_{xx} - \frac{1+\mu}{1-\mu} \beta(T - T_0) \right]; \\ \sigma_{yy} &= 2G \left[\frac{\mu}{1-2\mu} l + \varepsilon_{yy} - \frac{1+\mu}{1-\mu} \beta(T - T_0) \right]; \\ \sigma_{zz} &= 2G \left[\frac{\mu}{1-2\mu} l + \varepsilon_{zz} - \frac{1+\mu}{1-\mu} \beta(T - T_0) \right]; \\ \sigma_{xy} &= 2G \varepsilon_{xy}; \sigma_{xz} = 2G \varepsilon_{xz}; \sigma_{yz} = 2G \varepsilon_{yz} \end{aligned} \right\}, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность;

U_x, U_y, U_z – перемещения вдоль осей x, y, z ;

G – модуль сдвига;

μ – коэффициент Пуассона;

l – объемные деформации, $l = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$;

ε_{ik} – деформации по соответствующим осям.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial U_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial U_z}{\partial z}; \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right); \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right); \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \right), \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

где β – коэффициент линейного теплового расширения;

T_0 и T – начальная и текущая температуры упругого полупространства.

Определение текущей температуры полупространства сводится к решению дифференциального уравнения теплопроводности вида

$$\frac{\partial T}{\partial r} = a \nabla^2 T \quad (2.5)$$

где α – температуропроводность породы;

∇^2 – оператор Лапласа;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.6)$$

Системы уравнений (2.2) представляет собой динамическую задачу, учитывающую перемещения в породе с учетом распространения упругих волн при граничных условиях первого рода, учет динамических составляющих обязателен.

Как показали результаты замеров параметров высокоскоростных газовых струй термобуров, температура в пятне растекания теплоносителя распределяется по закону ошибок Гаусса и может быть описана зависимостью [57,61,74]

$$\theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{r^2}{4\delta}\right), \quad (2.7)$$

где θ_0 – температура в центре пятна растекания;

r – расстояние от центра пятна растекания;

δ – параметр кривой распределения температуры.

Удельный тепловой поток, поступающий в породу при конвективном теплообмене, определяется выражением

$$q = \alpha(T_m - T_n), \quad (2.8)$$

где $(T_m - T_n)$ – разность между температурой теплоносителя и поверхностью горной породы;

α – коэффициент конвективной теплоотдачи.

В практике термического разрушения горных пород величина α зависит от способа теплового действия, свойств теплоносителя и породы, температурного напора, скорости теплоносителя и имеет значения от 100...200 до $(5...10)10^3$ ккал/м²ч °С. Температура теплоносителя также изменяется в широких пределах и в зависимости от назначения может иметь значения от 200...300 до $(5...10)10^3$ °С.

Так как скорость теплоносителя в пограничном слое уменьшается до нуля, то можно считать, что передача тепла к породе осуществляется по закону теплопроводности, т.е.

$$q = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2.9)$$

где λ_T – теплопроводность теплоносителя.

Величина температурного градиента в пограничном слое может быть выражена как

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{T_T - T_{II}}{\delta_b} \quad (2.10)$$

Тогда с учетом (2.10) тепловой поток, поступающий в породу, будет

$$q = -\frac{\lambda_T}{\delta_b} (T_T - T_{II}) \quad (2.11)$$

Из сравнения (2.8) и (2.11) видно, что коэффициент конвективного теплообмена

$$\alpha = \frac{\lambda_T}{\delta_b} \quad (2.12)$$

Процесс взаимодействия высокоинтенсивного газового теплоносителя с горными породами имеет место практически во всех случаях, связанных с их термическим направленным хрупким разрушением.

Наиболее часто в качестве теплоносителя выступает сверхзвуковая высокотемпературная струя, генерируемая реактивными горелками, которая образуется в результате выброса продуктов сгорания из камеры сгорания через сопло. Вблизи поверхности породы происходит торможение потока, при этом имеет место образование скачка уплотнения. В скачке уплотнения резко повышаются плотность потока и его температура. За скачком уплотнения скорость потока становится дозвуковой.

Основными термодинамическими параметрами высокоинтенсивного газового теплоносителя при торможении его о поверхность разрушаемой горной породы являются: коэффициент теплоотдачи от струи к породе α (ккал/м²ч °С), эффективная температура теплоносителя в непосредственной близости у поверхности породы T_s и удельный тепловой поток q (ккал/м²ч).

Вторым видом теплообмена при использовании в качестве теплоносителя сверхзвуковых высокотемпературных газовых струй является излучение. Лучистая энергия, падающая на горную породу, в зависимости от ее электромагнитных свойств, формы и состояния поверхности частью поглощается и переходит в теплоту, а частью проходит сквозь нее или отражается. Тела, обладающие способностью полностью поглощать лучистую энергию, называются абсолютно черными. Таких тел в природе нет, реальные горные породы поглощают только часть энергии по отношению к абсолютно черному телу:

$$E = E_0 \varepsilon, \quad (2.13)$$

где E – лучепоглощательная (или лучеиспускающая) способность горной породы;

E_0 – лучеиспускающая способность абсолютно черного тела;

ε – степень черноты горной породы (для большинства минералов $\varepsilon = 0,5 \dots 0,9$).

Лучепоглощательная способность горной породы, в зависимости от разности температур между нею и источником, ΔT может быть определена из уравнения Стефана-Больцмана

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^4, \quad (2.14)$$

где C – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, $C_0 = 4,9$ ккал/м²ч°С⁴.

Если теплоносителем является газ, то удельный тепловой поток, поступающий в породу за счет лучепоглощения, определяется по формуле

$$q_l = \varepsilon_{np} C_0 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^4 \quad (2.15)$$

где $\varepsilon_{np} = \varepsilon' \varepsilon_g$; $\varepsilon' = \frac{\varepsilon + 1}{2}$; ε_g – степень черноты газа.

На практике пользуются формулой

$$q_l = \alpha_l \Delta T, \quad (2.16)$$

где α_l – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием.

Из (2.15) и (2.16) следует:

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_{np} C_0 \Delta T^3}{100^4} \quad (2.17)$$

Количество тепла, поступающее в породу за счет лучепоглощения от высокотемпературной газовой струи термоинструментов, более чем на порядок ниже, чем за счет конвективного теплообмена.

Параметры теплообмена высокотемпературной газовой струи зависят от угла ее встречи с породой. При ортогональной встрече в центральной части пятна растекания параметры теплообмена максимальны и резко понижаются по мере удаления от центра. При встрече струи с породой под углом (при прочих равных условиях) параметры теплообмена в центральной части пятна растекания будут меньше, а темп снижения их с удалением от центра ниже, чем при ортогональной встрече.

Критерием для выбора оптимального угла встречи струи с породой при ее резании и обработке является общее количество тепла, поступающего в единицу времени в нагреваемую поверхность.

Распределение эффективной температуры струи и удельного теплового потока в зависимости от расстояния среза сопла до нагреваемой поверхности и по радиусу пятна растекания при ортогональной встрече довольно хорошо изучено и приведено в ряде работ [57,60,61].

2.2 Теоретическое обоснование механизма разрушения горных пород при добыче гранитных блоков термическим способом

Механизм термического разрушения горных пород при их резании и поверхностной обработке такой же, как и при бурении шпуров и скважин, и носит характер потери устойчивости поверхностного слоя в том случае, когда его температура достигнет температуры разрушения T_p , которая определяется по выражению [72]

$$T_p = \frac{2K(1-\mu)}{\beta E} \quad (2.18)$$

где K – условный предел прочности (характеризует сжимающие напряжения в нагреваемом поверхностном слое породы, при которых происходит потеря его устойчивости);

μ – коэффициент Пуассона, Дж/кг·К;

β – коэффициент линейного теплового расширения;

E – модуль упругости, МН/м²;

Время от начала нагрева поверхности до момента достижения температуры разрушения определяется выражением

$$\tau_p = \frac{x}{h^2 a} \quad (2.19)$$

где x – текущая координата;

h – характерный размер;

a – коэффициент температуропроводности,

а толщина отделяющего при этом слоя – выражением

$$\Delta = \frac{1}{h(U-1)} \quad (2.20)$$

где $U = \frac{\theta}{T_p}$.

Отличительной особенностью процессов резания и обработки горных пород является иная геометрия пятна растекания высокотемпературной струи, чем при бурении. При бурении шпуров и скважин струя отражается от забоя и поэтому коэффициент использования ее энергии очень низкий.

При резании и обработке пород струя не отражается от нагреваемой поверхности, а растекается по ней, что создает условия для более полного использования ее энергии. Нагрев поверхности породы в этом случае происходит не только в зоне прямого торможения струи, но и в зоне пристеночного движения высокотемпературного газа.

Такой характер теплового нагружения обеспечивает разрушение поверхности породы более толстыми слоями. Это соответствует теоретическим представлениям, приведенным выше (2.20). Переписав эту зависимость в виде

$$\Delta = \frac{\lambda}{\alpha \left(\frac{\theta}{T_p} - 1 \right)} \quad (2.21)$$

можно убедиться, что с уменьшением коэффициента теплоотдачи и температуры теплоносителя толщина частиц, отделяющихся с поверхности породы, будет возрастать. Это приводит, в свою очередь, к тому, что и площадь их также возрастает. Данные представления полностью подтверждаются практикой.

Для практических расчетов толщины отделяющихся частиц породы при резании и обработке необходимо значения коэффициентов теплоотдачи и температуры теплоносителя принимать усредненными по пятну растекания основной и пристеночной струи в радиусе от нуля до $r = R_p$ (где R_p , радиус пятна растекания пристеночной струи при температуре газа T_p).

Глубина щели, прорезаемой в породе за один проход термоинструмента,

$$H_0 = \Delta n, \quad (2.22)$$

где $n = \tau / \tau_p$ – число частиц, отделяющихся с одного места поверхности щели;
 $\tau = 2R_p / v$ – время воздействия на каждый элементарный участок забоя щели высокотемпературной струей;

τ_p – время единичного цикла разрушения, определяется согласно выражению (2.19);

v – скорость перемещения термоинструмента вдоль щели.

Преобразовывая выражение (2.22) с учетом значений Δ , τ и τ_p , получим

$$H_0 = \frac{2\alpha R_p}{Cx \left(\frac{\theta}{T_p} - 1 \right) v} \quad (2.23)$$

где x – корни уравнения, определяется по формуле

$$1 - e^x \operatorname{erfc} = \frac{T_p}{\theta} \quad (2.24)$$

Общая глубина щели при резании пород

$$H = H_0 N, \quad (2.25)$$

где N – число резов.

Анализ выражения (2.23) показывает, что глубина прорезания щели термическим способом зависит от термодинамических параметров теплоносителя, геометрии его распределения по забою, свойств породы и скорости движения термоинструмента вдоль щели. Для обеспечения максимальной производительности резания необходимо максимально увеличить, величину R_p вдоль щели.

Эффективность термического разрушения пород при поверхностной обработке блочного камня целесообразно оценивать объемной скоростью V_0 :

- при ортогональной встрече высокотемпературной струи с обрабатываемой поверхностью

$$V_0 = \pi R_p^2 V, \quad (2.26)$$

где R_p – радиус пятна растекания пристеночной струи при температуре газа T_p .

- при воздействии струи под некоторым углом,

$$V_0 = \pi R_p V b, \quad (2.27)$$

где b – длинная полуось эллипса, характеризующего изотерму пятна растекания пристеночной струи при температуре T_p .

V – линейная скорость разрушения при бурении, определяется согласно выражению [57]

$$V = \frac{\Delta}{\tau_p} = \frac{ha}{x(U-1)} \quad (2.28)$$

В отличие от термического бурения, при резании и обработке поверхности горных пород эффективность процесса разрушения возрастает с увеличением размера минеральных зерен, слагающих породу. Это объясняется особенностью теплообмена при резании и обработке, заключающейся в том, что каждый участок поверхности породы, при перемещении термоинструмента, подвергается воздействию вначале пристеночной струей с низкими теплопередающими параметрами, а затем воздействию основной струи со значительно более высокими теплопередающими параметрами.

В качестве критерия оценки эффективности резания может быть принята объемная скорость разрушения или линейная скорость резания, а при

поверхностной обработке — объемная скорость или скорость обработки единицы поверхности до заданного класса чистоты.

Объемная скорость разрушения и скорость обработки единицы поверхности породы зависят от расходных характеристик и критического сечения сопла применяемого термоинструмента. Эти зависимости установлены экспериментально для гранитов [67] и имеют вид:

$$V_0 = S_{кр} \left(K \lg \frac{\sum G}{S_{кр}} + C \right), \quad (2.29)$$

$$F = \frac{V_0}{\delta}. \quad (2.30)$$

где V_0 – объемная скорость разрушения;

$S_{кр}$ – критическое сечение сопла, мм;

K и C – коэффициенты, зависящие от крупности зерен, слагающих породу (таблица 2.1);

$\sum G$ – суммарный расход топлива, кг/ч;

F – скорость обработки единицы поверхности;

δ – глубина сбоя, м.

Таблица 2.1 – Коэффициенты породы, зависящие от крупности зерен породы [72]

Породы	K	C	K	C
	При использовании керосино-кислородной горелки		При использовании бензовоздушной горелки	
Крупнозернистые граниты	0,61	-0,742	0,0515	0,0348
Среднезернистые граниты	0,447	-0,53	0,032	0,016
Мелкозернистые граниты	0,306	-0,317	0,0236	0,007

Эффективность обработки единицы поверхности пород в зависимости от камерного давления и толщины сбоя определена экспериментально для кислородно-керосиновых горелок и имеет вид [67]

$$F = \frac{0,06x(\lg P_k)^n}{\delta} \quad (2.31)$$

где x и n – коэффициенты, зависящие от типа пород (соответственно для крупнозернистых, среднезернистых и мелкозернистых гранитов $x = 0,0218; 0,0178; 0,0141$ и $n = 1,28; 1,12; 0,93$);

P_k – давление в камере сгорания, МПа.

Для вырезания блоков пород и обработки их поверхности применяют кислородно-керосиновые и бензовоздушные терморезаки и термоотбойники.

Наибольшее практическое применение нашли керосино-кислородные ТР-14/22-5 и бензовоздушные ТРВ-12М терморезаки конструкции Казахского политехнического института и термоотбойники Т-3 конструкции Харьковского авиационного института. Их характеристики приведены в таблице 2.2.

Эффективность процесса вырезания блоков и их обработка зависит от технологии. Основными технологическими параметрами являются угол встречи струи с породой и скорость перемещения термоинструмента относительно разрезаемой или обрабатываемой поверхности. Как показывает практика, максимальная эффективность имеет место при угле встречи 45-60° и при перемещении термоинструмента в отступающем направлении. Оптимальная скорость перемещения термоинструмента составляет 0,6...0,8 м/мин для резания и грубой термообработки.

Таблица 2.2 – Характеристика термоинструментов

Показатели	ТР-14/22-5	Т-3	ТРВ-12М
Габариты, м: длина диаметр	0,47 0,022	0,5 0,035	0,53 с насадкой 0,42 без насадка 0,06
Масса, кг	2,1	2,3	4,5
Система подачи окислителя	От кислородной станции или кислородной рампы	От передвижного компрессора или Воздушной магистрали	От передвижного компрессора
Давление подачи окислителя, МПа	2,0...2,5	0,5...0,7	0,6...0,8
Расход окислителя, м ³ /мин	7...10	2,5...3,0	3,5...5,0
Система подачи горючего	Насосная или вытеснительная	Насосная или вытеснительная	Насосная или вытеснительная
Расход горючего, л/ч	8...9	5...7	15...17
Охлаждение	Водяное	Воздушное	Воздушное
Параметры газовой струи: температура, °К скорость на срезе сопла, м/с	2000...2300 2200...2500	1200...1500 1300...1600	1200...1500 1300...1600

Глубина резания за один проход термоинструмента при этом составляет 0,01...0,015 м, а производительность термообработки – 0,8...1,2 м²/ч при толщине сбоя 0,03...0,04 м. Для тонкой обработки рекомендуется скорость перемещения термоинструмента порядка 1...1,2 м/мин.

В последнее время, в связи с широким использованием алмазных инструментов – дисковых пил, камнеобрабатывающие предприятия перешли на

изготовления гранитных блоков дисковыми алмазными пилами, производительность дисковой алмазной резки 2,0...3,0 м²/ч.

2.3 Технология и оборудование для разработки гранитных месторождений с использованием бензовоздушных термоинструментов

Первые труды по технологии разработки месторождений блочного камня даны в ранних изданиях учебников [75,76], а полные сведения о технологических процессах добычи блоков приведены в работах [14, 77].

Особое значение имеют комбинированные методы направленного откола при разработке гранитных карьеров. В зависимости от типов массивов здесь приемлемы следующие комбинированные методы: термоклинной, термовзрывной, взрывоклинной [78].

Весьма эффективны схемы комбинированной подготовки блоков к выемке с включением термической вырезки гранитов. На карьерах нашей страны накоплен значительный опыт использования термических методов на месторождениях природного камня. Комплекс оборудования при комбинированных способах подготовки блоков к выемке для разработки термически разрушаемых гранитов должен включать в себя установки газоструйного резания щелей, строчечного бурения шпуров, гидроклинные установки для раскалывания монолитов на блоки [79].

Способ отделения монолитов от массива с огнеструйным (с помощью ручных терморезаков) щелеобразованием применяется в основном на гранитных карьерах. Терморезак – породоразрушающий термогазоструйный инструмент, предназначенный главным образом для прорезания щелей в массиве горных пород – создания дополнительной плоскости обнажения при добыче блоков природного камня. На рисунке 2.3 показан участок добычи гранитных блоков на карьере Куртинского месторождения [80].



Рисунок 2.3 – Добыча гранитных блоков на карьерах Куртинского месторождения

Терморезак состоит из исполнительного органа – реактивной горелки, рукоятки и штанги-удлинителя при глубинном разрушении горных пород. При работе терморезака компоненты горючей смеси (бензин, керосин, дизельное топливо, сжатый воздух) поступают через индивидуальные вводы в полость горелки.

Высокотемпературная газовая струя (температура до 2000...3000°C) со сверхзвуковой скоростью (свыше 2500 м/с) воздействует на поверхность горных пород. Под влиянием высокой температуры в горных породах происходит резкое увеличение объема отдельных минеральных зерен, что приводит к образованию внутренних напряжений в поверхностном слое породы с последующим ее разрушением, протекающем обычно в режиме шелушения.

Быстрота разрушения породы, под действием высокотемпературной газовой струи, зависит от теплофизических свойств породы, ее минералогического состава, структуры, текстуры, степени выветрелости, трещиноватости, рационального использования энергии газовой струи и др.

Наибольшая производительность терморезаков достигается обычно на монолитных крупнозернистых гранитах с высоким содержанием кварца (30...40 %) и минимальным содержанием биотита (до 10 %) – до 1,2 м²/ч при ширине щели до 0,10 м, глубиной до 5 м. Важнейшим фактором, влияющим на производительность терморезаков, является рациональное использование энергии газовой струи, определяемое расстоянием от забоя щели до среза сопла горелки (оптимальное – 70 мм) и углом атаки газовой струи (оптимальный – 60°) [8].

На карьерах по добыче гранитных блоков в Казахстане и на других карьерах были внедрены бензовоздушные ручные терморезаки типа БВР-60 конструкции Казахского политехнического института им. В.И.Ленина.

Одним из способов подготовки крупных гранитных блоков является – пассировка, где имеет место применения огнеструйного способа разрушения. Пассировка – грубая обработка блоков из горных пород для придания им заданной формы и размеров, соответствующих требованиям ГОСТа. Пассировка включает откалывание крупных кусков блока на его гранях, образующих острые углы, укалывание выступов и постепенное доведение блоков до стандартных размеров. Объем пассировки определяется качеством выполняемых работ при отделении монолитов от массива и последующим раскалыванием их на блоки.

Обкалывание блоков выполняется механическим способом с помощью пневматических отбойных молотков или термическим способом – с помощью термоотбойников, который применяется при обработке пород, поддающихся термическому разрушению.

Бензовоздушный термоотбойник представляет собой инструмент, имеющий пистолетообразную форму, основной частью которого является прямоочный воздушно-реактивный микродвигатель, работающий на сжатом воздухе и бензине. Сбой камня при его обработке осуществляется высокотемпературной газовой струей 2000°K или 1726,85 °C, вытекающей из сопла реактивного микродвигателя со сверхзвуковой скоростью 2500 м/с.

В настоящее время существует большое число конструкций бензовоздушных термогазоструйных отбойников. Это такие, как Т-3 и Т-5 конструкции Харьковского авиационного института, ЛТ-1 – разработка Ленинградского горного института, АЯ-3 конструкции центральных ремонтных мастерских АО Житомирнерудпром, БВР-60, БВР-80 конструкции КазПТИ технические характеристики которых приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические характеристики термоинструментов

Показатели	Марка термоотбойника					
	Т-3	Т-5	ЛТ-1	АЯ-3	БВР-60	БВР-80
Горючее	Бензин	Бензин или керосин	Бензин	Бензин	Бензин дизель	Бензин дизель
Давление подачи, МПа: воздуха	0,4...0,6		0,3...0,6	0,4...0,6	0,4...0,6	0,6...0,9
горючего	0,4...0,6		0,3...0,6	0,4...0,6	-	-
Расход воздуха, м ³ /мин	25...30	25...35	15	3,5...5,0	До 9	9...12
Расход горючего, л/ч	45...50	52...55	17...20	17...20	20...25	35...50
Масса инструмента, кг	2,3	3,5	1,6	2	15	35

Производительность термогазоструйных инструментов зависит от физико-технических и текстурных особенностей строения горной породы, скорости истечения газовой струи, удаления сопла камеры от поверхности обрабатываемого камня, мастерства оператора. Она составляет при обработке легкообрабатываемых кристаллических пород до 1000 см³/мин и более [80].

На карьерах природного камня применяется способ добычи блоков с помощью алмазоканатных пил, используется два типа алмазных канатов: электродепозитный и синтеризованный. Их различие заключается в следующем: канаты первого типа имеют закрепление алмазов на корпусе втулки электролитическим способом, а второго типа – методом порошковой металлургии с использованием горячего или холодного прессования с пропиткой легкоплавкими металлами. Тип связи в значительной степени определяет износостойкость каната. Исследования авторов по данному типу добычи камня представлены работами [33,82].

На прочных горных породах применяют только синтеризованный алмазный канат, в связку которого для увеличения прочности добавляют твёрдые сплавы в порошке. Стойкость его значительно выше, чем электродепозитного, поэтому на карьерах эти канаты применяют чаще, хотя и стоимость его соответственно несколько больше. Стойкость алмазных канатов на гранитах в 5...10 раз ниже, чем на мраморах [33].

Известно, что термический способ разрушения камня может быть использован не для всех видов горных пород. Разрушение горных пород термическим способом происходит в результате её нагрева и возникновения разности напряжений в отдельных слоях. Лучше всего резке поддаются породы с высоким содержанием кварца (выше 35%) [83]; уменьшение содержания

кварца в породе с 40...60% до 15...20% приводит к уменьшению производительности терморезаков в 1,5 раза [14].

Резание может осуществляться термогазоструйными инструментами, работающими на смесях бензина с воздухом и керосина с кислородом. В работе [84] отмечается, что производительность керосино-кислородных горелок на единицу израсходованного горючего в 2 раза больше, чем бензовоздушных, однако, высокая стоимость кислорода и трудности обеспечения им ограничивает использование этих горелок.

Производительность термогазоструйного инструмента при работе в гранитах с высоким содержанием кварца составляет около 1000 см³/мин и колеблется от 4...10 м²/смену [85]. Производительность терморезаков зависит так же от режима работы, вида и свойств породы и составляет для терморезака ТР-35 – 0,8...1,7 м²/ч при расходе керосина 17...19 кг/ч, и кислорода – 0,5...0,6 м³/мин; для терморезаков БВР-60 и МТР-1 производительность, расход бензина и воздуха составляют соответственно: 0,4...0,7 и 0,7...1,5 м²/ч; 18...20 и 30...40 кг/ч; до 6,0 и 10...12 м³/мин [5]. При этом термическое резание целесообразно применять для монолитных пород при площадной производительности не менее 2 м²/ч [75,76,83].

Добычу блоков термическим способом ведут по двухстадийной схеме. На первой стадии проводят оконтуривание монолита по вертикальным плоскостям терморезаками и отделение его от массива по горизонтальной плоскости буровзрывным способом. На второй стадии ведут разделку монолита на товарные блоки буроклиновым способом. Поэтому в комплекс оборудования для добычи блоков при использовании термического способа входят терморезаки или газоструйные установки, перфораторы или станки строчечного бурения вертикальных и горизонтальных шпуров, клиновые установки – для разделки монолита на блоки [86].

Установлено, что производительность огнеструйного разрушения пропорциональна мощности теплового потока, идущего в породу, тепловая мощность, в свою очередь, зависит от температуры газовой струи, ее скорости и геометрических размеров пятна контакта. Перечисленные факторы являются режимными параметрами термоинструментов. Изучение их влияния на производительность огнеструйного разрушения необходимо для проектирования горелок целевого назначения.

Исследования в этой области проводились в Проблемной лаборатории КазПТИ им.В.И.Ленина, ХАИ, МГИ, ИГТМ и др. [54,56,57]. Влияние расхода топливных компонентов на производительность огнеструйного разрушения исследовалось в работах [54]. Показано, что с увеличением отношения площади критического сечения сопла горелки $F_{кр}$ к площади поперечного сечения камеры сгорания F_k объемная производительность возрастает, так как величина отношения $F_{кр}/F_k$ пропорциональна суммарному расходу газа, следовательно, для увеличения производительности разрушения необходимо увеличивать расходы горючего и окислителя.

Соотношение поступающих в камеру сгорания горючего и окислителя,

характеризующееся коэффициентом избытка окислителя α_T , оказывает определенное влияние на производительность разрушения. Установлено, что наиболее оптимальным режимом работы керосино-кислородных горелок является при $\alpha_m=0,7...0,9$ [57].

С ростом давления в камере сгорания до 2,0...3,0 МПа производительность разрушения возрастает по линейному закону [56], но с увеличением давления значительно усложняются системы и оборудование подачи топливных компонентов к горелке, ужесточаются требования по технике безопасности и обслуживанию, поэтому принято целесообразное давление в камере сгорания, составляющее 0,5...0,7 МПа.

Эффективность работы горелки в значительной мере зависит от организации в камере сгорания процесса смесеобразования топливных компонентов. Процесс смесеобразования зависит от подачи компонентов в камеру сгорания через форсунки и их перемешивания. Основными показателями, характеризующими качество распыливания горючего, является тонкость и однородность, а также угол струи. Тонкость и однородность распыливания зависит от конструкции форсунки и перепада давления на ее срезе. Во всех конструкциях горелок использован центробежный тип форсунок с искусственной закруткой подаваемого через нее горючего. При центробежном распыливании дальнобойность невелика, это и определяет размеры зоны распыливания в камере, а, следовательно, и размеры камеры сгорания.

Камера сгорания является основным органом термоинструмента. Для расчета камеры сгорания необходимо определить ее объем и геометрические размеры. Объемом камеры сгорания V_K принято считать объем камеры до критического сечения. При проектировании камеры сгорания пользуются соотношением $f_K/f_{кр} = 6...20$. Диаметр цилиндрической части камеры сгорания определяется из соотношения L_K/D_K . Учитывая конструктивные особенности малогабаритных ракетных горелок, отношение длины камеры сгорания к диаметру камеры принимается равным 3...5.

Основные размеры сопла камеры сгорания определяются на основе опытных данных из практики конструирования ручных термоинструментов, при этом учитываются потери на трение и рассеивание на входе в сопло.

По результатам исследований в Проблемной лаборатории КазПТИ им. В.И.Ленина было разработано несколько конструкций машинных термоинструментов, работающих на смеси кислорода с керосином, прошедших испытания в производственных условиях [24,87]:

- базовая горелка ТР-14/22-5 предназначена для чистовой обработки;
- вариант модели ТР-14/22-5 – горелка ТР-14/26 – для получистовой тески;
- горелки ТБ-1М и РО – для грубого сбоя.

По характеру обработки поверхность разрушения может быть: грубой, при которой производится основной сьем породы с высотой припуска 0,015...0,2 м; получистовой – до 0,003...0,008 м; чистовой – до 0,002...0,004 м. Отклонение профилей неровностей поверхности соответственно составляет 0,008...0,01; 0,003...0,004 и 0,002...0,004 м.

Секундный расход горючего составляет:

- при грубой обработке ($\alpha_k = 0,3...0,4$): $Q_2 = (5,9...8,66) \cdot 10^{-3}$, кг/с;
- при получистой обработке ($\alpha_k = 0,5...0,7$): $Q_2 = (3,3...4,7) \cdot 10^{-3}$ кг/с;
- при чистой обработке ($\alpha_k = 0,7...0,9$): $Q_2 = (1,3...1,66) \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Испытание термоагрегатов для механизированной обработки блоков с применением керосино-кислородных горелок в качестве рабочих органов показало высокую их эффективность, возможность автоматизировать процесс управления рабочим процессом [88].

Внедрение термоинструментов типа ТРВ-12, БВР-60, работающих на топливной смеси бензин-воздух, позволяет сделать вывод о целесообразности использования их на механизированных термоагрегатах по обработке блочного камня, но требуется дальнейшее их совершенствование по экономии топливных смесей.

Основное требование к терморезакам для механизированной обработки, работающих на тяжелых видах топлива, – это значительное повышение их термодинамических параметров – температуры и скорости газовой струи при сохранении их габаритных размеров. Термоинструмент для обработки обладает высокой стойкостью и надежностью ввиду отсутствия его контакта с разрушаемой поверхностью, но при реализации способа в виде ручных инструментов, рабочий и окружающая среда подвергаются воздействию мощного аэродинамического шума горелки, однако существуют значительные резервы для их совершенствования, за счет интенсификации рабочих процессов горения и управления процессом обработки.

Выводы по 2 разделу

1. Рассмотрены особенности теплообмена при использовании сверхзвуковых газовых струй и основные термодинамические параметры высокоскоростного газового потока при термическом разрушения горных пород, выбрана термодинамическая модель системы «теплоноситель – порода»; представляющая напряженно-деформированное состояние породы под действием теплового потока, позволяющая выполнить расчетные параметры их взаимодействия.

2. Теоретически установлены аналитические зависимости объемной скорости разрушения и скорости обработки единицы поверхности породы от расходных характеристик и критического сечения сопла термоинструмента.

3. Установлены режимные параметры работы термоинструментов, а именно: производительность огнеструйного разрушения пропорциональна мощности теплового потока, направленного в породу; тепловая мощность потока зависит от температуры газовой струи, её скорости и геометрических размеров пятна контакта.

4. Рассмотрены режимные параметры термоинструментов (керосино-кислородных и бензовоздушных) и применение их в процессах добычи и поверхностной обработки блочного камня.

3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ БЕНЗОВОЗДУШНОГО ТЕРМОИНСТРУМЕНТА С ИНТЕНСИФИКАТОРОМ ГОРЕНИЯ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

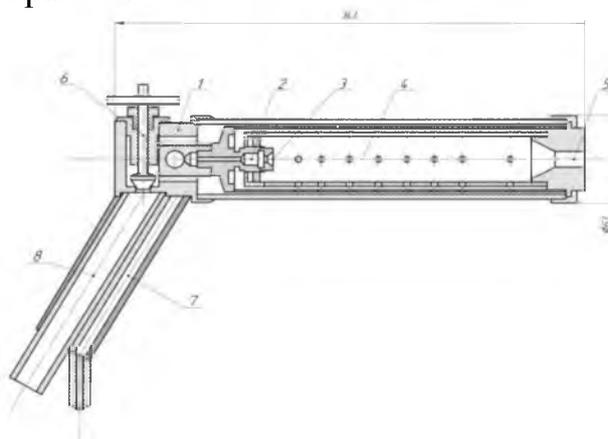
3.1 Практика конструирования бензовоздушных термоинструментов для разрушения крепких горных пород с интенсификаторами горения

Практика использования огнеструйных рабочих органов – терминиинструментов для бурения и обработки крепких горных пород позволила создать технологию огнеструйного разрушения и разработать совершенную конструкцию горелок, работающих на топливной смеси керосин-кислород или бензин-воздух [15].

Внедрение технологии добычи блоков с использованием термической резки на ведущих камнеобрабатывающих предприятиях Украины и Республики Казахстан показало, что породы большинства месторождений хорошо разрушаются воздушными газоструйными термоинструментами с приемлемой для практики скоростью. Средняя производительность резания составляет 0,65 м² щели в час [89].

Опытно-промышленная резка пород Майкульского карьера амазонитовых гранитов (Казахстан) бензовоздушными терморезаками ТРВ-5 конструкции КазПТИ обеспечила производительность резания одной горелкой 0,5 м²/ч.

На рисунке 3.1 представлена конструкция ручного термоинструмента ТРВ-12М, предназначенного для поверхностной обработки гранитных заготовок, прошедшая широкие промышленные испытания в различных регионах Казахстана, России и Украины.



1 – распределительная головка; 2 – форсунка; 3 – завихритель; 4 – камера сгорания; 5 – сопло; 6 – вентиль воздушный; 7 – магистраль горючего; 8 – магистраль воздушная

Рисунок 3.1 – Термоинструмент ТРВ-12М

Техническая характеристика термоинструмента ТРВ-12М
- расход воздуха – 3,5... 5 м³/мин,
- расход горючего (бензин / дизельное топливо) – 15... 17 л/час,
- диаметр сопла – 13 мм,

Основное требование к термоинструментам для механизированной обработки, работающих на тяжелых видах топлива (дизельное топливо) – это значительное повышение термодинамических параметров – температуры и скорости газовой струи, при сохранении габаритных размеров термоинструмента.

Использование бензовоздушных термоинструментов, в качестве рабочих органов механизированных термоагрегатов для разрушения горных пород, сдерживается сравнительно низкой их мощностью, при увеличении которой быстро возрастают габаритные размеры, а также малыми размерами факела горелки (0,1...0,15 м). Однако, ввиду простоты работы и организации питания топливными компонентами бензовоздушных термоинструментов, их использование в качестве рабочих органов механизированных установок является актуальным.

Повышение тепловой мощности бензовоздушных термоинструментов, без значительного развития их габаритных размеров и увеличения размеров факела, возможно за счет интенсификации процессов горения.

Одним из средств интенсификации горения свободных струй, за пределами среза сопла Лавалья, является дожигание продуктов неполного внутрикамерного сгорания в обогащенной топливом струи за счет эжектирования в струю атмосферного воздуха [90].

Разработанные конструкции термоинструментов [91,92] решили ряд технологических задач – повысили производительность разрушения горных пород, автоматизировали запуск горелок в работу, что существенно важно для разработки рабочих органов механизированных термоагрегатов.

Проводимые исследования по интенсификации горения показывают перспективность применения явления детонационного горения для термического разрушения горных пород. Качественная оценка детонационного горения была проведена на бензовоздушной горелке с интенсификатором горения, выполненного в виде цилиндрического насадка на части струи горелки, и эжектированием воздуха через перфорацию насадка, расположенной на некотором расстоянии от среза сопла горелки.

Интенсификация горения в насадке происходит за счет управления процессом горения, после выхода струи из сопла Лавалья в полость насадка, имеющего площадь поперечного сечения в 2,0÷2,5 раза больше площади критического сечения сопла Лавалья. В этом сечении струя горелки резко расширяется, в результате чего образуется зона турбулентного течения газового потока и, как следствие, – резкое повышение температуры газовой струи. Экспериментами установлено – нагрев насадка происходит до температуры 1100-1200⁰С, следовательно, температура газового потока внутри насадка находится в пределах 1800...2000⁰С. Избыток температуры отводится с наружной поверхности насадка за счет теплопроводности металла.

В разработанном нами устройстве термоинструмента ТРВ-12М1 (рисунок 3.2), детонационный эффект достигается путем возбуждения стационарного скачка уплотнения (ударной волны) в начале основного участка сверхзвуковой, обогащенной горючим компонентом, газовой струи горелки. Детонационный

эффект достигается за счет трения струи сверхзвукового газового потока о рельеф внутренней поверхности насадка и контакта газовой струи с холодным эжектируемым воздухом. Одновременно происходит догорание горючего, поступающего из камеры сгорания и сопла Лавала в насадок, в струе газового потока и в ударной волне. Происходит интенсивное (детонационное) горение в насадке за счет окислителя воздуха, поступающего через перфорационные каналы насадка. В результате увеличивается мощность газового потока и дальность (струи).

На рисунках 3.2 и 3.3 представлены термоинструмент ТРВ-12М1 и его комплектующие детали.



Рисунок 3.2 – Термоинструмент ТРВ-12М1



1 – камера сгорания с соплом Лавала, 2 – рукоятка с каналам подачи топливных компонентов, 3 – промежуточный кожух, 4 – наружный кожух, 5 – гайки соединительные, 6 – насадка

Рисунок 3.3 – Комплектующие детали термоинструмента ТРВ-12М1

Обогащение горючим сверхзвуковой струи осуществляется через форсуночный аппарат горелки в пределах 15...20 % от основного расхода горелки без насадка.

Газовый поток горелки разогревает избыточное горючее (до 1800...2000⁰С), которое, реагируя с окислителем, поступающим через перфорацию насадка из атмосферного воздуха и, за счет сверхзвуковых химических реакций и мгновенного тепловыделения в скачке уплотнения, снова разгоняется в цилиндрическом насадке до сверхзвуковой скорости. При этом возникает мощный поток раскаленных газов повышенной скорости и массового расхода.

В результате испытаний термоинструмента установлен оптимальный угол наклона эжекционных окон насадка, который составляет 40⁰...50⁰ к его оси, а суммарная площадь окон эффективна в пределах 50...60% от площади критического сечения сопла Лавалья горелки. При этом длина цилиндрического насадка до эжекционных окон равна 3,0...3,5 его внутреннего диаметра, который больше критического сечения сопла Лавалья в 1,5..2,0 раза.

Дожигание горючего в мощном скачке уплотнения в начале основного участка струи и вновь разгон струи в цилиндрическом насадке позволяет повысить мощность струи, уменьшить геометрические размеры термоинструмента, повысить производительность и эффективность разрушения горных пород.

Этот значительный эффект получается без дополнительного расхода воздуха от компрессора, а производительность увеличивается в 1,3...1,5 раза при увеличении расхода горючего только на 15%. Это обеспечивает экономический эффект около 30% по сравнению с применением горелки без насадка.

Для определения теплопередающих параметров сверхзвуковой высокотемпературной газовой струи была разработана специальная горелка с возможностью использования в качестве горючего бензина, дизельного топлива и газа пропана (рисунок 3.2). На рисунке 3.4 показан фрагмент работы горелки с эжекционным насадком при поверхностной обработке блока горной породы в процессе проведения щелевой выработки [93].



Рисунок 3.4 – Процесс работы термоинструмента ТРВ-12М1 с эжекционной насадкой

Экспериментально выявлено, что с увеличением количества эжекционных окон (до 8 и более), увеличиваются размеры факела и мощность теплового потока.

В настоящее время существует техническая возможность использовать термоинструменты с эжекционным насадком для различных технологических операций разрушения горных пород при поверхностной обработки (пассировки) и резки щелевых выработок.

3.2 Методика расчета основных параметров бензовоздушного термоинструмента

При проектировании горелки определяют диаметральные и линейные размеры ее деталей, зная параметры газа и удельные характеристики горелки. В зависимости от назначения горелки выбирается режим ее работы: коэффициент избытка воздуха α_T и давление внутри камеры сгорания P_K . Для термического разрушения горных пород рекомендуется брать $\alpha_T = 0,7 \div 1,1$. При питании горелки воздухом от серийных передвижных и стационарных компрессоров давление в камере сгорания выбирается в пределах $P_K = 5 \div 7$ бар. Для выбранных α_T и P_K , с учетом окружающей среды P_a по графикам термодинамического расчета определяются теоретические температуры газа внутри горелки $T_{к теор}$, на срезе сопла $T_{a теор}$ и скорости истечения газа из сопла $W_{a теор}$ [63].

Установив режимные параметры работы горелок, определяем их основные геометрические размеры. Расчет охлаждения производится по разработанной методике [94].

Методика позволяет рассчитать воздушно-реактивную горелку любой конструктивной схемы для обработки изделий из природного камня.

Одним из основных элементов конструкции любой горелки является сопло, которое служит для преобразования части тепловой энергии в кинетическую энергию газовой струи с целью получения сверхзвуковой скорости истечения газа.

Таким образом, сопло Лавалья состоит из сужающейся части, где газ движется с дозвуковой скоростью, и расширяющейся, где газ движется со сверхзвуковой скоростью. Самое узкое сечение сопла Лавалья называется критическим. Скорость газа в критическом сечении равна скорости звука. Сверхзвуковой высокотемпературный газовый поток, выбрасываемый из сопла, тормозится на поверхности блока, нагревая и разрушая горную породу [17].

Для характеристики параметров истечения газов служит показатель, получивший название числа Маха (M), равный отношению скорости потока W к скорости звука в потоке a :

$$M = \frac{W}{a}, \quad (3.1)$$

Температура торможения T_0 и температура газа в потоке T зависят от числа Маха и связаны соотношением

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k+1}{2} M^2, \quad (3.2)$$

где $T_0 = T + W^2/2g$ (g – ускорение свободного падения);

$k = C_p/C_v$ – показатель адиабаты газов, равный отношению их теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме.

Горелки, работающие на химическом топливе, можно условно разделить на две части: камеру сгорания, где происходит образование топливной смеси и ее сгорание, и сопловой аппарат, где часть теплосодержания газового потока переходит в кинетическую энергию струи. Такое схематическое разделение изображено на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – К тепловому и газодинамическому расчету реактивной горелки

Установлено, что интенсивность термического разрушения горных пород зависит, как от их собственных свойств, так и от тепловых и газодинамических параметров газовых струй, которые определяются давлением в камере сгорания P_k , коэффициентом избытка окислителя $\alpha_{ок}$, расходом горючего G_2 и окислителя G_0 , геометрическими размерами камеры сгорания и соплового аппарата и т.д.

С целью определения рациональных режимов работы горелки необходимо выполнить расчет ее тепловых и газодинамических параметров на основе соотношений из теории термодинамики газовых потоков.

Известно, что температура и скорость газового потока на выходе из сопла горелки связаны с внутрикамерными параметрами следующими соотношениями [95]:

$$T_3 = T_2 \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad (3.3)$$

$$W_3 = \sqrt{\eta_c 2g \frac{k}{k-1} RT_2 \left[1 - \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3.4)$$

где k – показатель адиабаты газов при температуре T_2 ;

η_c – к.п.д. сопла, $\eta_c = 0,95 \div 0,97$.

Показатель адиабаты газов вычисляется по формуле

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{C_p - AR}, \quad (3.5)$$

где C_p – теплоемкость при постоянном давлении газовой смеси «окислитель + продукты сгорания» при температуре T_2 ;

$A = 1/427$ – коэффициент;

R – постоянная для газовой смеси «окислитель + продукты сгорания».

Теплоемкость газовых смесей определяется согласно правилу смесей по формуле [95]

$$C_p = \frac{(1 + L_0)C_n + (\alpha_{ок} - 1)L_0C_0}{1 + \alpha_{ок}L_0} \quad (3.6)$$

где L_0 и $\alpha_{ок}$ – определяются по формулам соответственно

$$L_0 = B \left(\frac{8}{3}C_r + 8H_r \right), \text{ кг/кг}, \quad (3.7)$$

$$\alpha_{ок} = \frac{G_0}{G_r L_0}, \quad (3.8)$$

где C_n – теплоемкость чистых продуктов сгорания при температуре T_2 , $C_n = 0,234 + 0,0000676T_2$, ккал/кг·°С;

C_0 – теплоемкость окислителя при температуре T_2 , для воздуха $C_0 = 0,224 + 0,0000472T_2$, ккал/кг·°С.

Газовая постоянная для чистых продуктов сгорания $R_n = 29,5$ кгс·м/кг·°С, для окислителя (воздуха) $R_0 = 29,27$ кгс·м/кг·°С, для газовой смеси «продукты сгорания + окислитель» газовая постоянная определяется по правилу смесей:

$$R = \frac{R_n(1 + L_0) + R_0(\alpha_{ок} - 1)L_0}{1 + \alpha_{ок}L_0}. \quad (3.9)$$

Площадь выходного сечения сопла определяется по формуле:

$$f_3 = \frac{G}{\gamma_3 W_3}, \quad (3.10)$$

где G – расход топлива по массе;

γ_3 – плотность газов на выходе из сопла.

Расходы окислителя G_0 и горючего G_r (по массе) определяются по формулам:

$$G_0 = Q_0 \gamma_0; \quad (3.11)$$

$$G_r = \frac{G_0}{\alpha_{ок} L_0}, \quad (3.12)$$

где Q_0 – объемный расход окислителя;

γ_0 – плотность окислителя.

Удельный расход газов на выходе из сопла

$$\gamma_3 = \frac{P_3}{RT_3} \quad (3.13)$$

Площадь критического сечения сопла определяется по формуле

$$f_{кр} = \frac{G_0}{q_0}, \quad (3.14)$$

где q_0 – относительный расход газов

$$q_0 = \frac{P_2 A_k}{\sqrt{RT_2}}. \quad (3.15)$$

Здесь коэффициент $A_k = 2,11$.

В формулах (3.13) и (3.15) значения P_3 и P_2 следует подставлять в кгс/см².

Диаметры выходного d_3 и критического сечений сопла $d_{кр}$ определяются соответственно по формулам:

$$d_3 = 2\sqrt{\frac{f_3}{\pi}}; \quad d_{кр} = 2\sqrt{\frac{f_{кр}}{\pi}}. \quad (3.16)$$

Объем камеры сгорания определяется по формуле

$$V_k = \frac{\tau_c G R T_2}{P_2}, \quad (3.17)$$

где τ_c – время, необходимое для полного сгорания топлива, $\tau_c \approx 0,03$ с.

Температура T_2 принимается равной температуре сгорания топлива и зависит от типов горючего и окислителя.

Вычислив объем камеры сгорания по формуле (3.17) и задавшись диаметром горелки, определяем необходимую ее длину.

Для определения эффективной температуры теплоносителя T_3 при разрушении горной породы огнеструйным способом воспользуемся решением уравнения теплопроводности для поверхности полупространства, которое имеет вид [17]:

$$\frac{T_p}{T_3} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} h \sqrt{a \tau_p}, \quad (3.18)$$

где h – относительный коэффициент теплоотдачи.

T_p – температура поверхности породы в момент разрушения, определяется по формуле (2.18).

Время разрушения определяется по выражению (2.19).

Подставив значения T_p и τ_p в формулу (3.18), получим выражение для определения необходимой эффективной температуры струи в зависимости от свойств породы:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \varepsilon \rho \frac{c_m}{c_q} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \varepsilon \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \end{cases} \quad (3.19)$$

Значение T_3 должно быть по крайней мере не ниже полученного в результате расчета по формуле (3.19).

Необходимая температура струи на срезе сопла при заданных значениях T_3 , $\alpha_{ок}$ и l определяется

$$T_3 = \frac{1293 - 552\alpha_{ок} + 87\alpha_{ок}^2}{0,963 - 0,74 \cdot 10^{-2}l + 0,481 \cdot 10^{-4}l/2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.20)$$

Затем по формуле (3.3) определить минимально необходимую температуру в камере сгорания T_2 , достаточную для разрушения горной породы с заданными свойствами.

Необходимый минимальный расход горючего, в зависимости от свойств породы и объемная скорость разрушения V_0 , определяются по формулам [72]:

$$G_r = \frac{V_0}{\Pi \eta Q}, \quad (3.21)$$

$$V_0 = V \frac{\Pi D^2}{4}, \quad (3.22)$$

где $\Pi = \beta E / \sigma_p C v$ – критерий термобуримости породы, характеризует энергоемкость ее разрушения;

η – к.п.д. ввода тепла в породу;

Q – теплотворная способность топлива;
 D – диаметр пятна контакта струи с породой;
 σ_p – предел прочности породы на растяжение;
 C – объемная теплоемкость породы;
 ν – коэффициент термической пластичности породы.

Из камеры горелки высокотемпературный газ поступает в сопловой аппарат, в котором происходит частичное превращение тепловой энергии в кинетическую энергию газовой струи.

Камера сгорания термоинструмента, работающая на химической энергии топлива, которое оценивается его теплотворной способностью $H_{u.m.}$ (таблица А1, Приложение А).

Эффективный тепловой поток, выделившееся в результате сгорания топлива, можно определить из выражения:

$$q_{eT} = H_{u.T} \eta_{\alpha} \eta_{disc} \eta_{ek}, \quad (3.23)$$

где $H_{u.m.}$ – теплотворная способность: бензина 53995 кДж/кг; дизельного горючего – 42530 кДж/кг; керосина – 42200 кДж/кг.

η_{α} – недостаток окислителя,

η_{disc} – коэффициент потери тепла на диссоциацию продуктов сгорания, они не рассматриваются отдельно, так как оба вида потерь учитывается в термодинамическом расчете процесса сгорания.

η_{ek} – коэффициент эффективного выделения тепла: для керосинно-кислородных – $\eta_{ek} = 0,85 \dots 0,95$, для бензовоздушных – $0,7 \dots 0,9$.

Строим график зависимости теплового потока q_{eT} от коэффициента избытка окислителя α_T при различных расходах горючего.

В таблице 3.1 представлены данные расчета теплового потока q_{eT} для 1 кг расхода горючего.

Таблица 3.1 – Расчетные данные теплового потока q_{eT} для 1 кг расхода горючего

α_m	η_{α}	η_{disc}	q_{eT} бензин	q_{eT} дизельное топливо	q_{eT} керосин
0,5	0,66	0,66	18816	14820	16544
0,6	0,792	0,792	27095	21342	23823
0,7	0,924	0,924	36880	29049	32426
0,8	1,056	1,056	48169	37941	42352
0,9	1,188	1,188	60964	48020	53603
1,0	1,32	1,32	72264	59283	66176
1,1	1,452	1,452	91070	71733	80073
1,2	1,584	1,584	108381	85368	95294

На рисунке 3.6 представлен график зависимости теплового потока q_{eT} от коэффициента избытка окислителя α_T при различных расходах горючего.

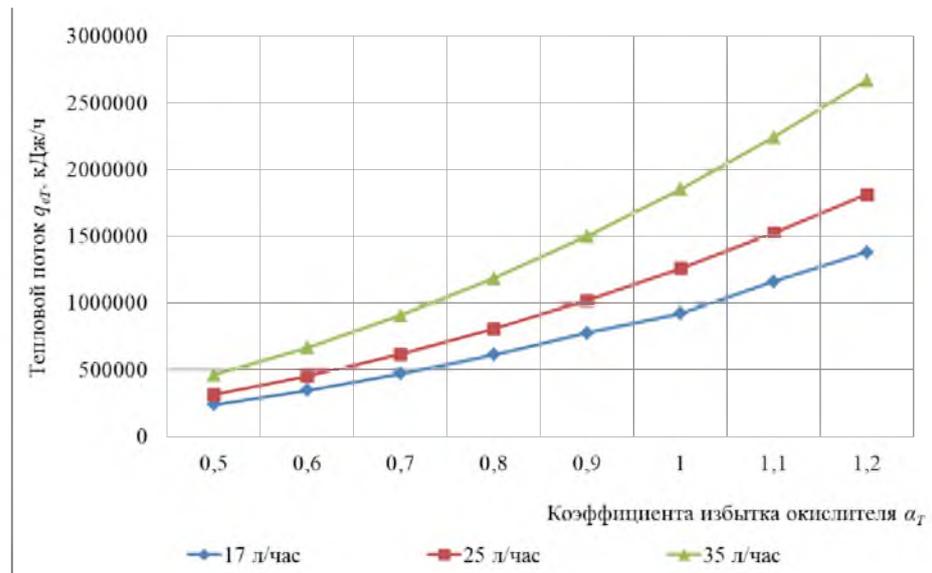


Рисунок 3.6 – График зависимости теплового потока q_{eT} от коэффициента избытка окислителя α_T , $q_{eT} = f(\alpha_T)$ при различных расходах горючего

Для проектирования новых и усовершенствования, применяемых в настоящее время горелок, теоретические исследования параметров газа в камере сгорания и на срезе сопла представляют значительный научный и практический интерес.

Термодинамические расчеты топлива бензин-воздух показывают, что в этом случае темп изменения параметров и их абсолютные величины значительно отличаются от топлива керосин-кислород.

Данные температуры в камере сгорания T_k представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Расчетные данные температуры в камере сгорания T_k

При $P_k = 0,25$ МПа		При $P_k = 0,5$ МПа		При $P_k = 0,75$ МПа	
α_T	T_k	α_T	T_k	α_T	T_k
0,7	2020	0,7	2020	0,7	2020
0,8	2140	0,8	2140	0,8	2140
0,9	2260	0,9	2260	0,9	2260
1,0	2280	1,0	2300	1,0	2310
1,1	2200	1,1	2200	1,1	2210
1,2	2100	1,2	2100	1,2	2110

Строим график зависимости температуры в камере сгорания T_k от коэффициента избытка окислителя α_T (топливо бензин+воздух) (рисунок 3.7).

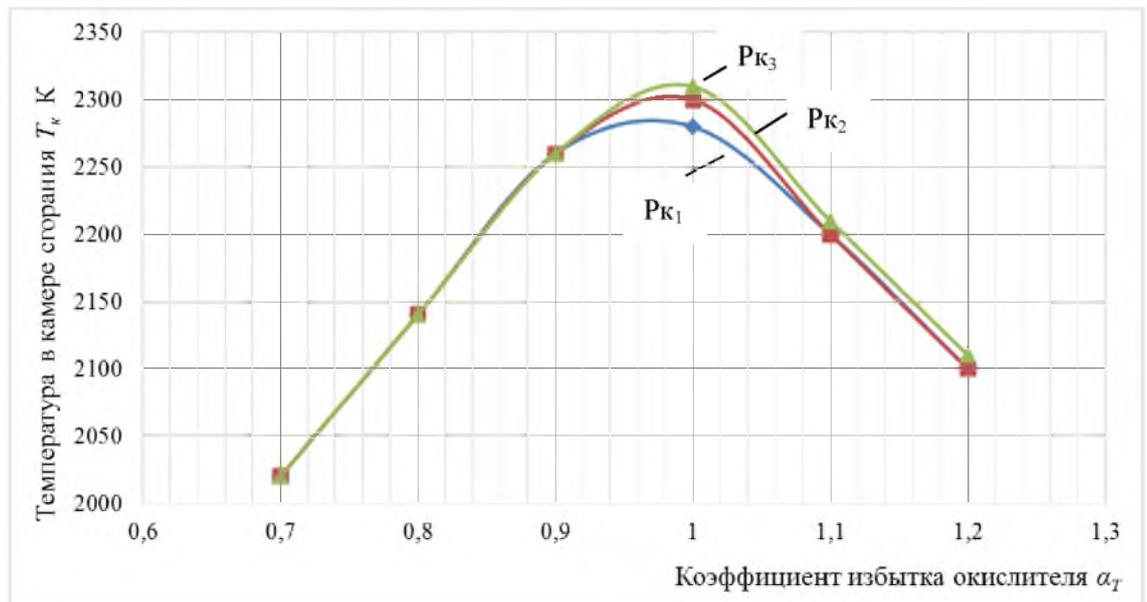


Рисунок 3.7 – График зависимости температуры в камере сгорания T_k от коэффициента избытка окислителя α_T , $T_k=f(\alpha_T)$

С увеличением P_k происходит незначительный рост T_k за счет подавления диссоциации продуктов сгорания. Диссоциация продуктов сгорания, определяемом составом газов и температурой, в бензовоздушных горелках значительно ниже, чем в кислородных.

Строим график температуры факела в зависимости от давления в камере сгорания при различных α_T (топливо бензин+воздух) $P_a = 0,5$ МПа.

Характер изменения W_a и T_a аналогичен для топлива керосин – кислород, однако темп их изменения отличен. Так как показатели изоэнтропы n и T_k при неизменном α_T практически остаются постоянными, то уменьшение температуры газа на срезе сопла определяется только степенью понижения давления в соответствии с уравнением:

$$T_a = \frac{T_k}{P_k^{\frac{n-1}{n}}} \quad (3.24)$$

где $n = 1,25$ – показатель изоэнтропы при давлений $P_a = 0,5$ МПа;

T_k – температура в камере сгорания;

P_k – давление в камере сгорания

Полученные данные температуры газа на срезе сопла Лавая T_a представлены в таблице 3.3.

На рисунке 3.8 представлен график зависимости температуры на срезе сопла от давления в камере сгорания при различных α_T (топливо бензин+воздух).

Таблица 3.3 – Температура газа на срезе сопла Лавалья T_a

$T_k = 2020^0\text{K}$ при $\alpha_T = 0,7$					
$P_k, \text{МПа}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
T_a	1442	1263	1188	1122	1063
$T_k = 2140^0\text{K}$ при $\alpha_T = 0,8$					
P_k	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
T_a	1528	1338	1259	1189	1126
$T_k = 2260^0\text{K}$ при $\alpha_T = 0,9$					
P_k	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
T_a	1614	1413	1329	1256	1189
$T_k = 2300^0\text{K}$ при $\alpha_T = 1,0$					
P_k	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
T_a	1643	1438	1353	1278	1211
$T_k = 2200^0\text{K}$ при $\alpha_T = 1,1$					
P_k	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
T_a	1571	1375	1294	1222	1158
$T_k = 2100^0\text{K}$ при $\alpha_T = 1,2$					
P_k	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
T_a	1500	1313	1235	1167	1105

С уменьшением α_T по сравнению с оптимальным количество выделяющегося тепла уменьшается.

При уменьшении α_T ниже $\alpha_{T, \text{opt}}$ (T_a) наблюдается сильное снижение температуры T_a , особенно при больших давлениях. С ростом P_k температура газа на срезе сопла резко уменьшается вследствие увеличения степени расширения газа. С увеличением давления сгорания диссоциация уменьшается, а следовательно, уменьшается и количество тепла, которое выделяется в результате рекомбинации диссоциированных продуктов при расширении газа в сопле.

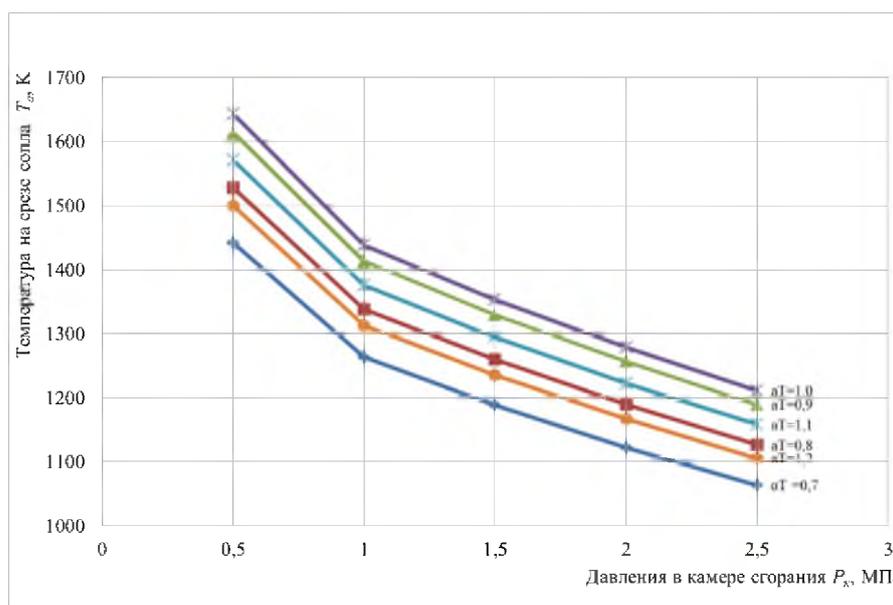


Рисунок 3.8 – График зависимости температуры на срезе сопла T_a от давления в камере сгорания $T_a=f(P_k)$ при различных α_T (топливо бензин+воздух)

При прочих равных условиях оптимальное значение α_T для W_a значительно меньше, чем для T_a . Максимальная скорость истечения наблюдается при $\alpha_T = 0,65 \div 0,75$.

Повышение давления в камере сгорания увеличивает скорость истечения газа, что объясняется двумя факторами: увеличением степени расширения газа в сопле и повышением температуры сгорания.

Строим график зависимости скорости истечения факела в зависимости от давления в камере при различных α_T (топливо бензин+воздух) $P_a = 0,5$ МПа (рисунок 3.9).

Расчетная скорость истечения газа из сопла

$$W_a = \sqrt{2g \frac{n}{n-1} RT_k \left(1 - \frac{1}{P_k \left(\frac{n-1}{n} \right)} \right)} \quad (3.25)$$

где $n = 1,25$ – показатель изоэнтропы при давлений $P_a = 0,5$ МПа;

$R = 287$ Дж/кг·К – число Рейнольдса или газовая постоянная для воздуха;

$g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения;

T_k – температура в камере сгорания;

P_k – давление в камере сгорания;

Данные скорости истечения газа из сопла W_a приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Расчетные данные скорости истечения газа W_a из сопла

Тк = 2020 ⁰ К при $\alpha_T = 0,7$					
Рк, МПа	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Wa, м/с	1285	1474	1545	1604	1658
Тк = 2140 ⁰ К при $\alpha_T = 0,8$					
Рк	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Wa	1323	1518	1590	1651	1706
Тк = 2260 ⁰ К при $\alpha_T = 0,9$					
Рк	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Wa	1360	1560	1635	1697	1753
Тк = 2300 ⁰ К при $\alpha_T = 1,0$					
Рк	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Wa	1372	1573	1649	1712	1769
Тк = 2200 ⁰ К при $\alpha_T = 1,1$					
Рк	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Wa	1341	1538	1612	1674	1729
Тк = 2100 ⁰ К при $\alpha_T = 1,2$					
Рк	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Wa	1310	1503	1575	1635	1690

На рисунке 3.9 изображен график зависимости скорости истечения факела в зависимости от давления в камере сгорания при различных α_T .

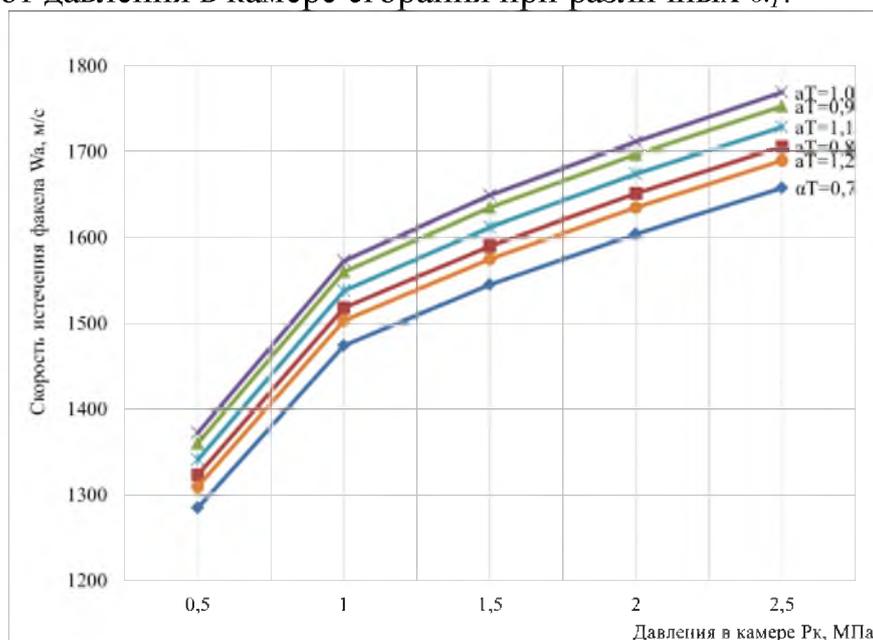


Рисунок 3.9 – График зависимости скорости истечения факела в зависимости от давления в камере сгорания $W_a=f(P_k)$ при различных α_T (топливо бензин+воздух)

Рассматривая изменение относительных параметров температуры сгорания T_k , температуры T_a и скорости газа W_a на срезе сопла при изменении α_T от 0,7 до 1,2 и давления P_k от 0,5 до 2,5 МПа, подсчитанных по уравнениям отметим следующее.

1. Температура газа в камере сгорания практически от α_T не зависит ($\alpha_T = 1,0 \div 1,01$).
2. Температура газа на срезе сопла с повышением α_T от 0,7 до 0,9 несколько увеличивается, а дальше до $\alpha_T = 1,0$ практически остается постоянной. С увеличением давления в камере сгорания темп роста температуры возрастает.
3. Скорость истечения газа из сопла меняется в незначительных пределах (1...4%).

Для горелок, применяемых при разрушении горных пород, скорость газа в конце камеры сгорания составляет около 100 м/сек.

Следует учитывать, что W_a и T_a получаются максимальными при $\alpha_T = 1$, поэтому оптимальным считают режим работы при $\alpha_T = 1 \dots 1,2$.

Воздушно-реактивные горелки обеспечивают получение газовых струй с параметрами, достаточными для термического разрушения крепких горных пород.

В конструкции термоинструмента, состоящей из базовой горелки и сверхзвукового насадка, факел горелки, при выходе из насадка, приобретает новые более мощные газодинамические параметры – температуру, скорость, давление, для оценки этих параметров проведем расчет насадка и его эжектора.

3.3 Интенсификация процесса горения в сверхзвуковом газодинамическом насадке

Интенсификация горения топливной смеси в бензовоздушных термоинструментах по предложенной схеме в цилиндрическом насадке, выполненном с перфорацией в области начального участка струи, то есть когда струя окончательно расширилась, рассмотрена в предположении создания на этом участке мощных скачков уплотнения. Скачки уплотнения формируются при встрече с преградой в цилиндрическом насадке (шероховатость поверхности, эжектируемый холодный воздух) при истечении сверхзвуковой газовой струи из сопла основной горелки.

Сверхзвуковая струя несет несгоревшие частицы топлива ($\alpha_T = 0,5...0,7$), которые, проходя через фронт ударной волны, сгорают с высокой скоростью, образуя новую высокоскоростную струю. За счет повышения химического потенциала газовой струи горелки значительно увеличивается суммарная энергетическая мощность горелки [96,97].

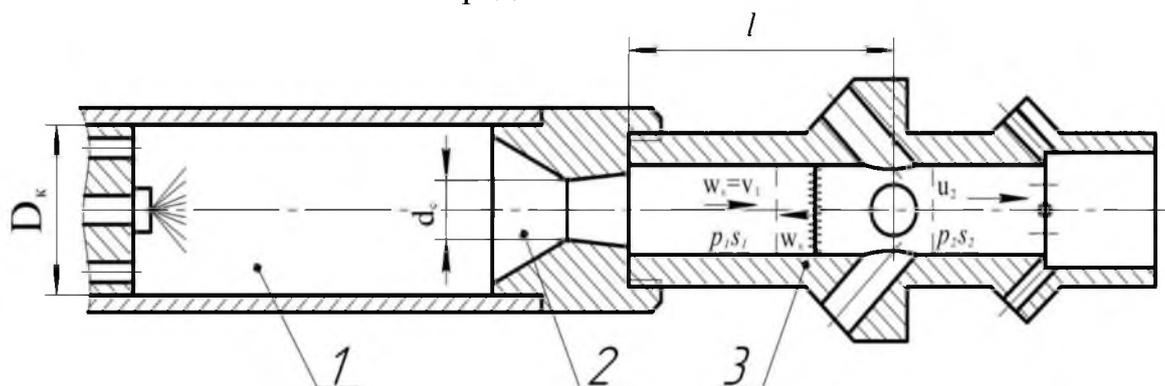
Превращение химической энергии в тепловую и одновременно в кинетическую происходит в цилиндрическом насадке – сопле, которое в данном случае является и камерой сгорания. В этой камере сгорания происходит гетерогенное горение (часть компонентов находятся в жидкой фазе, а другая – в газообразной фазе), то есть происходят химические и аэротермодинамические процессы в движущейся химически активной газовой среде. В этом случае объектом изучения горения может явиться течение газа за сильным скачком уплотнения. Своеобразным видом горения в данном случае является детонационное, характеризующееся чрезвычайно большими скоростями горения и большим местным повышением давления.

Модель процесса развития детонационной волны (скачка уплотнения) описана в отечественной и зарубежной литературе [98-104].

Рассмотрим свойства плоского ударного фронта, который широко используется в одномерных моделях детонационной волны. Общим для всех одномерных моделей является представление детонационной волны в виде комплекса, состоящего из ударного фронта и примыкающей к нему зоны реакции. Поэтому, прежде чем приступить к анализу ситуации, возникающей при подводе химической энергии к потоку за ударным фронтом, рассмотрим законы, определяющие свойства фронта стационарной ударной волны в нереагирующей среде.

Рассмотрим плоский фронт ударной волны, распространяющейся с постоянной скоростью W_s . Давление, плотность и скорость газа обозначим соответственно ρ , p и u . Чтобы упростить анализ, перейдем из лабораторной системы координат в систему координат, начальная точка которой закреплена на ударном фронте. Соответствующая картина течения показана на рисунке 3.10. Здесь газ втекает во фронт неподвижной ударной волны со скоростью W_s и оттекает от фронта со скоростью $u_2 = W_s - u'_2$, где u'_2 – скорость газа относительно покоящегося наблюдателя. Хотя процессы, происходящие в окрестности фронта ударной волны необратимы, поток газа, протекающий

через контрольные поверхности, строго подчиняется трем уравнениям сохранения механики сплошных сред.



1 – камера сгорания; 2 – сопло Лавалья; 3 – насадок

Рисунок 3.10 – Модель процесса возбуждения ударной волны в газодинамическом насадке

В интегральном виде после упрощения эти уравнения можно представить следующим образом [98,103]

$$\rho_1 W_s = \rho_2 u_2 \quad (\text{сохранение массы}); \quad (3.26)$$

$$p_1 + \rho_1 W_s^2 = p_2 + \rho_2 u_2^2 \quad (\text{сохранение количества движения}); \quad (3.27)$$

$$\rho W_s (h_1 + W_s^2/2) = \rho u_2 (h_2 + u_2^2/2) \quad (\text{сохранение энергии}), \quad (3.28)$$

где $h = e + pV$ – удельная энтальпия, e – внутренняя энергия и $V = 1/\rho$ – удельный объем. Кроме того, при типичных для детонации амплитудах ударных волн выполняется уравнение состояния идеального газа [100]:

$$p = \rho R T, \quad (3.29)$$

где R – газовая постоянная, T – температура.

Уравнения (3.26) - (3.29) содержат пять неизвестных величин: W_s , u_2 , ρ_2 , p_2 , T_2 . Поэтому все характеристики течения за ударным фронтом в области 2 можно выразить через скорость фронта и начальные параметры состояния газа.

Из уравнений (3.26) и (3.27) можно получить выражение для плотности потока массы, проходящего через ударный фронт:

$$(W_s \rho_1)^2 = (u_2 \rho_2)^2 = (p_2 - p_1) / (V_1 - V_2) \quad (3.30)$$

Уравнение (3.30) означает, что плотность потока массы, втекающего в ударный фронт, равна корню квадратному из взятого с обратным знаком тангенса угла наклона прямой линии в плоскости $p - v$, которая соединяет начальное (1) и конечное (2) состояния. Эти линии называются линиями Рэлея. Комбинируя уравнения (3.26) – (3.28), можно получить [101]:

$$h_2 - h_1 = (1/2)(p_2 - p_1)(V_1 + V_2)$$

или

$$e_2 - e_1 = (1/2)(p_2 + p_1)(V_1 - V_2). \quad (3.31)$$

Уравнение (3.31) называется соотношением Ренкина-Гюгонио.

Оно характеризует связь между начальным и конечным состояниями при заданном изменении энергии или энтальпии на ударном фронте. Другими словами, это аналог соотношений, характеризующих изэнтропические и адиабатические процессы [101]:

$$de = -pdV \text{ или } pV = const. \quad (3.32)$$

Комбинируя уравнения (3.26) – (3.29), можно выразить изменения давления, плотности и температуры на ударном фронте в зависимости от числа Маха ударной волны $M_s = W_s/a_1$, где a_1 – скорость звука в среде перед ударным фронтом:

$$p_2/p_1 = p_{21} = [2kM_s^2 - (k-1)] / (k+1); \quad (3.33)$$

$$\rho_2/\rho_1 = \rho_{21} = (k+1) M_s^2 / [(k-1) M_s^2 + 2]; \quad (3.34)$$

$$T_2/T_1 = T_{21} = - \frac{[kM_s^2 - (k-1)/2][1 + (k-1)M_s^2/2]}{[(k+1)M_s^2/2]}, \quad (3.35)$$

где $k = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты.

В случае горения топливной смеси в скачке уплотнения рассмотрим простейшую возможную модель детонации, представляющую плоский ударный фронт с энергоподводом q , приходящимся на единицу массы газа за фронтом. Схема такой волны приведена [102,103] в системе координат, в котором ударный фронт неподвижен. Следует подчеркнуть, что эта модель не претендует, по-видимому, на сколько-нибудь оправданное физическое описание детонации, а лишь позволяет выявить газодинамические аспекты процесса. В этой модели из уравнений сохранения, применимых к ударному фронту, требуется модифицировать лишь уравнение энергии (3.28), которое принимает следующий вид:

$$h_2 - h_1 - q = (1/2)(p_2 - p_1)(V_1 - V_2). \quad (3.36)$$

Для идеального газа с постоянной теплоемкостью уравнение (3.36) можно переписать в следующем виде [102]:

$$[k/(k-1)](p_2V_2 - p_1V_1) - q = (1/2)(p_2 - p_1)(V_1 + V_2). \quad (3.37)$$

Если конечные состояния, задаваемые уравнением Ренкина-Гюгонио, модифицированным применительно к случаю подвода энергии (уравнение

(3.37)), изобразить графически на плоскости $p - v$, используя q в качестве варьируемого параметра, то получится семейство гипербол. Две кривые этого семейства, соответствующие ударному фронту без химической реакции, т.е. значению $q = 0$, и конечному значению q , изображены на рисунке 3.11.

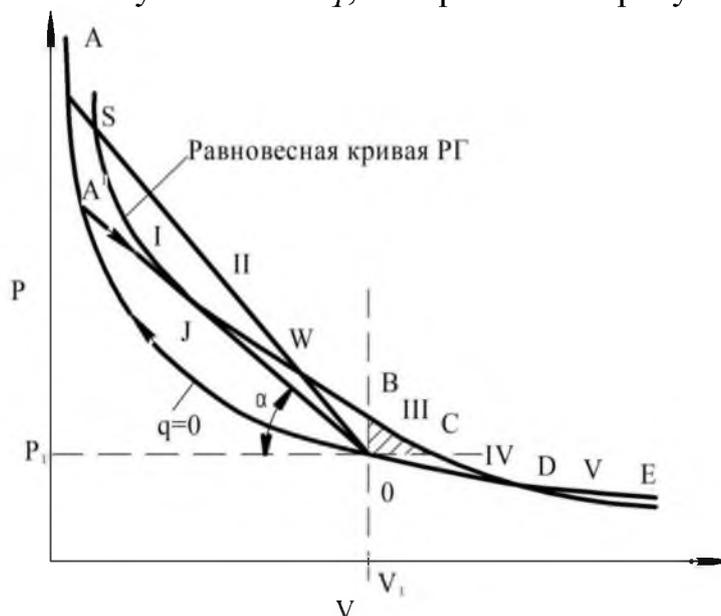


Рисунок 3.11 – Влияние подвода энергии q на кривые Ренкина–Гюгонио

Тангенс угла наклона касательной, проведенной из точки начального состояния 0 к точке J , определяет минимальную скорость фронта, удовлетворяющую законам сохранения. Именно в этой форме Чепмен впервые предложил свою гипотезу, из которой вместе с результатами исследования Жуге по единственности решения было выведено известное условие Чепмена-Жуге (т.е. равенство $a + u_2 = D$). Это условие означает, что для самоподдержания детонации требуется существование плоскости, которая параллельна ударному фронту и располагается позади него; в этой плоскости существует химическое равновесие и течение относительно фронта оказывается звуковым. Эта граница получила название плоскости Чепмена-Жуге. Дальнейшие расчеты площади и диаметра критического сечения сопла производим по ранее указанным формулам (3.10) и (3.16).

Расчет детонации для реальных газовых смесей существенно усложняется, так как зависит от T и, кроме того, необходимо учитывать условия химического равновесия отдельных компонентов. В самых простых методах расчета ограничиваются учетом изменения γ и приближенной оценкой равновесного состава.

Если уравнения сохранения вида (3.26) – (3.37) написать с учетом того, что в сечениях 1 и 2 термодинамические параметры, состав и молекулярный вес смеси различны, то уравнение детонационной адиабаты вместо 3.37 примет вид [102]

$$\frac{k_2 + 1}{k_2 - 1} p_2 V_2 - \frac{k_1 + 1}{k_1 - 1} p_1 V_1 - p_2 V_1 + p_1 V_2 = 2Q, \quad (3.38)$$

где Q – теплота реакции, приведенная к 0°K .

Скорость звука за сильным скачком уплотнения можно определить из формулы [103]

$$\frac{a_2^2}{V_2^2} = k_2 \frac{p_2}{V_2} = \frac{p_2 - p_1}{V_1 - V_2} = \frac{D^2}{V_1^2}. \quad (3.39)$$

Исключая из (3.38) и (3.39) p_2 и V_2 и учитывая, что $pV = Tc_v(k-1)$, найдем u_1 :

$$D = \sqrt{\frac{k_2 - 1}{2} [(k_2 + 1)Q + (k_1 + k_2)c_1 T_1]} + \sqrt{\frac{k_2 + 1}{2} [(k_2 - 1)Q + (k_1 - k_2)c_1 T_1]}. \quad (3.40)$$

Из (3.39) можно также получить

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{D^2 + p_1 V_1}{(k_2 + 1)p_1 V_1}, \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{k_2(D^2 + p_1 V_1)}{(k_2 + 1)D^2}. \quad (3.41)$$

Наконец, из уравнения состояния для сечения 2 получим

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{c_{v2}(k-1)}. \quad (3.42)$$

Для сильных скачков формулы (3.40) — (3.42) упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} D^2 &\approx 2(k_2^2 - 1)Q, & \frac{V_2}{V_1} &\approx \frac{k_2}{k_2 + 1}, \\ \frac{p_2}{p_1} &\approx \frac{k_1 M_1^2}{k_2 + 1}, & T_2 &\approx \frac{k_2}{k_2 + 1} \frac{Q}{c_{v2}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

Расчет удобнее всего вести методом последовательных приближений: задаваясь значениями T_2 и k_2 , определить p_2 , V_2 , T_2 первого приближения из (3.40 – 3.42). Затем по найденным значениям p_2 и T_2 вычислить равновесный состав в сечении 2 и найти первое приближение для k_2 и c_2 . Далее в случае, необходимости, приближения повторяются.

Подобным методом производились численные расчеты параметров детонации для самых различных горючих смесей.

3.4 Обоснование применения газовых эжекторов для повышения мощности бензовоздушных термоинструментов

Ранее нами дано обоснование явления образования мощных скачков уплотнения (детонационных волн) после ввода струи факела горелки в резко расширяющееся отверстие насадка. Далее, образованная новая струя встречаясь с шероховатостью насадка, инициирует создание отсоединённого мощного скачка уплотнения, движущего навстречу, обогащенным горючим, струи горелки.

Внутренние шероховатости поверхности насадка, образованные сверлениями эжекционных окон, для эжекции наружного атмосферного воздуха внутрь насадка, способствуют дополнительному сжиганию топливных компонентов в струе кислорода эжектируемого воздуха.

Сопла и диффузор эжектора ничем не отличаются от обычных сопел и диффузоров, расчет которых изложен [100]. При определении параметров эжектора существенны лишь коэффициенты сохранения полного давления газа в этих устройствах, позволяющие, по начальным давлениям смешивающихся газов, найти полные давления на срезе сопел p_1^* и p_2^* и по полному давлению смеси p_3^* – полное давление на выходе из диффузора p_4 . Эти коэффициенты выбираются по экспериментальным данным.

Основная задача при расчете эжектора заключается в определении параметров смеси газов на выходе из смесительной камеры по параметрам газов до смешения.

Параметры эжектирующего газа во входном сечении будем отмечать индексом 1, параметры эжектируемого газа – индексом 2, параметры смеси в выходном сечении – индексом 3. Будем считать заданными все параметры потоков во входном сечении камеры и построим решение таким образом, чтобы из уравнений сохранения массы, энергии и импульса потока определить температуру торможения, приведенную скорость и полное давление смеси газов в выходном сечении камеры [100].

Закон сохранения массы записываем в виде

$$G_3 = G_1 + G_2 \quad \text{или} \quad \frac{G_3}{G_1} = n + 1 \quad (3.44)$$

где $n = G_2/G_1$ – коэффициент эжекции.

На основании закона сохранения энергии имеем

$$G_3 \left(c_{p3} T_3 + \frac{w_3^2}{2} \right) = G_1 \left(c_{p1} T_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) + G_2 \left(c_{p2} T_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) + Q, \quad (3.45)$$

где Q – общее количество тепла, подводимое за 1 с к газу в смесительной камере путем теплопередачи через стенки камеры или выделяющееся вследствие химических реакций в потоке.

Переходя к параметрам торможения, получаем

$$G_3 c_{p3} T_3^* = G_1 c_{p1} T_1^* + G_2 c_{p2} T_2^* + Q, \quad (3.46)$$

т.е. суммарное теплосодержание смеси, отвечающее состоянию полного торможения, отличается от суммы полных теплосодержаний газов перед смешением лишь на количество тепла, подведенного в процессе смешения. Если пренебречь различием в теплоемкостях смешиваемых газов и смеси, то, разделив обе части уравнения (3.46) на $G_1 c_{p1} T_1^*$ и подставив в него соотношение (3.44), получим

$$(n+1) \frac{T_3^*}{T_1^*} = 1 + n \frac{T_2^*}{T_1^*} + \frac{Q}{c_p T_1^* G_1}. \quad (3.47)$$

Введем обозначения $\frac{T_2^*}{T_1^*} = \theta$, $\frac{Q}{c_p T_1^* G_1} = \nu$.

Тогда из последнего уравнения получаем

$$\frac{T_3^*}{T_1^*} = \frac{1 + n\theta + \nu}{n+1}, \quad (3.48)$$

где ν – отношение подведенного секундного количества тепла к теплосодержанию секундного расхода эжектирующего газа. При расчете обычных эжекторов принимаем $\nu = 0$ и получаем

$$\frac{T_3^*}{T_1^*} = \frac{n\theta + 1}{n+1}, \quad \frac{a_{kp3}}{a_{kp1}} = \sqrt{\frac{n\theta + 1}{n+1}} \quad (3.49)$$

Уравнения (3.48) или (3.49) позволяют по заданным величинам непосредственно определить первый искомый параметр смеси газов — температуру торможения (или критическую скорость звука) в выходном сечении смесительной камеры.

Уравнение количества движения записывается в виде [100]

$$G_3 w_3 - G_1 w_1 - G_2 w_2 = p_1 F_1 + p_2 F_2 - p_3 F_3,$$

или

$$G_3 w_3 - p_3 F_3 = G_1 w_1 + p_1 F_1 + G_2 w_2 - p_2 F_2, \quad (3.50)$$

где w – скорость, F – площадь.

Преобразуем это уравнение при помощи газодинамических функций. Заменим в (3.50) выражения импульсов согласно [100]:

$$Gw + pF = \frac{k+1}{2k} G a_{kp} z(\lambda) \quad (3.51)$$

Пренебрегая пока различием в величинах $\frac{k+1}{k}$ для газов и смеси, из (3.50) получим

$$G_3 a_{kp3} z(\lambda_3) = G_1 a_{kp1} z(\lambda_1) + G_2 a_{kp2} z(\lambda_2) \quad (3.52)$$

Используя уравнения (3.44) и (3.48), получим окончательно

$$\sqrt{(n+1)(1+n\theta+\nu)} z(\lambda_3) = z(\lambda_1) + n\sqrt{\theta} z(\lambda_2). \quad (3.53)$$

Это уравнение называют *основным уравнением эжекции*. По начальным параметрам газов и коэффициенту эжекции из него можно определить газодинамическую функцию $z(\lambda_3) = \lambda_3 + \frac{1}{\lambda_3}$ и приведенную скорость смеси λ_3 .

Для нахождения полного давления смеси p_3^* воспользуемся уравнением (3.44).

Заменив в (3.44) величины расхода газа G_3 и G_1 при помощи соотношения

$$G = m \frac{p^* F q(\lambda)}{\sqrt{T^*}}, \quad (3.54)$$

получим

$$\frac{p_3^*}{p_1^*} \sqrt{\frac{T_1^*}{T_3^*}} \frac{F_3}{F_1} \frac{q(\lambda_3)}{q(\lambda_1)} = n+1. \quad (3.55)$$

Здесь предполагается, что значение коэффициента m в (3.54), зависящее от k и R , одинаково для обоих газов и смеси. Заменим в этом уравнении отношение температур T_1^*/T_3^* согласно (3.48) и учтем, что при цилиндрической камере смешения $F_3 = F_1 + F_2$ или $\frac{F_3}{F_1} = 1 + \frac{1}{\alpha}$. Тогда получаем окончательно

$$\frac{p_3^*}{p_1^*} = \frac{\sqrt{(n+1)(1+n\theta+\nu)} q(\lambda_1)}{1 + \frac{1}{\alpha} q(\lambda_3)}. \quad (3.56)$$

Так как λ_3 известно из уравнения (3.53), то, определив из таблиц значение функции $q(\lambda_3)$, по уравнению (3.56) можно найти полное давление газа на выходе из камеры смешения p_3^* .

В уравнениях (3.48), (3.53) и (3.56), помимо параметров эжектирующего и эжектируемого газов перед смешением, фигурирует безразмерная величина n – коэффициент эжекции. Эта величина может быть выражена через параметры потоков во входном сечении камеры и не является, таким образом, независимой. Подставляя в выражение для коэффициента эжекции величины расходов смешивающихся газов, записанные при помощи соотношения (3.54) получаем

$$n = \frac{G_2}{G_1} = \frac{p_2^* F_2 q(\lambda_2) \sqrt{T_1^*}}{p_1^* F_1 q(\lambda_1) \sqrt{T_2^*}}, \quad (3.57)$$

или

$$n = \frac{1}{\Pi_0 \alpha \sqrt{\theta}} \frac{q(\lambda_2)}{q(\lambda_1)}. \quad (3.58)$$

Соотношение (3.58) связывает коэффициент эжекции n с геометрическим параметром эжектора α и параметрами газов на входе в камеру. Полученные уравнения (3.48), (3.53) и (3.56) вместе с соотношением (3.58) достаточны для определения состояния потока в выходном сечении по заданным начальным параметрам потоков и коэффициенту эжекции (или геометрическому параметру α).

При сверхзвуковой скорости потока на выходе из смесительной камеры эжектор может работать на данном режиме при любой степени расширения диффузора f . Соответственно изменению степени расширения диффузора изменяется скорость потока в выходном сечении и перемещается скачок (или система скачков) уплотнения, возникающий в диффузоре из-за перерасширения потока. Скачки уплотнения перестраиваются таким образом, что суммарное изменение давления на участке перерасширения, в скачках и, при торможении дозвукового потока после скачка, обеспечивает получение в выходном сечении статического давления P_4 , при этом суммарные потери полного давления оцениваются значением коэффициента σ_d , найденным, как указывалось, из соотношений

$$y(\lambda_4) = \frac{1}{f} \frac{P_3^*}{P_4} q(\lambda_3), \quad (3.59)$$

$$P_4^* = \frac{P_4}{\pi(\lambda_4)} \quad (3.60)$$

$$P_4^* = \sigma_o P_3^*. \quad (3.61)$$

Если давление P_4 достаточно низко, то поток на выходе из диффузора, представляющего в этом случае расширяющуюся часть сопла Лавалья, может быть сверхзвуковым.

Далее необходимо выполнить расчет температуры теплового потока внутри насадка или температуру внутренней стенки насадка. Для определения температуры теплового потока внутри насадка необходимо выполнить обратную задачу теплопроводности через цилиндрическую стенку, что незначительно отличается по определению температуры при одной и той же толщине стенки цилиндрической и плоской.

Для определения температуры газового потока внутри насадка, по температурной оценке металла по его цвету, определяем температуру наружной стенки насадка и затем, решая уравнение теплопроводности, находим температуру внутренней стенки насадка или температуру газового потока в насадке.

3.5 Расчет передачи теплового потока через стенку эжекционного насадка

При установившемся, или стационарном, тепловом режиме температура тела во времени остается постоянной, т.е. $\partial t / \partial \tau = 0$.

При этом дифференциальное уравнение теплопроводности будет иметь вид [105]:

$$a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_p} = 0 \quad \text{или} \quad \nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (3.62)$$

Если внутренние источники теплоты отсутствуют ($q_v = 0$), то уравнение (3.62) упростится и примет вид:

$$\nabla^2 t = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (3.63)$$

Рассматриваем теплопроводность в телах простейшей геометрической формы. При этом случаи, когда внутренние источники теплоты отсутствуют ($q_v = 0$) и когда они имеются ($q_v \neq 0$), рассматриваются отдельно. Первым объектом рассмотрения является передача теплоты через плоскую стенку при $q_v \neq 0$.

в) Граничные условия второго и третьего рода

Рассмотрим случай, когда при передаче теплоты через однородную и изотропную стенку на одной ее поверхности заданы граничные условия второго рода в виде $q_c = const$ (при $x = 0$); на другой поверхности заданы коэффициент теплоотдачи α_2 и температура окружающей среды $t_{жс2}$, т.е. граничные условия третьего рода (рисунок 3.12). Внутренние источники в стенке отсутствуют ($q_c = 0$).

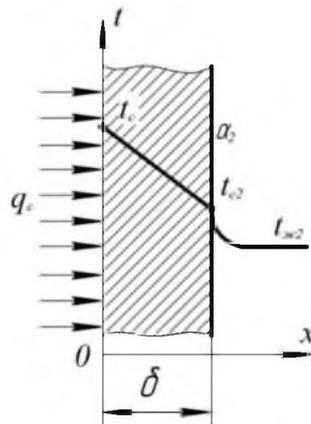


Рисунок 3.12 – Передача теплоты через плоскую стенку (смешанные граничные условия)

Такая задача сводится к нахождению распределения температуры в стенке и температуры на ее поверхности. В силу стационарности теплового режима можно записать следующие уравнения:

$$q_c = (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\lambda}{\delta}; \quad q_c = \alpha_2 (t_{c2} - t_{жс2}). \quad (3.64)$$

Из уравнений (3.64) следует, что при заданном значении q_c

$$t_{c2} = t_{жс2} + q_c \frac{1}{\alpha_2}; \quad t_{c1} = t_{жс2} + q_c \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} \right) \quad (3.65)$$

Находим из формулы (3.64) температуру внутри эжекционного насадка:

$$t_{c1} = \frac{q_c \delta + \lambda t_{c2}}{\lambda}$$

где λ – коэффициент теплопроводности для металла, $\lambda = 35$ Вт/мК,

δ – толщина насадки, $\delta = 5$ мм = 0,005 м.

q_c – тепловой поток, берем данные из таблицы 3.3

t_{c2} – температура нагрева наружной поверхности насадка.

В соответствии с рисунком 3.13 а), б) находим температуру нагрева наружной поверхности насадка термоинструмента по его цвету металла, которая равна $T_n = 1100...1200^{\circ}\text{C}$ ($1373...1473^{\circ}\text{K}$).



а)

°C	°F	Color
1300	2370	Yellow
1200	2190	Light Orange
1100	2010	Orange
1000	1830	Dark Orange
950	1740	Red-Orange
900	1650	Red
850	1560	Dark Red
810	1490	Red
780	1440	Dark Red
740	1360	Red
680	1260	Dark Red
630	1170	Red
550	1020	Dark Red

б)

а – процесс поверхностной обработки горелки с газодинамическим насадком;
б – шкала оценки температуры металла насадка по его цвету

Рисунок 3.13 – Сравнительный анализ температуры нагрева поверхности насадка термоинструмента по оценке температуры нагрева металла по его цвету

По формуле (3.64) определяем температуру нагрева внутренней поверхности насадка, в зоне интенсивного горения топливных компонентов $t_{c1} = 1854^{\circ}\text{K}$.

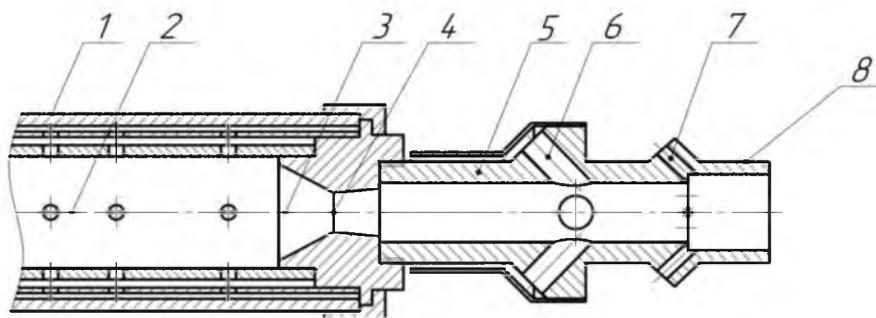
Учитывая прирост температуры сверхзвукового рабочего газового потока, за счет тепла горения несгоревшего топлива, но имеющего высокую температуру (2000°C) и его потери на нагрев металла насадки, принимаем температуру смешанного потока газа $T_n = 2000^{\circ}\text{C}$.

3.6 Обоснование и расчет геометрических параметров новой конструкции бензовоздушного термоинструмента с эжекционным насадком

Для эжектирования атмосферного воздуха в насадок производим расчет кинематических и конструктивных параметров эжектора.

Для повышения энергетических параметров газоструйного термоинструмента предлагается новая конструкция рабочего органа с газоструйным эжектором и диффузором – специальной насадкой для эжектирования атмосферного воздуха).

На рисунках 3.14 и 3.15 представлены термодинамический рабочий орган с эжекционной насадкой и 3D модель насадка.



- 1 – корпус горелки; 2 – рабочая камера сгорания углеводородных топлив;
3 – сопла Лавалья; 4 – критическое сечение сопла Лавалья; 5 – насадка;
6, 7 – эжекционные окна, 8 – выходное сопло

Рисунок 3.14 – Термодинамический рабочий орган с эжекционной насадкой



Рисунок 3.15 – 3D модель насадка

Зависимости для расчета достижимых параметров и оптимального отношения сечений газоструйных эжекторов могут быть выведены на основе уравнений характеристики этих аппаратов [106].

Для определения достижимого давления сжатия и давления во входном сечении камеры смешения необходимо рассчитать все основные геометрические размеры и построить характеристику газоструйного эжектора с диффузором. Эжектируемой средой является воздух. Рабочей средой является продукты сгорания топливной смеси в камере сгорания термоинструмента (воздух, керосин, бензин, дизельное топливо).

Исходными данными для расчетов являются следующие параметры:

$$p_p = 5 \text{ ат} = 506625 \text{ н/м}^2; \quad p_n = 0,9 \text{ ат} = 91192,5 \text{ н/м}^2; \quad T_p = 2300^\circ \text{ К};$$

$$T_n = 300^\circ \text{ К} \quad - \quad \text{экспериментальные данные}; \quad k_p = 1,4; \quad R = 287 \text{ дж/кг} \cdot \text{град};$$

$$P_{pn} = \frac{p_n}{p_p} = 0,18; \quad \lambda_{pn} = 1,14; \quad q_{pn} = 0,702; \quad \varepsilon_{pn} = 0,193 \quad - \quad \text{табличные данные для воздуха.}$$

Здесь p_p – давление рабочего потока;

p_n – давление эжектируемого потока;

T_p – температура рабочего потока;

T_n – температура эжектируемого потока;

k_p – показатель адиабаты рабочего газа;

R – газовая постоянная воздуха;

P_{pn} – давление рабочего потока;

λ_{pn} – приведенная изоэнтропная скорость;

q_{pn} – приведенная массовая скорость;

ε_{pn} – относительная плотность.

G_c – расчетная производительность эжектора

G_p – расход рабочего потока

G_H – расход эжектируемого потока

u – коэффициент эжекции

Расчетная производительность эжектора

$$G_c = G_p + G_H$$

$$G_c = 0,4368 \text{ кг/сек.}$$

Расход рабочего потока определяется по формуле (расход бензина 17 л/час и воздуха 5 м³/мин)

$$G_p = \frac{G_c}{1+u} = \frac{0,4368}{1+3} = 0,1092 \text{ кг/сек},$$

где u – коэффициент эжекции, принятый равным 3.

Расход эжектируемого потока

$$G_H = u \cdot G_p = 3 \times 0,1092 = 0,3276 \text{ кг/сек.}$$

При одинаковых газовых постоянных и теплоемкостях рабочего и эжектируемого потоков отношения $\frac{v_c}{v_p}$ и $\frac{v_n}{v_p}$ определяются по формулам

$$\frac{v_n}{v_p} = \frac{p_p}{p_n} \frac{T_n}{T_p} = \frac{5 \cdot 2000}{0,9 \cdot 2300} = 4,83$$

Температура смешанного потока определяется

$$T_c = \frac{T_p + uT_H}{1-u} = \frac{2300 + 3 \cdot 1854}{1+3} = \frac{7862}{4} = 1965 \approx 2000^\circ K$$

Поскольку предельное противодавление потока p_p заранее не известно, то задаемся предварительно $p_c = 1,1 \cdot p_H = 1,1 \cdot 0,9 = 0,99$. Тогда

$$\frac{v_c}{v_p} = \frac{p_p}{p_c} \frac{T_c}{T_p} = \frac{5 \cdot 2075^\circ}{0,99 \cdot 2300^\circ} = \frac{10375}{2277} = 4,55.$$

Определяем оптимальное значение $\left(\frac{f_3}{f_{p^*}}\right)_{opt}$ по формуле

$$\left(\frac{f_3}{f_{p^*}}\right)_{opt} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{11,79 + \sqrt{11,79^2 - 4 \cdot 0,48 \cdot 22,01}}{0,96} = \frac{11,79 + 9,83}{0,96} = 22,52$$

где $a = \varphi_1 \varphi_2 q_{pH}$;

$$b = -\left\{ \varphi_1 \varphi_2 + 2\varepsilon_{pH} \left[\left(\frac{1}{\varphi_3} - 0,5 \right) \frac{v_c}{v_p} (1+u)^2 - (\varphi_2 \varphi_4 + 0,5) \frac{v_H}{v_p} u^2 \right] \right\};$$

$$c = 2 \frac{\varepsilon_{pH}}{q_{pH}} \left(\frac{1}{\varphi_3} - 0,5 \right) \frac{v_c}{v_p} (1+u)^2;$$

$\varphi_1 = 0,95$, $\varphi_2 = 0,975$, $\varphi_3 = 0,9$, $\varphi_4 = 0,925$ – коэффициенты скорости потока рабочего сопла, диффузора, входного и выходного участков камеры, установленные на основе экспериментов.

Или, подставляя, получим

$$a = 0,48;$$

$$b = -\left\{ 0,95 \cdot 0,975 + 2 \cdot 0,193 \left[\left(\frac{1}{0,9} - 0,5 \right) 4,55(1+3)^2 - (0,975 \cdot 0,925 + 0,5) \cdot 4,83 \cdot 9 \right] \right\} =$$

$$= -\{0,92625 + 0,386(32,76 - 60,93)\} = -0,92625 - 10,87 = -11,79$$

$$c = 2 \frac{0,193}{0,702} \left(\frac{1}{0,9} - 0,5 \right) 4,55 \cdot 16 = 22,01.$$

Определяем отношение сечений

$$n = \frac{f_3}{f_{H2}} = \frac{f_3}{f_{p1} - 1} = \frac{22,52}{22,52 - \frac{1}{0,702}} = \frac{22,52}{22,52 - 1,42} = \frac{22,52}{21,1} = 1,06,$$

где f_3 – выходное сечение камеры смешения;

$$f_{p1} = \frac{G_p a p^*}{k_p \Pi_{p^*} P_p q P_H} \text{ – выходное сечение сопла.}$$

Достижимое давление сжатия определяется по формуле

$$\frac{\Delta p_c}{p_n} = \frac{k_p}{2(k_p + 1)} \frac{1}{\Pi_{p_n}} \frac{\varphi_1^2 \varphi_2^2 \lambda_{p_n}^2}{\left[\left(\frac{1}{\varphi_3} - 0,5 \right) \frac{v_c}{v_p} (1+u)^2 - (\varphi_2 \varphi_4 + 0,5) \frac{v_n}{v_p} m^2 \right]} =$$

$$= \frac{1,6}{2 \cdot 2,6} \cdot \frac{1}{0,18} \cdot \frac{(0,95 \cdot 0,975 \cdot 1,14)^2}{\left[\left(\frac{1}{0,9} - 0,5 \right) 4,55 \cdot 4^2 - (0,975 \cdot 0,925 + 0,5) 4,83 \cdot 1,06 \cdot 3^2 \right]} = \frac{1,6 \cdot 1,1025}{0,936 \cdot 24,55} = 0,076.$$

$$\frac{p_c}{p_n} = 1,076 \text{ или } p_c = 1,076 \cdot 5 \text{ ат} = 5,38 \text{ ат} = 545128,5 \text{ н/м}^2.$$

Определяем давление эжектируемого потока во входном сечении камеры смешения

$$\frac{\Delta p_k}{p_n} = \frac{0,5 k_p \varepsilon_{p^*} \Pi_{p^*} \frac{v_n}{v_p}}{\varphi_4^2 \Pi_{p_n} \left(\frac{f_3}{f_{p^*}} - \frac{1}{q_{p1}} \right)^2} u^2 = \frac{0,5 \cdot 1,6 \cdot 0,656 \cdot 0,505 \cdot 4,83}{0,925^2 \cdot 0,18 \left(22,52 - \frac{1}{0,702} \right)^2} \cdot 3^2 = \frac{11,52}{68,56} = 0,168$$

так как

$$\varepsilon_{p^*} = \frac{\rho^*}{\rho_o} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{2}{1,6+1} \right)^{\frac{1}{0,6}} = 0,769^{1,6} = 0,656 - \text{относительная плотность}$$

рабочего потока;

$$\Pi_{p^*} = \frac{p^*}{p_o} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{2}{2,6} \right)^{\frac{1,6}{0,6}} = 0,769^{2,6} = 0,505 - \text{относительное давление}$$

рабочего потока;

$$\frac{p_2}{p_n} = 1 - \frac{\Delta p_k}{p_n} = 1 - 0,168 = 0,832;$$

$$p_2 = 0,832 \cdot 5 = 4,16 \text{ ат} = 421512 \text{ н/м}^2.$$

Рассчитываем характеристику выбранного эжектора по формуле

$$\frac{f_{p1}}{f_3} = \frac{f_{p1}}{f_{p^*}} \frac{f_{p^*}}{f_3} = \frac{1}{q_{p_n}} \frac{f_{p^*}}{f_3} = \frac{1}{0,702} \times \frac{1}{22,52} = \frac{1}{15,8} = 0,063;$$

При коэффициенте эжекции $u=3$ наибольший перепад давлений Δp_c

$$\frac{f_{p^*}^2}{f_3 f_{n2}} = \frac{f_{p^*}}{f_3} \frac{f_{p^*}}{f_3 - f_{p1}} = \frac{f_{p^*}}{f_3} \frac{\frac{f_{p^*}}{f_3}}{1 - \frac{f_{p1}}{f_3}} = \frac{1}{22,52} \frac{\frac{1}{22,52}}{1 - 0,63} = \frac{0,044}{21,1} = 0,002085 \text{ создает эжектор с}$$

оптимальным отношением $\frac{f_3}{f_{p^*}} = 22,52$.

Критическая скорость рабочего потока

$$a_{p^*} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1}} \sqrt{RT_0} = \sqrt{2 \frac{1,6}{1,6+1}} \sqrt{287 \cdot 2300} = 901 \text{ м/сек.}$$

Критическое сечение рабочего сопла определяется по формуле

Принимаем данные из расчета:

$$P_p = 5 \text{ ат} = 506625 \text{ н/м}^2, W = 1285 \text{ м/с}, T = 2000^0 \text{ К}$$

$$f_{p^*} = \frac{G_p \cdot a_{p^*}}{k_p \cdot \Pi_{p^*} \cdot p_p} = \frac{0,1092 \cdot 1285}{1,6 \cdot 0,505 \cdot 506625} = 0,000342 \text{ м}^2.$$

$$d_{p^*} = 1,13 \sqrt{f_{p^*}} = 1,13 \sqrt{342} = 1,13 \cdot 18,4 = 20,7 \text{ мм} \approx 20 \text{ мм}$$

Выходное сечение сопла

$$f_{p1} = \frac{f_{p^*}}{q_{pH}} = \frac{342}{0,702} = 487,17 \text{ мм}^2.$$

$$d_1 = 1,13 \sqrt{f_{p1}} = 1,13 \sqrt{487,18} = 1,13 \cdot 22 = 24,8 \text{ мм} \approx 24 \text{ мм}$$

Длина свободной струи

$$l_{c1} = \frac{0,37 + 3}{4,4 \cdot a} d_1 = \frac{0,37 + 3}{4,4 \cdot 0,07} 24 = 262,5 \text{ мм},$$

где a – опытная константа [0,07...0,09]

Диаметр свободной струи на расстоянии $l_{c1} = 262,5 \text{ мм}$

$$d_4 = 1,55 d_1 (1 + u) = 1,55 \times 24 (1 + 3) = 148,8 \text{ мм}.$$

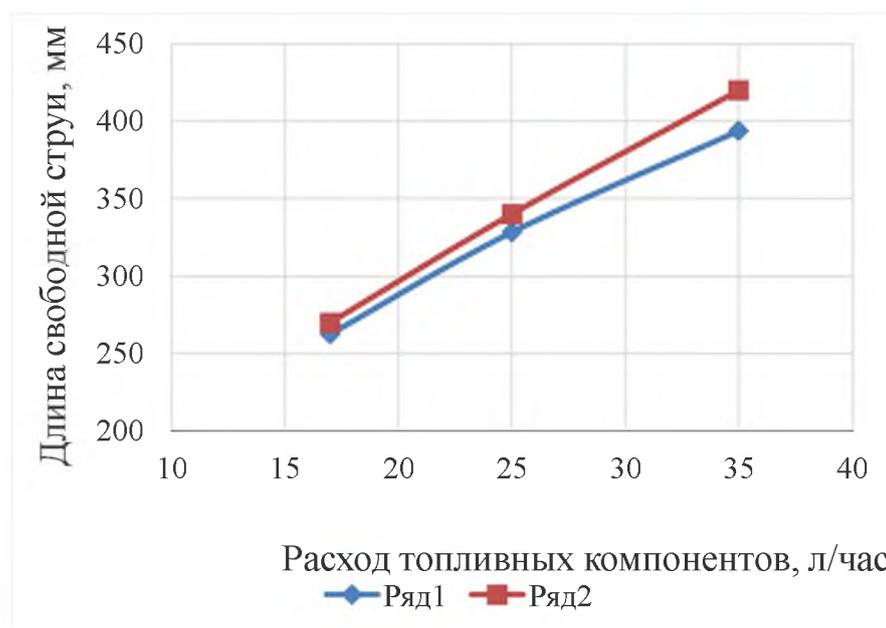
Таким образом, определены основные параметры достижимого давления сжатия и давления во входном сечении камеры смешения, а также основные геометрические размеры газоструйного эжектора с диффузором – специальной насадкой для эжектирования воздуха.

Расчет режимных и конструктивных параметров термоинструментов с насадкой для расходов топливных компонентов 25...35 л/час выполняется аналогично (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Расчетные данные режимных и конструктивных параметров термоинструментов с насадкой для расходов топливных компонентов 17, 25, 35 л/час горючего

Режимные и конструктивные параметры	17л/час, воздух 6 м ³ /мин	25л/час, воздух 9 м ³ /мин	35л/час, воздух 12 м ³ /мин
Расчетная производительность эжектора, G_c , кг/сек	0,4368	0,684	0,9428
Расход рабочего потока G_p	0,1092	0,171	0,2357
Расход эжектируемого потока G_H	0,3276	0,513	0,7071
Критическое сечение насадки, d_{p^*}	20	22	26
Выходное сечение сопла насадки, d_1	24	30	36
Длина свободной струи, l_{c1}	262,5	328,24	393,8
Диаметр свободной струи, d_2	148,8	186	223,2

На рисунке 3.16 представлен график изменения дальности струи горелки с газодинамическим насадком в зависимости от расходных характеристик топливных компонентов.



1 – теоретические, 2 – экспериментальные данные

Рисунок 3.16 – График изменения дальности струи горелки с газодинамическим насадком в зависимости от расходных характеристик топливных компонентов

Большой объем добываемых в странах СНГ гранитных блоков идет под дальнейшую разделку – распиловку на облицовочные плиты и теску. Однако производительность изготовления тесаных изделий зависит от качества добываемых блоков и разделки их на заготовки. ГОСТом 9479-84 предусмотрены отклонения (неровности) граней блоков в пределах 100 мм, но есть целый ряд месторождений гранита, при разработке которых добыть блок требуемых размеров чрезвычайно затруднительно, при этом много труда и средств стоит довести его до кондиционных размеров, поэтому необходимо использование термоинструментов для выполнения этих работ [106], причем конструкции термоинструментов должна быть выполнена в виде рабочих органов манипуляционных устройств.

В практике применения манипуляционных устройств имеет смысл рассмотреть существующие конструкции роботов – манипуляторов, выпускаемых промышленностью – промышленные роботы манипуляторы.

3.7 Методика определения кинематических параметров манипулятора для поверхностной огнеструйной обработки гранитных блоков методом крупного скола

Ранее рассматривался метод послойного снятия припусков под обработку, при этой схеме обработки факел протекал параллельно поверхности заготовки. Высота снимаемых припусков ограничивается радиусом газового потока и составляет 0,012...0,015 м. При снятии припусков заготовок высотой порядка 0,04...0,07 м и более представляет практический интерес разработка метода разрушения горной породы крупным сколом. Для практического решения

вопроса ведения процесса обработки методом крупного скола необходимо теоретическое обоснование этого метода [15, 83].

Известен способ ведения процесса разрушения газовой струей ракетной горелки методом крупного скола. Сущность этого метода состоит в прохождении ряда параллельных борозд на поверхности обработки и дальнейшем прогреве образовавшихся выступов до их полного отделения.

Для пассивации крупных блоков методом крупного скола с большими отклонениями неровностей поверхности, целесообразно применения простых манипуляторов, оснащенных огнеструйными термоинструментами, позволяющих осуществлять движения в горизонтальной и вертикальной плоскостях [108].

На рисунке 3.17 представлен фрагмент блока обработанного методом крупного скола (проходка бороздковых канавок).

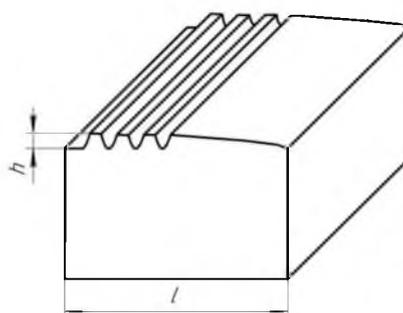


Рисунок 3.17 – Фрагмент обработки крупных блоков огнеструйным термоинструментом методом крупного скола. h – высота неровности блока после его откола от массива, l – ширина блока

Модель разрушаемого слоя представляет полосу толщиной, определяемой глубиной проникновения тепла z в рассматриваемый момент времени (рисунок 3.18).

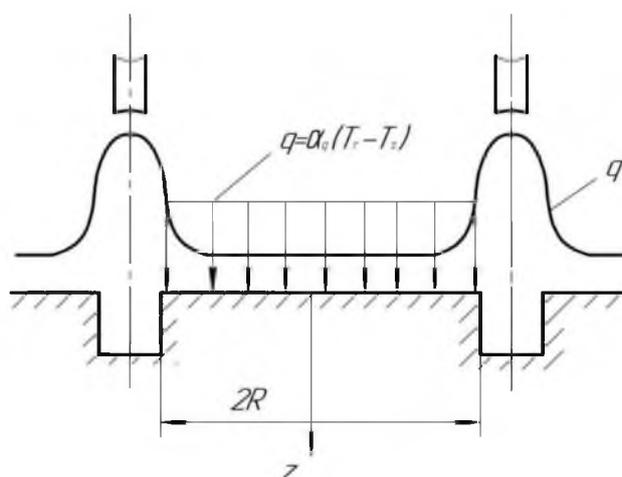


Рисунок 3.18 – Модель разрушаемого слоя

Внешние связи учитываются жесткой заделкой по основанию для отыскания напряжений в полосе воспользуемся системой уравнений [109]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= [a_n ch(kx) - b_n kxsh(kx)] \frac{E\alpha T \cos(kz)}{1-\mu} \\ \sigma_z &= \{a_n ch(kx) - b_n [2ch(kx) + kxsh(kx)]\} \frac{E\alpha T \sin(kz)}{1-\mu} \\ \tau_{xz} &= -\{a_n sh(kx) - b_n [2sh(kx) + kxch(kx)]\} \frac{E\alpha T \sin(kz)}{1-\mu} \end{aligned} \right\} \quad (3.66)$$

где $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ – нормальные и касательные напряжения в прогретом слое, Н/м²,
 a_n, b_n – постоянные; E – модуль упругости, МН/м²;

α – коэффициент теплопередачи Вт/(м² К);

μ – коэффициент Пуассона, Дж/кг·К;

T – температура поверхности нагрева, К.

Прилагая к боковой поверхности полосы равные и противоположно направленные напряжения, равные

$$\sigma_x = \frac{\alpha ET \cos kz}{1-\mu} \quad (3.67)$$

освобождаем боковую поверхность от нагрузки (рисунок 3.19), выражение (3.69) примет вид

$$\sigma_x = \frac{\alpha ET \cos(kz)k^2}{1-\mu} [1 - a_n ch(kx) - b_n kxsh(kx)]. \quad (3.68)$$



Рисунок 3.19 – Модель напряженного равновесного состояния прогретого слоя

Уравнения для σ_z и τ_{xz} останутся без изменений.

Окончательно напряжения в полосе, заделанной по основанию и свободной от нагрузки по боковой поверхности, выразятся:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= k^2 [1 - a_n ch(kx) - b_n kxsh(kx)] \frac{E\alpha T \cos(kz)}{1-\mu} \\ \sigma_z &= k^2 \{a_n ch(kx) - b_n [2ch(kx) + kxsh(kx)]\} \frac{E\alpha T \sin(kz)}{1-\mu} \\ \tau_{xz} &= k^2 \{a_n sh(kx) - b_n [2sh(kx) + kxch(kx)]\} \frac{E\alpha T \sin(kz)}{1-\mu} \end{aligned} \right\} \quad (3.69)$$

Для нахождения разрушающих напряжений в основании прогретого слоя необходимо найти напряжения σ_x , σ_z и τ_{xz} вычислением на ЭВМ при различных геометрических размерах прогретого выступа по ширине $2R=0,04; 0,10; 0,20; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50$ м и толщине $z=0,02; 0,06; 0,08; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30$ м и найти их рациональные размеры [17].

Для решения технологии снятия больших припусков поверхности блоков, полученных при откола из массива горной породы, целесообразно проведения небольших борозд и выкола промежуточных выступов между ними, за счет развития в их основания разрушающих напряжений или механического удара по напряженному, ослабленному выступу. На рисунке 3.20 приведен график зависимости напряжений в прогретом слое от соотношения z/R .

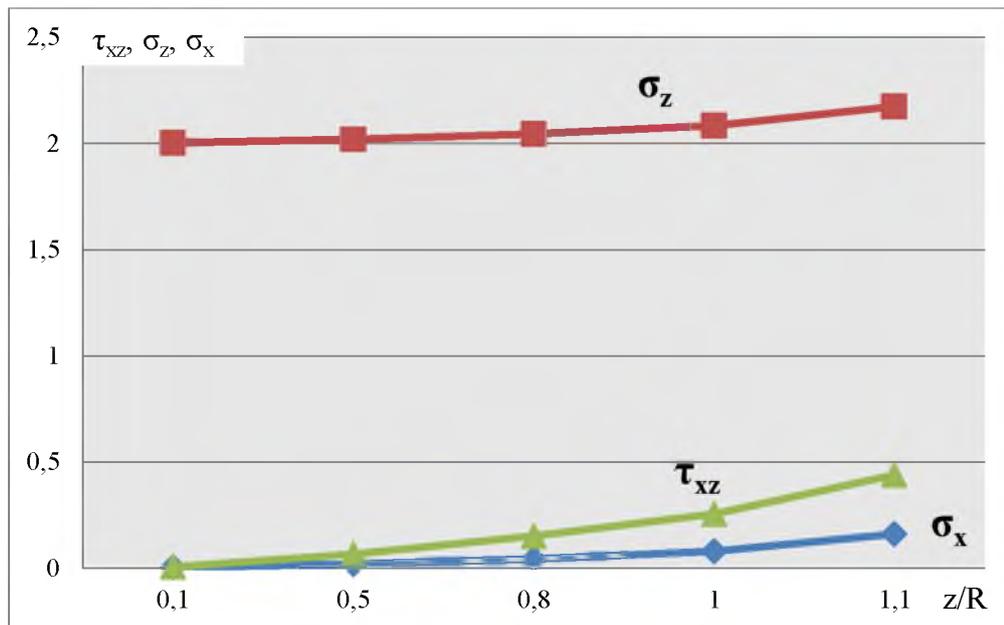


Рисунок 3.20 – График зависимости напряжений в прогретом слое от соотношения z/R

Из графика 3.20 видно, что нормальные напряжения на растяжения σ_z в основании прогретом выступе значительно выше σ_x , τ_{xz} .

В результате исследования установлены зависимости условия разрушения:

1) от максимальных касательных напряжений:

$$C\left(\frac{z}{R}\right) \frac{E\alpha T_s}{1-\mu} \leq [\tau_{\text{сдв}}] \text{ или } \tau_{xz} > [\tau_{xz}] \quad (3.70)$$

2) от нормальных растягивающих напряжений:

$$B\left(\frac{z}{R}\right) \frac{E\alpha T_s}{1-\mu} \leq [\sigma_p] \text{ или } \sigma_z \geq [\sigma_z] \quad (3.71)$$

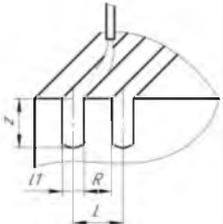
Зависимость глубины резания от скорости перемещения газового потока горелкой БВР-60М представлена в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Таблица технологических параметров резки щелевых выработок

Гранит	Глубина резания в мм от подачи горелки м/мин					
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Курдайский	100	80	70	60	50	35
Куртинский	85	60	40	35	30	20

Обработка при крупном сколе осуществлялась бензовоздушным термоинструментом БВР-60М с эжекционной насадкой. Производительность пассивки блоков осуществлялась при скорости перемещения горелки вдоль поверхности блока со скоростью $V_{np} = 0,5, 1,0, 1,5$ см/с, при этом образовывалась щелевая выработка глубиной 0,05...0,07 м и шириной 0,07 м. Ширина перемычки составляла 0,04...0,06 м (Приложение Б). Ниже в таблице 3.7 приведены данные крупного скола (Куртинский гранит).

Таблица 3.7 – Опытные данные крупного скола (Куртинский гранит)

Наименование работ	Скорость V_{np} , см/с	Расстояние между канавками L , мм	Ширина канавки l_1 , мм	Глубина канавки z , мм	Ширина перемычки R , мм	Массовый сбой, см ³ /мин
Грубая обработка	-	-	-	-	-	2000...2500
Нарезка канавок 	0,5	130	70	70	60	3500...4000
	1,0	110	60	35	50	
	1,5	90	50	30	40	
	Чистовая теска	-	-	-	-	

Для реализации этой технологии необходимо применения манипуляционных устройств – роботов.

В Проблемной лаборатории новых физических методов разрушения горных пород были предприняты попытки создания манипуляционного устройства, оснащенного керосино-кислородным рабочим органом.

Проводились испытания манипулятора с керосино-кислородным рабочим органом на Алматинском заводе по обработке камня [6,15].

На рисунке 3.21 показан процесс проведение борозды для снятия большого припуска методом крупного скола. После отрыва выступа происходит дальнейшее углубление борозды и отделение вновь образовавшегося выступа.

При формировании выступа происходит частичное разрушение его шелушением.



Рисунок 3.21 – Прорезание канавок при грубой обработке

В существующих условиях добычи гранитных блоков, мы используем бензовоздушные термоинструменты вместо проблемных керосино-кислородных, требующих наличие кислорододобывающих станций и систем подачи кислорода к рабочим органам.

Поэтому применения манипуляционных устройств на базе промышленных роботов, оснащенных бензовоздушными рабочими органами, является актуальной задачей.

На рисунке 3.22 представлена структурная схема экспериментального манипулятора четырехзвенного робота типа ПППВ.

Для осуществления перечисленных операций необходимо и достаточно применить робот-манипулятор с четырьмя степенями свободы типа ПППВ, т.е. с тремя ортогональными поступательными парами и одной вращательной.

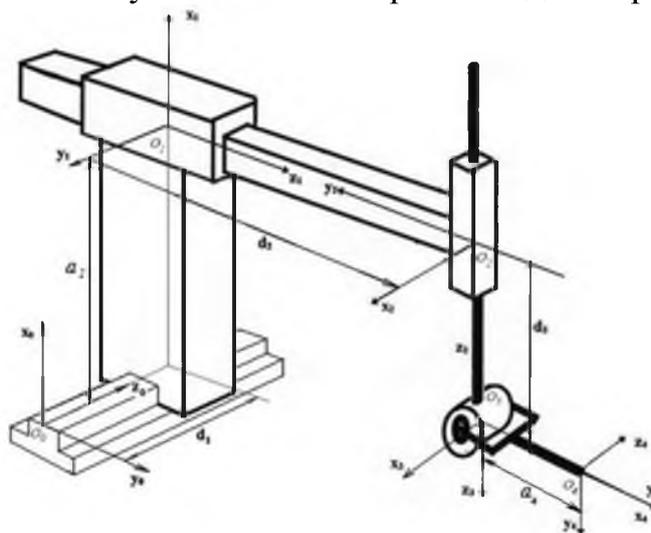


Рисунок 3.22 – Структурная схема экспериментального манипулятора четырехзвенного робота типа ПППВ

Для описания вращательных и поступательных связей между соседними звеньями Денавит и Хартенберг предложил матричный метод последовательного построения систем координат, связанных с каждым звеном кинематической цепи. Смысл представления состоит в формировании однородной матрицы преобразования, имеющей размерность 4×4 и описывающей положение системы координат каждого звена относительно системы координат предыдущего звена. Это дает возможность последовательно преобразовать координаты рабочей точки манипулятора из системы отсчета, связанной с последним звеном, в базовую систему отсчета [6,110].

Каждая система координат формируется на основе следующих правил:

1. Ось координат z_i направлена вдоль оси перемещения или вращения $(i+1)$ -го сочленения;
2. Ось x_i перпендикулярна осям z_i и z_{i-1} , и направлена от оси z_{i-1} (так, чтобы образовать правостороннюю систему координат либо с z_{i-1} и z_i , либо z_i и z_{i-1});
3. Ось координат y_i выбирается так, чтобы система координат $x_i y_i z_i$ была правосторонней;
4. Расстояние между двумя общими перпендикулярами a_{i-1} и a_i называется звенным расстоянием d_i ;
5. Длина перпендикуляра a_i является минимальным расстоянием между осями z_i и z_{i-1} . Если оно равно нулю, то направление вектора a_i становится произвольным;
6. Ориентация оси x_i относительно оси x_{i-1} называется θ_i или вектор угла в сочленениях;
7. Ориентация оси z_i относительно оси z_{i-1} называется α_i или вектор угла скручивания.

Эти четыре параметра d_i , θ_i , a_i и α_i описывают кинематическую конфигурацию каждого звена исполнительного механизма робота. Три из них – константы, а один подлежит к определению. Если система координат для каждого звена описана по преобразованию Денавита-Хартенберга, то посредством последовательного выполнения следующих преобразований получим матрицу однородного преобразования в i -й системе координат:

$$\begin{aligned}
 A_{i-1}^i &= \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} C\theta_i - C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{3.72}
 \end{aligned}$$

Описание конечного звена манипулятора по отношению к системе координат звена $n-1$ через однородные преобразования имеет вид

$$T_i^j = A_i \cdot A_{i+1} \cdot \dots \cdot A_j. \quad (3.73)$$

В качестве численного примера совместного использования матричного преобразования Денавита-Хартенберга и метода Лагранжа при формировании уравнений движения в приложении В приведено решение обратной задачи кинематики для четырехзвенного манипулятора типа ПППВ [110,111] и получены его уравнения движения в следующем виде:

$$\begin{cases} \mu_1 n_1 = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \ddot{q}_1 - a_4 C_4 m_4 - 3m_3 \dot{q}_3^2; \\ \mu_2 n_2 = (m_2 + m_3 + m_4) \ddot{q}_2 - a_4 S_4 m_4 \ddot{q}_4; \\ \mu_3 n_3 = -(m_3 + m_4) \ddot{q}_3 - g(m_3 + m_4); \\ \mu_4 n_4 = -a_4 C_4 m_4 \ddot{q}_1 - a_4 S_4 m_4 \ddot{q}_2 + [J_{xx}^4 + J_{xx}^4 C_4^2 - a_4 m_4 (S_4 - a_4)] \ddot{q}_4 + [m(z_4^* S_4 + a_4 C_4)] \dot{q}_3^2. \end{cases} \quad (3.74)$$

где: μ_i – моменты электромагнитных сил, создаваемых двигателем привода D_i ;
 n_i – передаточное число редуктора привода D_i ;
 $Q_i = \mu_i n_i$ – обобщенные силы (движущие моменты), соответствующие обобщенным координатам q_i манипулятора ($i = 1, 4$);
 m_i – массы звеньев манипулятора;
 $C_i = \cos \theta_i, S_i = \sin \theta_i$ – для краткости использованные обозначения;
 a_4, z_4^* – геометрические параметры манипулятора;

Уравнения движения манипулятора (3.74) представляют собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Эти уравнения учитывают все действующие на звенья манипулятора силы и моменты: инерциальные, центробежные, кориолисовы и гравитационные.

Разработанная вычислительная программа является достаточно универсальной уточненной моделью многодвигательных машин и позволяет проводить синтез механических систем и систем управления ими через многократный анализ. Программа может явиться частью САПР широкого класса механизмов с несколькими степенями подвижности [112–115].

Исследования движения кинематических пар (КП) выполнялось на действующем манипуляторе с участием автора диссертационной работы в научно-исследовательской лаборатории «Модульного технологического оборудования» в Брянском государственном техническом университете (Россия, г.Брянск) с применением промышленного робота FANUC ARC Mate 100iC (Япония).

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 3.23.



1 – промышленный робот, 2 – вращатель, 3 – специальная рама,
4 – источник для плазменной сварки, 5 – источник для электродуговой
полуавтоматической сварки

Рисунок 3.23 – Общий вид роботизированной установки для плазменной
наплавки

На рисунке 3.24 показан процесс испытания газодинамической наплавки с
применением промышленного робота FANUC ARC Mate 100iC.



Рисунок 3.24 – Процесс наплавки на роботизированной установке

В результате испытания газодинамической наплавки металла в качестве
рабочего органа применялся плазменный термоинструмент. Движения
кинематических пар (КП) осуществлялась по заданной программе. Испытания
показали возможность использования промышленных роботов в процессах
камнеобработки (Приложение Г).

Выводы по 3 разделу

1. Проведен анализ существующих конструкций бензовоздушных горелок в процессе их эволюции, выявлено, что бензовоздушные горелки с интенсификаторами горения позволяют возбуждать в них детонационное горение и получение более мощной струи, обеспечивающей повышение на 30-50% производительность термического разрушения горных пород;

2. Установлено, что в сверхзвуковом потоке, истекающим из сопла Лаваля горелки, в цилиндрическую перфорированную камеру возбуждения (насадок), трением о внутренние стенки насадка и контакта с холодным атмосферным воздухом, образуется мощный стационарный скачок уплотнения – ударная волна, питающаяся кислородом из эжектируемого, через перфорацию насадка, атмосферным воздухом, чем обеспечивается интенсивное догорание горючего и повышение тепловой мощности потока газа из сопла насадка;

3. Для определения размеров базовой горелки, построены графики зависимости теплового потока q , температуры газа на срезе сопла T_a , температуры в камере сгорания T_k и скорости истечения факела W от коэффициента избытка окислителя α_T при различных расходах горючего. Из анализа полученных данных видно, что температура в камере сгорания T_k практически не зависит от коэффициента избытка окислителя α_T , температура газа на срезе сопла T_a при повышении α_T от 0,7 до 0,9 несколько увеличивается, а дальше до $\alpha_T = 1$ практически остается неизменной. С увеличением давления в камере сгорания темп роста температуры возрастает;

4. Выполнено обоснование и расчет геометрических параметров новой конструкции бензовоздушного термоинструмента с эжекционным насадком, определены основные параметры достижимого давления сжатия и давления во входном сечении камеры смешения, а также основные геометрические размеры газоструйного эжектора с диффузором, изготовлен опытный образец горелки с газодинамическим насадком;

5. Для разработанной модели бензовоздушного термоинструмента проведены испытания для установления конструктивных характеристик горелки, в результате экспериментальных работ выявлено, что общий прирост производительности составляет 30-50% без дополнительного расхода воздуха от компрессора, мощность теплового потока (при тех же расходах горючего) увеличивается на 30%;

6. Установлены аналитические зависимости теплового потока горелки термоинструмента, температуры газа на срезе сопла, температуры в камере сгорания и скорости истечения факела от коэффициента избытка окислителя при различных расходах горючего, позволяющие обосновать конструктивные и режимные параметры новой конструкции термоинструмента с эжекционным насадком: определить температуру смешанного потока; параметры выходного сечения сопла эжекционного насадка, диаметр свободной струи и ее длину;

7. Принята модель разрушения горной породы методом крупного скола под действием разрушающих напряжений, установлены зависимости напряженного состояния разрушаемого слоя и найдены критерии разрушения

от максимальных касательных напряжений $\tau_{xz} > [\tau_{xz}]$ и от нормальных растягивающих напряжений $\sigma_z \geq [\sigma_z]$;

8. Разработана структурная схема экспериментального манипулятора четырехзвенного робота типа ПППВ, описываемая в виде матрицы однородного преобразования методом Денавита-Хартенберга в i -й системе координат, приведено решение уравнение динамики движения четырехзвенного манипулятора ПППВ методом Лагранжа-Эйлера, установлены аналитически зависимости четырехзвенного манипулятора ПППВ с учетом действующих сил и моментов;

9. Конструкция экспериментальной механизированной установки с системой дистанционного управления работой термоинструментов может быть положена в основу разработки промышленного образца манипулятора с огнеструйным рабочим органом для поверхностной обработки блочного камня из крепких горных пород;

10. Экспериментально установлено, что оптимальная скорость продольного перемещения термоинструмента четырехзвенного манипулятора, относительно обрабатываемого блока горной породы, находящаяся в пределах 0,005...0,015 м/с, рассчитываемая с погрешностью 10...15 %, а глубина сбоя h при этом составляет от 3,5 до $8 \cdot 10^{-3}$ м.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГРАНИТНЫХ БЛОКОВ

4.1 Методика расчета и обоснование параметров бензовоздушного термоинструмента и технологии огнеструйной обработки гранитных блоков

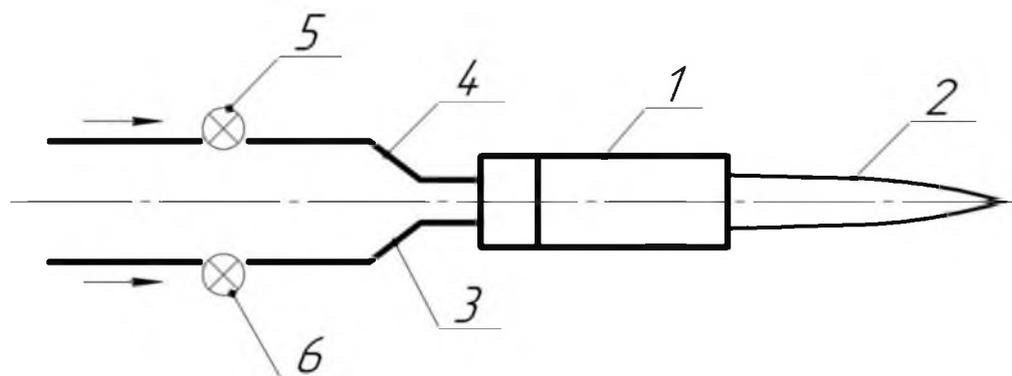
Целью производственных испытаний термоинструментов новой конструкции является определение технических, экономических и технологических характеристик и установление соответствия их заданным параметрам.

Известно, что в машинах и аппаратах тесно переплетаются процессы различной природы, поэтому их основные параметры, полученные на основе испытания натуральных образцов, обычно не соответствуют значениям этих параметров, заложенным в расчет конструкции в процессе ее проектирования. В связи с этим возникает необходимость производственных испытаний опытных образцов термоинструментов, разработанных на уровне изобретения [91].

Производственные испытания проводятся в согласовании с Программой и методикой испытаний. Программа устанавливает общие требования к условиям обеспечения и проведение испытаний, требования безопасности, определяемые характеристики и оформление их результатов.

Обслуживающий персонал, участвующий в проведении испытаний, должен пройти специальную подготовку по утвержденной программе, ознакомление с правилами эксплуатации оборудования со сдачей экзамена по теоретическому и практическому курсу.

Для огневых испытаний термоинструментов разработан экспериментальный стенд, представленный на рисунке 4.1, оснащенный контрольно-измерительной аппаратурой.



- 1 – термоинструмент; 2 – факел; 3 – магистраль для подачи горючего,
4 – магистраль для подачи воздуха, 5 – вентиль подачи воздуха,
6 – вентиль подачи горючего

Рисунок 4.1 – Схема экспериментального стенда

Питание термоинструментов воздухом осуществляется от компрессора ДК-9М. На этом стенде проводилась отработка конструктивных и газодинамических параметров термоинструментов типа ТРВ-12М1, БВР-60М1 и БВР-80М.

Участок, на котором проводились испытания термоинструментов, обеспечивался системами подачи топливных компонентов от компрессора и электроэнергией. На рисунке 4.2 представлено оборудование – компрессор ДК-9М и напорная емкость горючего.



1 – компрессор ДК-9М, 2 – напорная емкость для горючего,
3 – системы питания горючим термоинструмента

Рисунок 4.2 – Станция питания воздухом и горючим

Производится предварительный осмотр термоинструмента, его комплектности. Подготовленные к испытаниям термоинструменты сначала опробуют на холостом режиме работы, с обеспечением их топливными компонентами (горючее, воздух), устраняют обнаруженные неисправности, для обеспечения надежной устойчивой работы во время испытаний. По окончании монтажа и предварительных испытаний проводятся производственные испытания.

Содержание испытаний. Производственные испытания термоинструментов включают наладку, настройку и проверку работы всех устройств, обеспечение топливными компонентами; выполнение предусмотренных программой работ. При выполнении огневых испытаний необходимо руководствоваться правилами безопасности при работе с огнеструйными термоинструментами в соответствии с инструкцией по их эксплуатации.

Программой испытаний предусматривается:

- проведение холодных испытаний термоинструментов для выявления конструктивных, технологических и эксплуатационных недостатков и разработка предложения по их устранению;

- проведение огневых испытаний для оценки эксплуатационно-технических характеристик и режимов работы в соответствие с установленными проектными характеристиками;

- оценка надежности и долговечности, ремонтпригодности, удобства управления, безопасности обслуживания и санитарно-гигиенических критерий;

Во время проведения огневых испытаний ведется учет неисправностей и дефектов и их устранение.

При приемочных испытаниях термоинструментов новой конструкции определяются и контролируются:

- расход топливных компонентов (горючее, окислитель);

- определение размеров факела термоинструментов и эффективного расстояния от среза сопла горелки до поверхности разрушения, скорость резки горной породы, производительность (объемная) разрушения по величине сбоя ($\text{см}^3/\text{мин}$) горной породы при обработке и резке, запуск термоинструмента в работу и удобство управления;

- угол наклона горелки к забою;

- скорость перемещения термоинструмента в горизонтальном и вертикальном направлениях;

- оценка эффективности.

Методика испытаний. Нужные измерения в процессе испытаний выполняются следующим образом: расход топливных компонентов определяется взвешиванием на весах бачка с горючим, до и после испытаний; расход воздуха измеряется расходомером ЭВ200 (давление до 25 атм., расход воздуха до $810 \text{ м}^3/\text{час}$) от воздушного компрессора ДК-9М.

Скорость перемещения термоинструмента в горизонтальном направлении определяется как средняя по пройденному им пути на разных режимах работы.

Технологическая производительность – длина и ширина щели при крупном сколе, определяется расчетным путем по результатам измерений длины, ширины и глубины щелевой выработки на разных режимах работы. Время испытания термоинструментов длительностью не более 3 ч. Удельная энергоемкость разрушения горной породы, при поверхностной обработке и резке, определяется расчетным методом, как отношение израсходованной энергии топливных компонентов к объему щелевой выработки ($\text{м}^2/\text{час}$) или объему разрушенной массы горной породы ($\text{м}^3/\text{час}$).

Безопасность работы, при огневых испытаниях, термоинструментов или машины для обработки и резки щелевых выработок должна соответствовать ГОСТу Р54122-2010 и Техническому регламенту «О безопасности машин и оборудования» № 753 от 15 сентября 2009 г.

В соответствии с методикой расчета, разработана опытная модель бензовоздушного термоинструмента ТРВ-12М1 (ТР-13/22) с интенсификатором горения и проведены его испытания (Приложение Б) [95].

Техническая характеристика бензовоздушного термоинструмента ТРВ-12М1 имеющего следующие параметры:

Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$ – 2,5...3,5;

Расход горючего, л/ч – 12...17;

Диаметр сопла – 13 мм;
Диаметр сопла насадки – 20(22) мм;
Давление топливных компонентов, МПа – 0,7;
Зажигание – от запальной топливной жидкости (бензина);
Габариты (D x L), м – 0,05 x 0,45;
Вес, кг – 4,5.

Модель термоинструмента TPB-12M1 с эжекционным насадком прошла испытания на работоспособность, т.е. устойчивый запуск от зажигательной смеси (бензина) с дальнейшим переводом на основную топливную смесь (керосин, дизельное топливо и др.). В конструкции термоинструмента предусмотрена для этого резервная магистраль. Испытание термоинструмента производилось при различных стехиометрических соотношениях топливных компонентов ($\alpha_T = 0,7...0,9$). Массовый сбой составлял от 150 до 300 кг/ч по Курдайскому граниту.

На рисунке 4.3 изображено испытание бензовоздушного термоинструментов.



Рисунок 4.3 – Процесс выведения факела горелки на рабочий режим работы

В результате испытания конструкции горелки с детонационным режимом горения топливных компонентов в стоячей ударной волне (скачке уплотнения) установлены следующие конструктивные характеристики элементов горелки:

1. Расстояние от критического сечения сопла горелки до зоны возникновения мощного скачка уплотнения равно 5...7 диаметрам критического сечения сопла или примерно 65...90 мм для данной конструкции.

2. Рациональный угол наклона эжектирующих отверстий, позволяющих создать необходимую зону торможения факела горелки о шероховатость внутренних стенок составляет $45^{\circ}...50^{\circ}$.

3. Необходимая суммарная площадь эжектирующих отверстий составляет 50...60% критического сечения сопла горелки.

4. Длина цилиндрической части сопла на начальном участке равна 3...4,5 выходного сечения его, а внутренний диаметр больше критического сечения сопла горелки в 1,5...2,0 раза.

Производительность разрушения для горелки без детонационного насадка с высотой сбоя 0,5 см для гранитов, кг/ч:

Курдайского месторождения – 90...100;

Алматинского месторождения – 70...75;

Майкульского месторождения – 90...100;

С детонационным насадком:

Курдайского месторождения – 150...160;

Алматинского месторождения – 110...120;

Майкульского месторождения – 140...150.

По результатам испытания новой горелки установлен общий прирост производительности, составляющий 50% без дополнительного расхода воздуха от компрессора, расход же горючего увеличился на 2,5 кг/ч.

По результатам испытаний разработано техническое задание и изготовлен опытный образец термоинструмента с эжекционным насадком для интенсификации процесса догорания топливной смеси.

Базовой моделью бензовоздушного термоинструмента является конструкция терморезака ТРВ-12М [41,90,91], разработанная в Проблемной лаборатории новых физических методов разрушения горных пород и бетонов и внедренная на ряде камнеобрабатывающих предприятий Казахстана и союзных республик.

Анализ течения газа в трубах переменного сечения не дает нам ответа на процесс горения в турбулентном потоке и получения параметров струи для использования в расчете эжекционной зоны насадка, поэтому определяем параметры истечения газового потока из сопла Лавалья [116].

Для полного расчета газодинамического насадка мы используем параметры сверхзвуковой струи на срезе выходного сопла Лавалья. В дальнейшем, струя факела горелки, имеющая высокую температуру и скорость, рассчитанные по известным формулам, резко расширяется в насадке. По-видимому, происходят процессы, приводящие к турбулентности газового потока и, как следствие, скачкообразное повышение термодинамических параметров.

Эксперименты показали наличие высокотемпературной зоны – сопло запыралась, горение было прерывистым с выбросом большого объема несгоревшего горючего и резкое расплавление сопла Лавалья и выход горелки из строя. Наличие зоны быстрого горения можно было увидеть по узкой зоне расплавлению внутренней поверхности насадка на некотором расстоянии от среза сопла Лавалья.

4.2 Исследование технологических параметров огнеструйного разрушения горных пород при поверхностной обработке блочного камня

На основе исследования механизма разрушения разработана методика определения параметров термоинструментов для поверхностной обработки блоков горных пород. Эти параметры, включающие скорость продольного перемещения разрушаемого блока или горелки и оптимальную мощность термоинструмента, находятся в прямой зависимости от термодинамических

свойств газовой струи горелки и теплофизических свойств горной породы [99,117].

Рассмотрим процесс послойной обработки поверхности блока при параллельном расположении струи к поверхности обработки. Струя, встречаясь (накладываясь) с поверхностью обработки, образует пятно растекания, имеющее форму вытянутого эллипса. При движении блока относительно горелки снимается слой породы, толщина которого зависит от скорости перемещения камня или термоинструмента и термодинамических параметров горелки.

Одним из основных показателей работы термоинструмента для обработки гранитных блоков является производительность процесса обработки. Для этого необходимо найти зависимость объемной производительности разрушения от термодинамических параметров горелки и физико-механических свойств породы, а также продольную скорость движения блока относительно факела горелки, или наоборот [118].

При продольном перемещении поверхности камня относительно пятна растекания радиусом $2R$ с постоянной скоростью v_{np} каждая точка породы будут находиться под действием тепла струи время t_{cl} .

За это время от породы отделится слой толщиной z , тогда объемная производительность (4.1) выразится [17]:

$$W = 4RL \frac{z}{t_{cl}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.1)$$

где L – эффективная длина обработки вдоль полосового источника тепла горелки, м.

При данном тепловом потоке и размере пятна нагрева от забоя начнут отделяться частицы породы толщиной z_0 за время t_p . Время отделения слоя породы толщиной z при условии постоянства теплового потока можно выразить:

$$t_{cl} = t_p \frac{z}{z_0}, \text{ с}. \quad (4.2)$$

Коэффициент сосредоточенности k теплового потока определяется по формуле

$$k = \frac{\pi}{16R^2}. \quad (4.3)$$

Учитывая зависимость радиуса пятна эффективного нагрева от коэффициента сосредоточенности теплового потока, объемная производительность будет равна:

$$W = L \frac{z_0}{t_p} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.4)$$

Отношение z_0/t_p – есть линейная скорость $v_{лин}$, следовательно, для раскрытия физической сущности зависимости (4.4) необходимо установить связь линейной скорости от величины теплового потока, вводимого в породу $v_{лин} = f(q)$.

Решаем эту задачу на основе полученных ранее зависимостей в следующей последовательности.

1. При известных теплофизических характеристиках породы E , α , μ , σ^p определяется температура T_s в момент разрушения из обобщенного условия разрушения прогретого слоя (4.5) [17]:

$$0,063 \frac{E\alpha T_s}{1-\mu} \geq \sigma^p, \quad (4.5)$$

где E – модуль упругости, МН/м²;

α – коэффициент линейного теплового расширения, $K^{-1} 10^{-5}$;

T_s – температура поверхности нагрева породы в момент отделения прогретого слоя, К;

μ – коэффициент Пуассона;

σ^p – предел прочности породы на растяжение, Па.

Температура поверхности T_s в момент разрушения:

$$T_s = \frac{\sigma^p(1-\mu)}{0,063E\alpha}. \quad (4.6)$$

2. При известном коэффициенте относительного теплообмена и температуры газов у поверхности породы [56,58] определяем толщину отделяемой частицы:

$$z_0 = \frac{T_s}{(T_r - T_s)H}, \text{ м}, \quad (4.7)$$

где $\sqrt{(n+1)(1+n\theta+\nu)}z(\lambda_3) = z(\lambda_1) + n\sqrt{\theta}z(\lambda_2)$ – относительный коэффициент теплообмена, 1/м;

T_r – температура газов у поверхности обработки, К;

α_q – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК).

3. Имея численное значение T_s и T_r , а следовательно, зная $I/U = T_s/T_r$, находим по таблице [58] соответствующее значение корня x из следующего уравнения:

$$\frac{1}{u} = 1 - e^x \operatorname{erfc}\sqrt{x}. \quad (4.8)$$

4. Определяем линейную скорость огнеструйного разрушения:

$$v_{лин} = \frac{z_0}{t_p}, \text{ м/с.} \quad (4.9)$$

5. Находим потребный при такой производительности удельный тепловой поток:

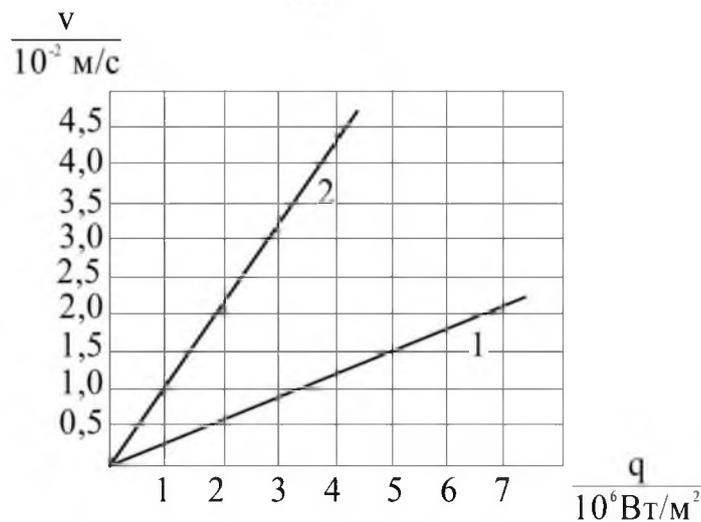
$$q = H\lambda (T_r - T_s), \text{ Вт/м}^2. \quad (4.10)$$

Ниже приведены результаты расчета параметров термоинструмента и процесса огнеструйной обработки для Курдайского и Алматинского (Куртинского) гранитов. Теплофизические свойства пород указанных месторождений приведены в таблице 1.2 [16, 17].

Из зависимости $v_{лин} = f(q)$ (рисунок 4.4) следует, что интенсивность процесса разрушения прямо пропорциональна удельной тепловой энергии, следовательно, линейная скорость разрушения выразится

$$v_{лин} = c q_{max.сум}, \quad (4.11)$$

где c – тангенс угла наклона графика $v_{лин} = f(q)$.



1 – Алматинский (Куртинский) гранит; 2 – Курдайский гранит

Рисунок 4.4 – Линейная скорость разрушения от величины удельного теплового потока и его сосредоточенности

С учетом (4.11) выражение (4.4) примет вид:

$$W = c q_{max.сум} L \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (4.12)$$

Анализ (4.12) показывает, что объемная производительность зависит от произведения трех величин: c , $q_{max.сум} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}}$ и L – длины полосы нагрева.

По своему физическому смыслу величина c характеризует объем разрушенной породы, приходящейся на единицу вложенной энергии, т.е. удельный объем разрушения, зависит от теплофизических свойств породы.

Отношение $q_{max.сум} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}}$ характеризует плотность теплового потока в породе и его распределение в пятне нагрева, т.е. суммарную тепловую мощность термоинструментов. Из уравнения (4.12) следует, что проектировать термоинструменты следует с обеспечением максимальной передачи тепла в горную породу.

Таким образом, производительность огнеструйного разрушения зависит от комплекса теплофизических свойств горных пород и тепловой мощности инструмента.

На рисунках 4.5 и 4.6 представлены основные схемы взаимодействия высокотемпературных и высокоскоростных струй горелок с горной породой при поверхностной обработке и резке щелевых выработок [118].

Рядом авторов [16,56] решалась тепловая задача по определению основных параметров газового потока и производительности разрушения горной породы.

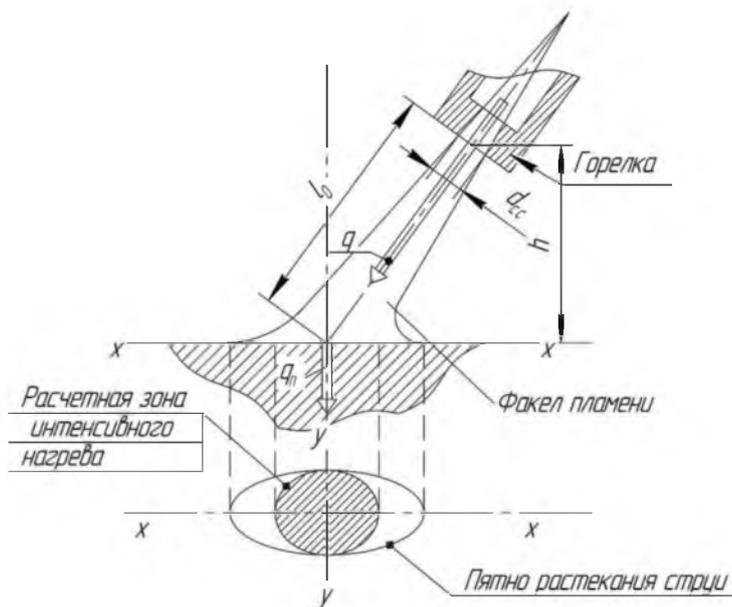


Рисунок 4.5 – Взаимодействие газовой струи с породой

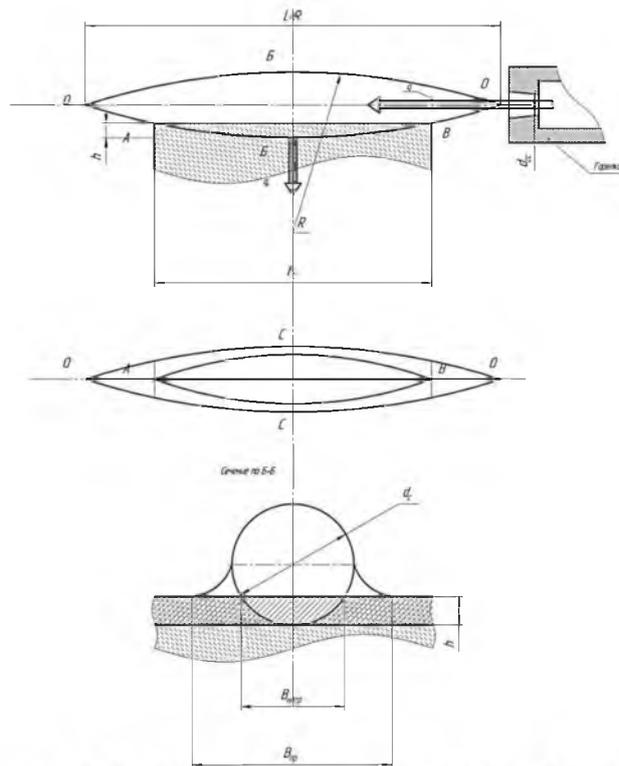


Рисунок 4.6 – Взаимодействие параллельной газовой струи с породой

По первой схеме (рисунок 4.5) показан процесс разрушения горной породы, при котором пятно контакта газовой струи с породой имеет круговую или эллиптическую форму.

А по второй схеме (рисунок 4.6) разрушение породы осуществляется при параллельном протекании газового потока, относительно горной породы, с некоторым заглублением, возможно на весь диаметр струи.

Управление процессом разрушения горной породы осуществляется визуально, оператор при этом имеет защитные устройства.

Тепловые потоки, развиваемые керосино-кислородными термоинструментами, достигают $10 \cdot 10^6$ Вт/м², что в 2-3 раза выше, чем у бензовоздушных, имеющих $(1,5...4,0) 10^6$ Вт/м², производительность их по сбою также выше [71]. Для нашего случая реализации предлагается наклонная схема разрушения источником тепла (рисунок 4.5), как основной схемы работы термоинструмента.

Установлено, что производительность огнеструйного разрушения пропорциональна мощности теплового потока, идущего в породу, тепловая мощность в свою очередь, зависит от температуры газовой струи, ее скорости и геометрических размеров пятна контакта. Указанные параметры газовой струи зависят от количества горючего и окислителя, реагирующих в камере сгорания в единицу времени.

Перечисленные факторы являются режимными параметрами термоинструментов. Изучение их влияния на производительность огнеструйного разрушения необходимо для проектирования горелок целевого назначения.

Эффективность работы термоинструмента, в значительной мере, зависит от организации в камере сгорания процесса смесеобразования топливных компонентов. Процесс смесеобразования зависит от подачи компонентов в камеру сгорания через форсунки и их перемешивания.

Основными показателями, характеризующими качество распыливания горючего, является тонкость и однородность, а также угол струи [71,120]. Тонкость и однородность распыливания зависит от конструкции форсунки и перепада давления на ее срезе.

Во всех конструкциях горелок использован центробежный тип форсунок с искусственной закруткой подаваемого через неё горючего. При центробежном распыливание дальноточность невелика, это и определяет размеры зоны распыливания в камере сгорания, следовательно и ее размеры.

Камера сгорания является основным органом термоинструмента. Для расчета камеры сгорания необходимо определить ее объем и геометрические размеры. Объемом камеры сгорания V_K принято считать объем камеры до критического сечения. Для определения необходимого объема V_K используют один из следующих параметров:

1. Условное время пребывания продуктов сгорания в камере τ_{ycl} :

$$\tau_{ycl} = \frac{V_k}{G \cdot v_k}, \text{ с}, \quad (4.15)$$

где V_k – объем камеры сгорания, м³;

G – расход топлива, г/с;

v_k – средний удельный объем топлива и продуктов сгорания, м³/кг.

2. Приведённая длина камеры сгорания

$$l_{np} = \frac{v_k}{f_{kp}}, \text{ м}, \quad (4.16)$$

где f_{kp} – площадь сопла в критическом сечении камеры сгорания

$$f_{kp} = \frac{G \cdot \beta}{P_z}, \text{ м}^2, \quad (4.17)$$

где β – удельный импульс давления в камере, м/с;

P_z – давление газов внутри камеры сгорания, Па.

При проектировании камеры сгорания пользуются соотношением $f_k/f_{kp} = 6 \dots 20$.

Для образования качественной поверхности блочного камня из крепких горных пород, факел термоинструмента должен перемещаться вдоль заготовки или заготовка относительно факела горелки в продольном направлении со скоростью v_{np} . Продольная скорость перемещения не может быть произвольной

и зависит от теплофизических свойств породы, мощности горелки и толщины снимаемого слоя породы за один проход.

В зависимости от скорости перемещения заготовки, изменяется время воздействия струи на породу. Пусть при скорости v_{np} оно составляет $t_{сл}$, соответствующее толщине снимаемого слоя z . Исходя из положения, что при движении пятна эффективного нагрева полосового источника шириной $4R$ каждая точка должна находиться в этой области время $t_{сл}$, определим требуемую скорость продольного перемещения обрабатываемого блока:

$$v_{np} = \frac{4R}{t_{сл}}, \text{ м/с.} \quad (4.18)$$

С учетом зависимостей $t_{сл}$ и (4.13) выражение (4.18) примет вид:

$$v_{np} = q_{max.сум} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} c z^{-1}, \text{ м/с.} \quad (4.19)$$

Зависимость (4.19) показывает, что с увеличением удельного теплового потока в породу и уменьшением сосредоточенности струи при снятии слоя породы данной толщины необходимо увеличивать скорость перемещения термоинструмента относительно обрабатываемого блока горной породы. На рисунках 4.4, 4.7 для гранитов различных месторождений графически изображены зависимости (4.13), (4.19).

При обработке поверхностей блоков методом крупного скола (рисунок 4.7) объединяются два способа разрушения – это прорезание борозд и разрушение уступа между ними, следовательно, объемная производительность разрушения будет складываться из их суммы.

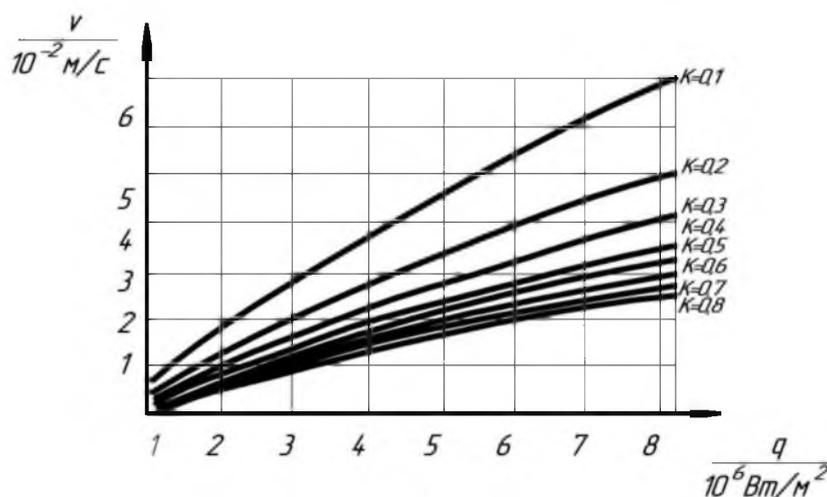


Рисунок 4.7 – Рациональная скорость перемещения обрабатываемого блока относительно факела горелки в зависимости от удельного теплового потока при различных коэффициентах сосредоточенности. Высота разрушаемого слоя породы – 0,01 м. Алматинский гранит

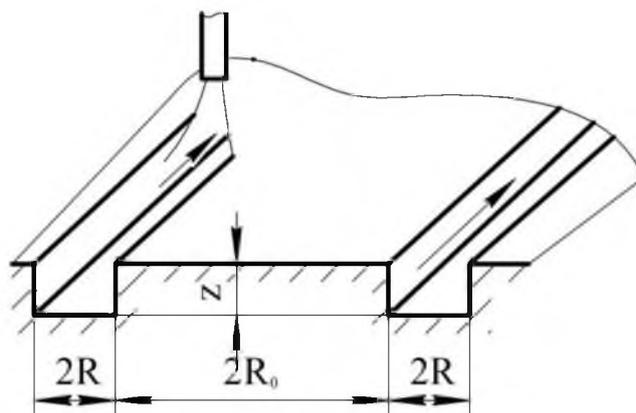


Рисунок 4.8 – Технологическая схема обработки методом крупного скола

Расчет производительности разрушения выступа производится по следующей формуле:

$$W^0 = v_{np} \cdot 2R_0 z, \text{ см}^3/\text{с}, \quad (4.20)$$

где v_{np} – продольная скорость образования борозды, см/с;

$2R_0$ – ширина выступа, см;

z – высота уступа (борозды), см.

Если учесть, что для разрушения выступа требуется прорезание двух борозд, то общая производительность будет равна:

$$W^x = W^0 + 2W, \quad (4.21)$$

где W – производительность разрушения борозды, см³/с.

Следовательно, за счет использования энергии отраженных газов производительность возрастает в 2 раза. По результатам расчетов строим график зависимости для различных размеров глубины сбоя:

$$W = f(2R_0) \cdot v_{np}, \quad (4.22)$$

при $q = const$, $z = const$ и $W = f(q)$ при $2R_0 = 12, 10, 8, 6, 4$.

На рисунках 4.9, 4.10, 4.11 и 4.12 представлены графики этих зависимостей.

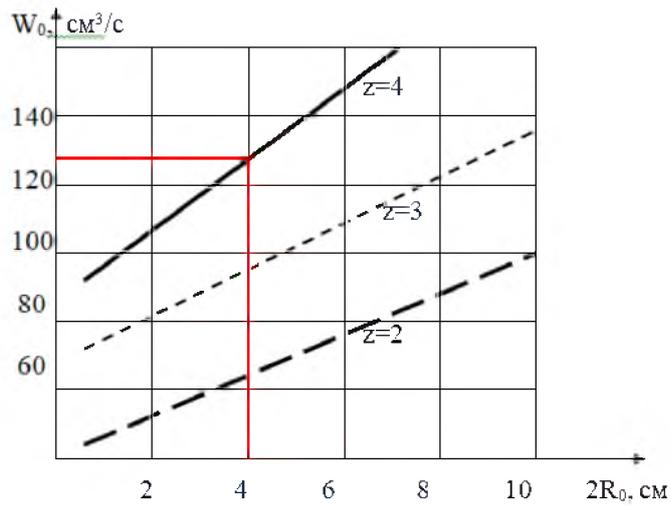


Рисунок 4.9 – График зависимости объемной производительности W_0 по сбою от ширины прогретого слоя $2R_0$

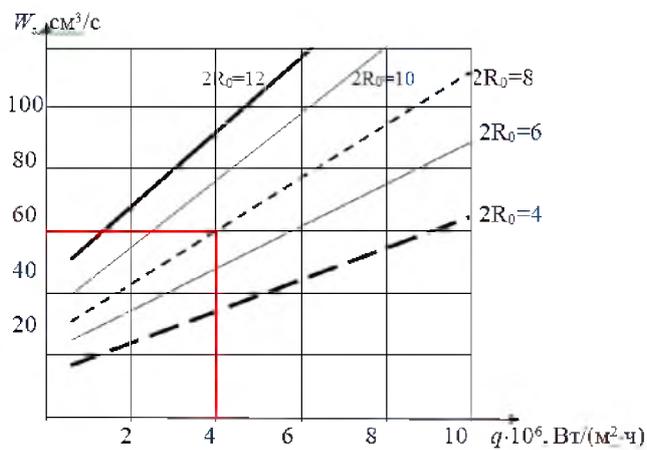


Рисунок 4.10 – График зависимости объемной производительности W от величины теплового потока q при $v_{np} = 1,0$ $\text{см}/\text{с}$

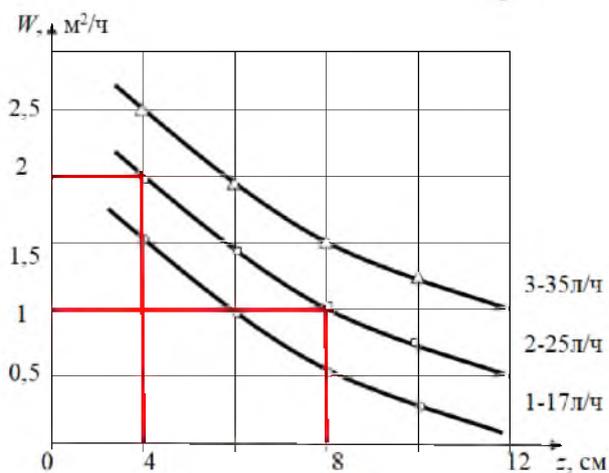
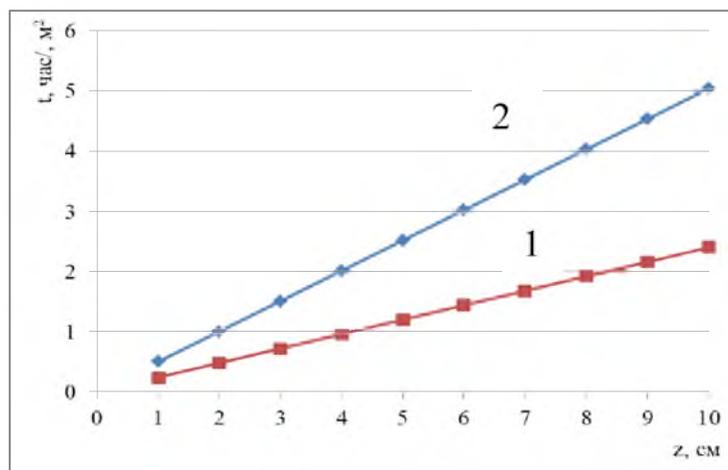


Рисунок 4.11 – График зависимости объемной производительности W от глубины сбоя z , $v_{np} = 1$ $\text{см}/\text{с}$



1) при $W = 700 \text{ см}^3/\text{мин}$; 2) при $W = 1500 \text{ см}^3/\text{мин}$

Рисунок 4.12 – График зависимости времени обработки t единицы поверхности от высоты сбоя z , $t=f(z)$

На рисунке 4.13 представлен график зависимости тепловой мощности термоинструмента от расхода топливных компонентов.

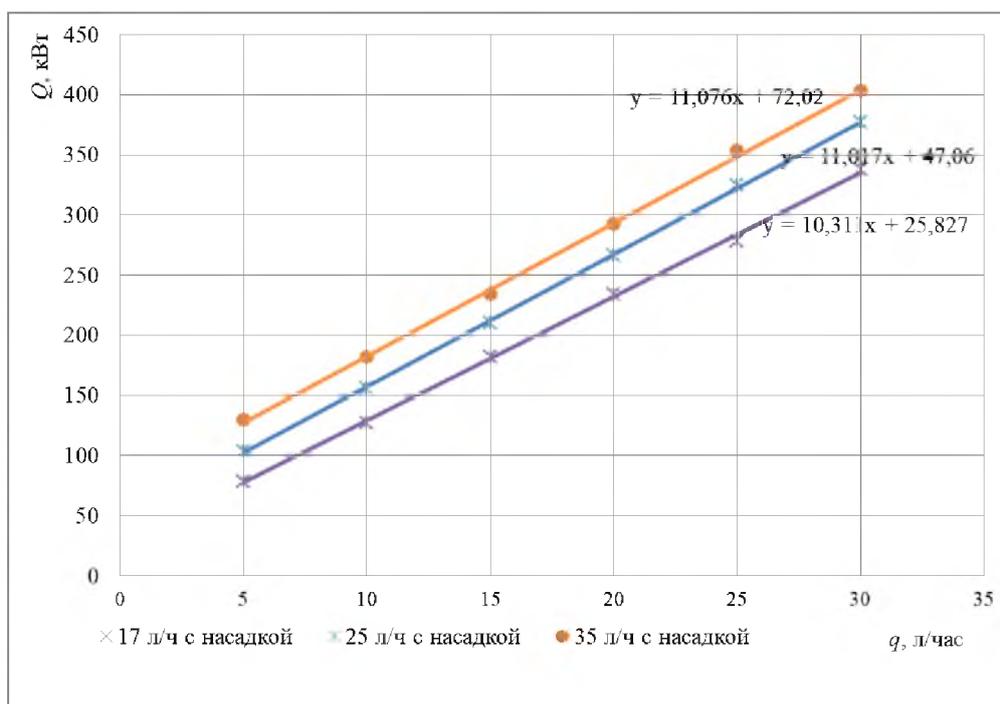


Рисунок 4.13 – График зависимости тепловой мощности термоинструмента Q от расхода горючего q

Зависимость дальности факела горелки от расхода горючего $L=f(g)$ показана на графике рисунка 4.14.

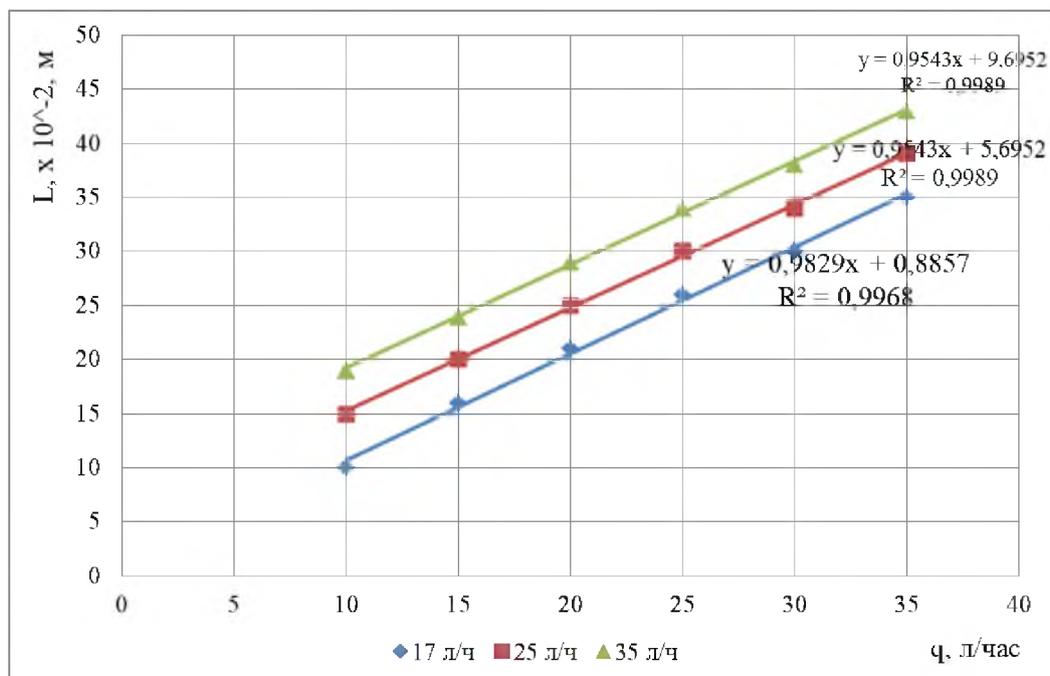


Рисунок 4.14 – График зависимости дальности факела термоинструмента L от расхода топливных компонентов q

На рисунке 4.15 представлен график зависимости $w = f(L)$.

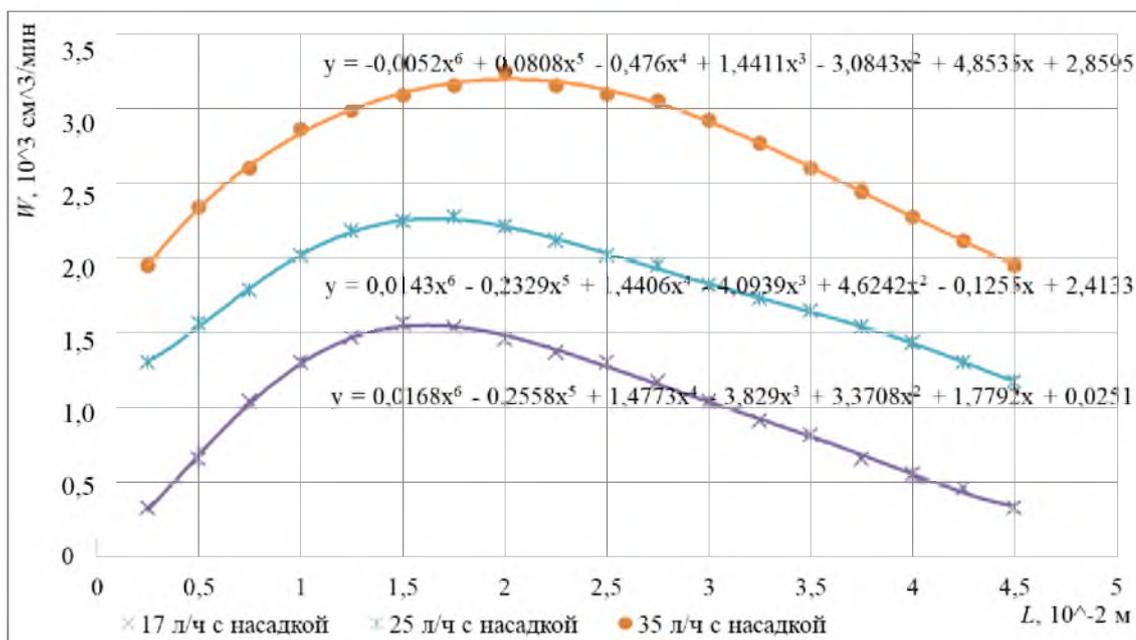
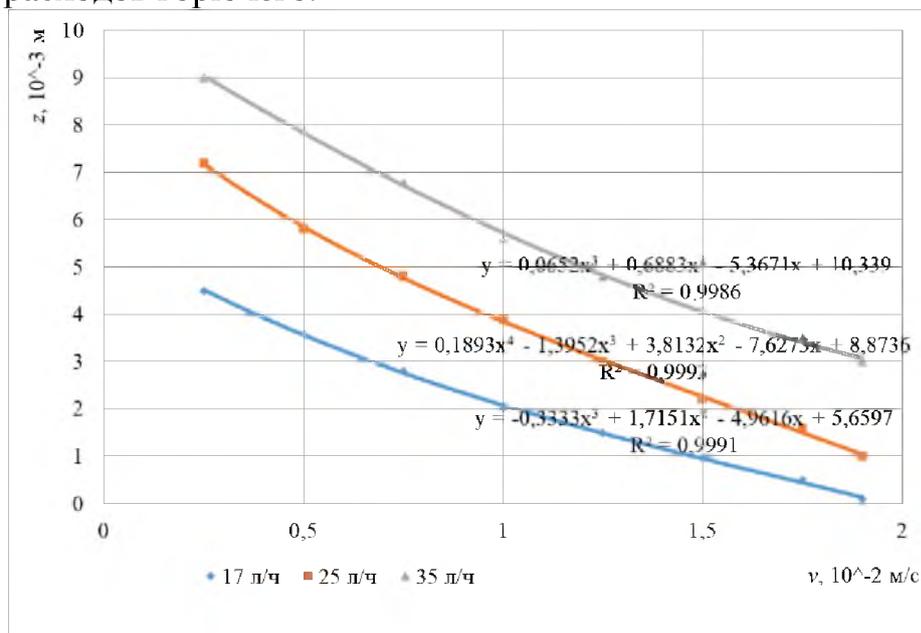


Рисунок 4.15 – График зависимости объемной производительности разрушения W от расстояния среза горелки L до поверхности пятна нагрева, гранит – Куртинского месторождения

Из графика 4.15 видно, что производительность разрушения породы $w = f(L)$ зависит от расстояния от среза сопла до разрушаемой породы и достигает максимального значения в том сечении факела, где тепловой поток максимальный. Так же на графике представлены значения объемной производительности при различных расходах топливных компонентов.

На рисунке 4.16 представлен график зависимости глубины сбоя z от продольной скорости v перемещения манипулятора с рабочим органом при различных расходах горючего.



расход горючего 1 – 17 л/ч, 2 – 25 л/ч, 3 – 35 л/ч

Рисунок 4.16 – График зависимости глубины сбоя z от продольной скорости v перемещения термоинструмента. Гранит – Алматинский.

На рисунках 4.17–4.18 представлен процесс обработки поверхности блоков горных пород.



а)



б)

Рисунок 4.17 – Процесс поверхностной обработки блоков термоинструментом ТРВ-12 без насадки (а) и ТРВ-12М1 с насадкой (б)



а)



б)

а – процесс измерения длины факела; б – прорезка щелей для крупного скола при пассировке блоков

Рисунок 4.18 – Процесс работы термоинструмента ТРВ-12М1 с насадком

Результаты производственных испытаний огнеструйных термоинструментов и исследования обрабатываемости различных горных пород огнеструйным способом приведены в работе [121]. Установлено, что большинство пород хорошо разрушаются термическим способом с производительностью, значительно превышающей механическую обработку. Удельная производительность по сбою горных породы при термической обработке блоков бензовоздушными термоинструментами без насадка равна $90 \div 150$ кг/ч, а керосино-кислородными – $150 \div 300$ кг/ч, бензовоздушными термоинструментами с насадкой – $150 \div 350$ кг/ч.

В результате моделирования процесса разрушения горных пород терминирующими инструментами с интенсификаторами горения, с использованием многофакторного эксперимента, получены уравнения регрессии для определения:

- тепловой мощности термоинструмента Q в зависимости от расхода горючего q ;
- дальноточности факела термоинструмента L в зависимости от расхода топливных компонентов q ;
- объемной производительности разрушения W в зависимости от расстояния среза горелки L до поверхности пятна нагрева;
- глубины сбоя z в зависимости от продольной скорости v перемещения термоинструмента.

Регрессионные модели процессов разрушения горных пород, под действием высокотемпературных и высокоскоростных газовых факелов термоинструментов, указаны на рисунках 4.13-4.16, что позволяет производить соответствующие расчеты.

4.3 Обоснование параметров новой конструкции бензовоздушного термоинструмента для разрушения горных пород

На основе теоретических и экспериментальных исследований, разработана новая конструкция горелки термоинструмента, реализующая новые принципы горения топливных компонентов, обеспечивающих прирост тепловой мощности горелки на 25...30%, при неизменных расходах топливных компонентов [122].

Увеличение мощности горелки происходит за счет более полного сгорания горючего, при сжигании его в скачках уплотнения – ударных волнах, инициируемых за счет турбулентности потока газа, после среза сопла Лавалья и далее, от шероховатостей внутренней поверхности насадка, образованных от сверления эжекционных отверстий. Конструкции этих термоинструментов зарегистрированы в РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК по заявке [122,123].

Разработанная конструкция горелки выполнена как изобретение и относится к горному делу, может быть использовано для направленного воздействия на горные породы при их разрушении раскаленными газовыми струями в камнеобрабатывающей и горной промышленности, а также при очистке и напылении материалов. Прототипом разработки являются изобретение [124], аналогом выбрано изобретение [125]. Недостатком которых является сложность запуска в работу и большой металлоемкостью.

Задача изобретения состоит в повышении мощности факела горелки путем более полного использования его энергетических характеристик.

Решение задачи достигается тем, что возбуждают скачки уплотнения вдоль новой образованной струи факела горелки, после ввода ее в специальный цилиндрический насадок с двумя каскадами перфораций, выполненных под углом $45^{\circ} \dots 50^{\circ}$ для эжектирования в факел атмосферного воздуха и сжигания, в образованных скачках уплотнения (ударных волнах), несгоревшего горючего, разогретого в основной струе до высокой температуры.

Первый ряд перфорации выполнен в насадке на границе начального участка газовой струи горелки с расстоянием, равным расстоянию полного расширения струи горелки, далее разгонного участка новой, образованной горением обогащенного горючим струи горелки и длиной, равной половине расстояния до первого каскада эжектирующих отверстий и второго каскада (ряда) эжектирующих отверстий, выполненных на длине каскада внутреннего диаметра насадка и обеспечивающий защиту выходного сопла насадка от перегрева за счет всасывания холодного окружающего воздуха и транспортирования его в струе до ее выхода из насадка, причем эжектируемые отверстия выходного каскада выполнены диаметром до 2 мм и расположенные в торце переходного диаметра.

Устройство для термического разрушения также отличается тем, что защита наружной поверхности первого каскада насадка выполнено в виде защитного кожуха, с образованием гарантированного зазора, несколько большего суммарной площади эжектируемых отверстий, обеспечивающих за счёт скорости поступающего охлаждающего воздуха через зазор и охлаждение

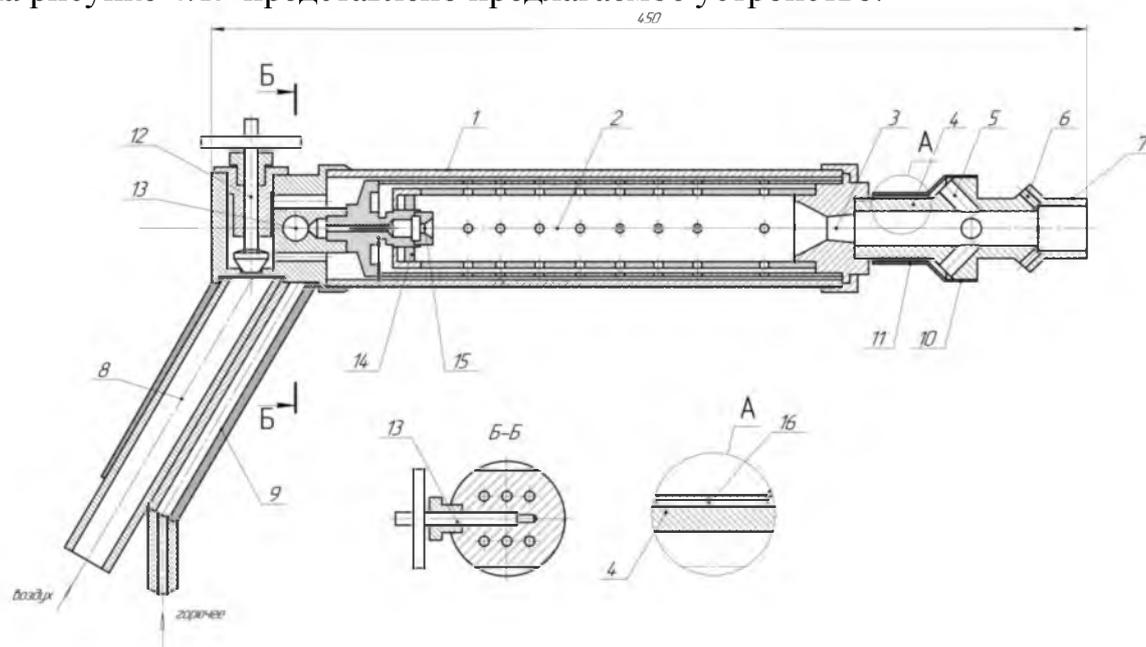
поверхности нагрева от образованной внутри насадки зоны горения в ударной волне, причем длина выходного сопла насадка равна его диаметру.

Осуществление этого способа обуславливается применением устройства новой конструкции, состоящего из огнеструйной горелки с соплом Лавалья и, соосно ему, цилиндрического насадка с двухрядными эжекционными отверстиями на его выходе. Для первого ряда эжекционные отверстия выполнены для возбуждения мощного стационарного скачка уплотнения (ударной волны) в начале основного участка основной струи горелки, в котором дожигается горючее, поступающее с избытком из камеры сгорания. Это позволяет увеличить мощность факела, то есть повысить его энергетические характеристики и использования ударного скачка в качестве смесителя и реактора горения.

Такое наложение нового факела на основную струю горелки позволяет получить факел большей мощности, с более полным использованием его энергетических характеристик, без использования громоздкого компрессорного оборудования и крупногабаритных горелок.

Второй каскад эжекционных отверстий предназначен для создания подстилающего слоя эжектируемого холодного воздуха для охлаждения выходного сопла насадки.

На рисунке 4.19 представлено предлагаемое устройство.



- 1 – горелка, 2 – камера сгорания, 3 – сопло Лавалья, 4 – насадка,
 5, 6 – эжекционные окна, 7 – выходное сопло, 8 – магистраль воздушная,
 9 – магистраль горючего, 10 – кожух, 11 – кольцевой канал,
 12, 13 – регулировочные клапаны, 14 – завихритель, 15 – форсуночный аппарат,
 16 – зазор

Рисунок 4.19 – Устройства для термического разрушения горных пород с эжекционным насадком ТРВ-12М1

Устройство состоит из горелки 1, имеющей камеру сгорания 2 с соплом Лавалья 3, за соплом Лавалья выполнен удлиненный цилиндрический насадок 4, расположенный соосно с соплом Лавалья 3, в котором выполнены эжекционные окна 5, под углом к оси насадка. Конец насадка 4 выполнен большего диаметра, и имеет также эжекционные окна 6 для всасывания эжектируемого наружного воздуха, идущего для охлаждения выходного сопла 7. Устройства горелки 1 оснащена магистралями подвода топливных компонентов – горючего 8, воздуха 9, регулировочных клапанов 12, 13 и завихрителя 14 подачи воздуха в камеру сгорания 2. Также для охлаждения поверхности насадка 4, в области развития очага горения топливных компонентов, последний снабжен защитным кожухом 10 в зазор 16 которого, между корпуса насадка всасывается эжектируемый воздух, идущий на поддержания горения в скачке уплотнения.

Устройство работает следующим образом. В горелку 1 через форсуночный аппарат 15 подается под давлением и распыляется горючее, а через отверстия 14 завихрителя в камеру сгорания нагнетается сжатый атмосферный воздух. Горение горючих компонентов в горелке 1 сопровождается выбросом раскаленной газовой струи из камеры сгорания 2 через сопло Лавалья 3 в насадок 4 и далее на объект разрушения.

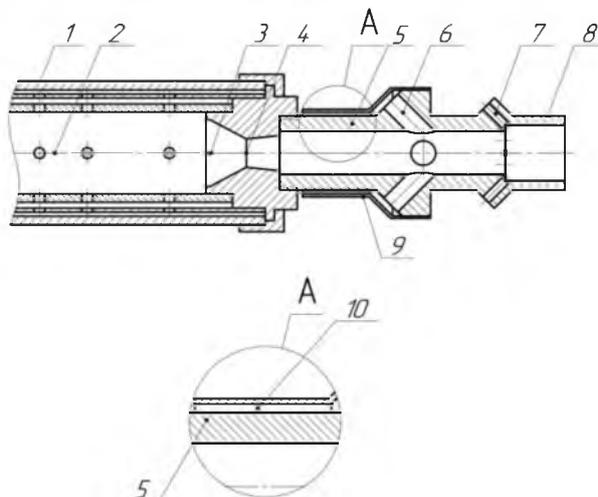
Для повышения эффективности работы горелки в предлагаемом устройстве происходит наращивание ее мощности. В насадок 4 факел подается из камеры сгорания 2 обогащенным, через форсуночный аппарат горелки 15, горючим. За счет трения струи о шероховатости внутренней стенки насадка 4, образованной наклонными эжекционными окнами, а также встречи с холодным эжектируемым, через эжекционные окна 5 атмосферным воздухом, в этом месте возбуждается мощный стационарный скачок уплотнения. Этим достигается быстрое (детонационное) горение и полное дожигание горючего, а также дальнейший разгон струи в цилиндрическом насадке 4 и, как следствие, повышение мощности газовой струи. Струя повышенной мощности и увеличенного диаметра из насадка 4, через выходное сопло 7, выбрасывается наружу, и идет на разрушение горной породы. Кожух 10 и, образованный им кольцевой канал 11, обеспечивает объем всасываемого воздуха через эжекционные окна 5 и охлаждения поверхности насадка 4, нагреваемого фронтом горения внутри скачка уплотнения насадка 4.

Отличительными признаками второй конструкции горелки по заявке №2018/0228.1 от 12.04.2018 г. является, обоснование рациональных параметров газовой струи, выходящей из сопла Лавалья во внутреннее отверстие насадка, в котором, из-за резкого расширения газовой струи, образуется турбулентность и, как следствие, – резкое повышение температуры газового потока.

На рисунке 4.20 представлено предлагаемое устройство, которое состоит из горелки 1, камеры сгорания 2 с соплом Лавалья 3, имеющей критическое сечение 4, за соплом Лавалья выполнен удлиненный цилиндрический насадок 5, расположенный соосно с соплом Лавалья 3, в котором выполнены эжекционные окна 6 и 7, под углом $45...50^{\circ}$ к оси насадка. Конец насадка 5 выполнен большего диаметра, и имеет также эжекционные отверстия 7 для всасывания

эжектируемого наружного воздуха, идущего на охлаждение выходного сопла 8.

Также для охлаждения поверхности насадка 5 в первой ступени – в области развития очага горения топливных компонентов внутри насадка, последний снабжен защитным наружным кожухом 10, имеющий кольцевой канал 9, между корпуса насадка 5 и кожуха 10, всасывается эжектируемый воздух, идущий на поддержания горения в скачке уплотнения и на охлаждения наружного диаметра насадка.



1 – горелка, 2 – камера сгорания, 3 – сопло Лавалья, 4 – критическое сечение сопла Лавалья, 5 – насадка, 6, 7 – эжекционные окна, 8 – выходное сопло, 9 – кольцевой канал, 10 – кожух

Рисунок 4.20 – Устройство для термического разрушения горных пород

Для повышения эффективности работы горелки, в частности, по разрушению горных пород, в предлагаемом устройстве происходит наращивание ее мощности. Высокоскоростная высокотемпературная струя горелки 1, обогащенная горючим, направляется в насадок 5 через сопло Лавалья 3, из камеры сгорания 2. При выходе из сопла Лавалья 3 струя горелки 1 резко расширяется в перфорационном насадке 5, поперечная площадь перфорационных отверстий которого в 2,5-3 раза больше площади критического сечения сопла Лавалья 4 горелки 1, причем в газовом потоке из-за резкого расширения внутреннего отверстия насадка, возникает турбулентность и, как следствие, резкое повышение температуры газовой струи.

При дальнейшем движения газового потока высокой температуры, за счет трения о шероховатости внутренней стенки насадка 5, образованной сверлением наклонных эжекционных отверстий 6 и 7, а также встречи с холодным, эжектируемым, через эжекционные окна 6, атмосферным воздухом, возбуждается мощный стационарный скачок уплотнения. Этим достигается быстрое (детонационное) горение и полное дожигание горючего и, как следствие, повышение мощности струи и, дальнейшего разгона её в цилиндрическом насадке 5.

Струя факела повышенной мощности и увеличенного диаметра из насадка 5, через выходное сопло 8, выбрасывается наружу, и идет на разрушение горной породы.

Другим направлением использования высокоскоростных высокотемпературных струй ракетных горелок (термоинструментов) является применения их для разрушения искусственных минеральных сред, например асфальтовых дорожных покрытий, для разогрева пластовой тяжелой нефти и битуминозных пород для извлечения из них нефтей [126], на эту конструкцию подана в РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК заявка на «Способ и устройство для разработки месторождений тяжелой нефти или битума», регистрационный номер №2018/0948.1 от 14.12.18 г. на получение патента на изобретение [127], на которую получена положительное решение формальной экспертизы.

4.4 Технико-экономическое обоснование применения новой конструкции огнеструйных рабочих органов для обработки каменных блоков

Внедрение керосино-кислородных и бензовоздушных термоинструментов для обработки строительных изделий из крепких горных пород позволило значительно повысить производительность труда и снизить себестоимость продукции. Однако, огнеструйная обработка гранитных блоков, в основном, вытеснена использованием дисковых алмазных пил или алмазных канатов. Но огнеструйные термоинструменты все еще используются при добыче гранитных блоков для проведения щелевых выработок и поверхностной обработки (пассировки) крупных блоков из крепких горных пород, изготовления постаментов, валов и др.

Нами разработаны более совершенные термоинструменты, значительно повысились их термодинамические показатели – скорость и мощность газового потока со снижением расходных и топливных компонентов до 30% и более. Термоинструменты с эжекционными насадками, в которых, за счет эжекции атмосферного воздуха, осуществляется полное догорания горючего в струе факела горелки и могут существенно повысить спрос на их применение.

Для оценки эффективности применения термоинструментов с эжекционными насадками как рабочих органов позиционных станков-манипуляторов для огневой обработки необходимо произвести сравнительный экономический анализ базовых и предлагаемых нами технологий. Расчет экономической эффективности внедрения механизированной огнеструйной обработки производится согласно методике экономической эффективности внедрения новой техники (Приложение Д) [128-130].

Расчет экономической эффективности использования огнеструйной горелки и манипулятора проведен для внедрения его на Куртинском карьере по добыче и обработке камня.

Расчет произведен в ценах 2018 года. При новом способе производят роспуск и окалывание заготовок с помощью ручного инструмента, а поверхностную обработку граней – на механизированной установке в боксе.

При скорости продольной подачи, равной 0,01...0,012 м/с, сбой горной породы будет равен 0,01 м/с, а при снятии припуска, равного 0,04 м, расчетное время, затраченное на обработку одного бортового камня при обработке лицевой, горизонтальной и торцевых поверхностей, составит 0,35 ч/м². На Куртинском карьере по добыче и обработке камня принята норма обработки 1 погонного метра бортового камня, равная 1 м² обработанной плоскости.

Ниже приведены существующие цены по изготовлению гранитных блоков [131].

Бордюрные камни – 15 000 тенге/пог.м

Гранитные блоки – от 50 000 тенге/куб.м

Гранитные плиты для мощения двора – 10000 тенге/кв.м

Плита гранитная «Скала» – от 32000 тенге/кв.м

Гранит Куртинская 600x300 – от 7700 тенге/кв.м

Гранит серый в крапинку – от 9700 тенге/кв.м

Гранит кирпичный термообожженный – 8000 тенге/кв.м

Плита гранитная Капустинского месторождения (Россия) – от 2500,00 рублей за кв.м.

На таблице Е1 и Е2 в Приложении Е представлены цены на изделия из гранита стандартных размеров и на камни бортовые (дорожный) [132].

В таблице 4.1 приведены показатели производительности при базовой и новой технологии изготовления каменных изделий. Затраты времени на механизированную термообработку определены расчетным путем.

Производительность манипулятора, равная 4000 м²/год, выбрана только на операции термообработки без учета затрат рабочего времени на выполнение вспомогательных операций и на механическую обработку (окальвание заготовки). Себестоимость продукции при базовой и новой технологии изготовления каменных изделий приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Показатели производительности труда

Показатели	Базовая технология	Новая технология
Затраты времени по операциям, ч/м ² : - погрузочно-разгрузочные работы	0,15	0,15
- роспуск заготовки	0,33	0,33
- окальвание заготовки	0,15	0,15
- термообработка изделий	0,92	0,35
Полное время изготовления 1 м ²	1,55	0,98
Полное время с учетом коэффициента использования рабочего времени, равного 0,7	2,21	1,40
Сменная производительность с учетом вспомогательных операций, м ² /смену	3,61	5,71
Годовая производительность с учетом вспомогательных операций, м ² /год	902,50	1427,70
Годовая производительность станка Механизированной обработки, м ² /год	-	4000,00

Таблица 4.2 – Сводная таблица себестоимости

Статья расходов	Базовая технология, тенге/м ²	Новая технология, тенге/м ²
Стоимость сырья	1667	1667
Стоимость материалов	487	487
Стоимость оборудования	250	357
Стоимость рабочей силы	228	145
Накладные расходы	456	290
ИТОГО: полная себестоимость	3088	2946

Ожидаемый экономический эффект, рассчитанный по формуле [128], на одну установку составит:

$$\text{Э} = (3088 \times 1,58 - 2946) \times 1427,7 \sim 2\,760\,000 \text{ тенге,}$$

где коэффициент учета роста производительности нового средства по сравнению с базовым равен

$$1427,5 : 902,5 = 1,58.$$

Экономия на текущих издержках эксплуатации и отчислениях от сопутствующих капитальных вложений принимаем равной нулю при одинаковом сроке службы термоинструментов.

В результате внедрения технологии механизированного изготовления каменных изделий из гранитных блоков огнеструйным способом с дистанционным управлением рабочими органами коренным образом улучшатся условия труда рабочих, повысится производительность труда, решаются вопросы защиты рабочих и окружающей среды от воздействия шума горелок.

Выводы по 4 разделу

1. Разработана методика технологических параметров огнеструйной обработки (разрушения) поверхности блоков из крепких горных пород, включающая: толщину отделяемой частицы; время отделения частиц от массива; линейную скорость разрушения; потребный тепловой поток; объемная производительность разрушения; продольную скорость перемещения обрабатываемого блока горной породы; производительность разрушения при грубом сбое; общую производительность разрушения.

2. В результате моделирования процесса разрушения горных пород термоинструментами с интенсификаторами горения, с использованием многофакторного эксперимента, получены уравнения регрессии для определения:

- тепловой мощности термоинструмента Q в зависимости от расхода горючего q ;

- дальнотойности факела термоинструмента L в зависимости от расхода топливных компонентов q ;
- объемной производительности разрушения W в зависимости от расстояния среза горелки L до поверхности пятна нагрева;
- глубины сбоя z в зависимости от продольной скорости v перемещения термоинструмента.

3. Выполнен анализ конструктивных особенностей термоинструментов с интенсификаторами горения для разрушения горных пород при их пассивировки (грубого сбоя) на базе которых разработаны новые конструкции термоинструментов, прошедших технологические испытания.

4. Экспериментально установлена эффективная зона разрушения горной породы по длине струи факела, составляющая 0,05...0,35 м, что обеспечивается бензовоздушной горелкой с насадкой – интенсификатором горения, при расходе топливных компонентов: бензина – 0,0035...0,0077 кг/с; воздуха – 0,127...0,254 кг/с, при коэффициенте избытка окислителя $\alpha_T = 0,7...1,1$.

5. По результатам диссертационных исследований, разработаны новые конструкции термоинструментов, на которые поданы в РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК 3 зарегистрированных заявки на «Устройство для термического разрушения горных пород» и «Способ и устройство для разработки месторождений тяжелой нефти или битума», регистрационные номера №2018/0227.1, №2018/0228.1 от 12.04.2018 г. и №2018/0948.1 от 14.12.18 г. на получение патентов на изобретение, которые, в настоящее время, прошли формульную положительную экспертизу.

6. Ожидаемая годовая экономическая эффективность внедрения термоинструментов с интенсификаторами горения для обработки крупных блоков из крепких горных пород составит 2760 тыс. тенге.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.

Основные научные и практические выводы, полученные в результате завершённых исследований, заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ современного состояния развития добычи и обработки природного камня из гранитов месторождений Казахстана, с применением огнеструйного способа разрушения. В результате анализа существующих конструкций бензовоздушных горелок в процессе их совершенствования, выявлено, что бензовоздушные горелки с интенсификаторами горения позволяют возбуждать в них детонационное горение и получение более мощной струи, обеспечивающей повышение на 30...50% производительность огнеструйного разрушения горных пород;

2. Рассмотрены особенности теплообмена при использовании сверхзвуковых газовых струй и основные термодинамические параметры высокоскоростного газового потока при термическом разрушении горных пород, выбрана термодинамическая модель системы «теплоноситель – порода», представляющая напряженно-деформированное состояние породы под действием теплового потока, позволяющая выполнить расчетные параметры их взаимодействия;

3. Осуществлено моделирование процесса огнеструйного разрушения горных пород термоинструментами с интенсификаторами горения с использованием многофакторного эксперимента, позволяющее получить уравнения регрессии для определения их режимных параметров работы;

4. Установлено, что в сверхзвуковом потоке, истекающим из сопла Лавала горелки в цилиндрическую перфорированную камеру возбуждения (насадок), трением о внутренние стенки насадка и контакта с холодным атмосферным воздухом, образуется мощный стационарный скачок уплотнения – ударная волна, питающаяся кислородом из эжектируемого, через перфорацию насадка, атмосферным воздухом, чем обеспечивается интенсивное догорание горючего и повышение тепловой мощности потока газа из сопла насадка;

5. Для определения параметров базовой горелки, построены графики зависимости теплового потока q , температуры газа на срезе сопла T_a , температуры в камере сгорания T_k и скорости истечения факела W от коэффициента избытка окислителя α_T при различных расходах горючего, позволяющие обосновать конструктивные и режимные параметры новой конструкции термоинструмента с эжекционным насадком: определить температуру смешанного потока; параметры выходного сечения сопла эжекционного насадка, диаметр свободной струи и ее длину;

6. Выполнено обоснование и расчет геометрических параметров новой конструкции бензовоздушного термоинструмента с эжекционным насадком, определены основные термодинамические параметры, а также основные геометрические размеры газоструйного эжектора с диффузором, изготовлен опытный образец горелки с газодинамическим насадком, прошедшей

технологические испытания при разрушении горных пород для обработки (пассировки) и резки блочного камня;

7. Принята модель разрушения горной породы методом крупного скола под действием разрушающих напряжений, установлены зависимости напряженного состояния разрушаемого слоя и найдены критерии разрушения от максимальных касательных напряжений $\tau_{xz} > [\tau_{xz}]$ и от нормальных растягивающих напряжений $\sigma_z \geq [\sigma_z]$;

8. Разработана структурная схема манипулятора промышленного четырехзвенного робота типа ПППВ, описываемая в виде матрицы однородного преобразования методом Денавита-Хартенберга в i -й системе координат, приведено решение уравнение динамики движения четырехзвенного манипулятора ПППВ методом Лагранжа-Эйлера, установлены аналитические зависимости четырехзвенного манипулятора ПППВ с учетом действующих сил и моментов и может быть положена в основу разработки промышленного образца манипулятора с огнеструйным рабочим органом для поверхностной обработки блочного камня из крепких горных пород;

9. Экспериментально установлено, что оптимальная скорость продольного перемещения термоинструмента четырехзвенного манипулятора, относительно обрабатываемого блока горной породы, находящаяся в пределах 0,005...0,015 м/с, рассчитываемая с погрешностью 10...15 %, а глубина сбоя h при этом составляет от 3,5 до $8 \cdot 10^{-3}$ м;

10. Разработана методика технологических параметров огнеструйной обработки (разрушения) поверхности блоков из крепких горных пород, включающая: толщину отделяемой частицы; время отделения частиц от массива; линейную скорость разрушения; потребный тепловой поток; объемную производительность разрушения; продольную скорость перемещения обрабатываемого блока горной породы; производительность разрушения при грубом сбое; общую производительность разрушения.

11. По результатам диссертационных исследований, разработаны новые конструкции термоинструментов, на которые поданы в РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК 3 зарегистрированных заявки на «Устройство для термического разрушения горных пород» и «Способ и устройство для разработки месторождений тяжелой нефти или битума», регистрационные номера №2018/0227.1, №2018/0228.1 от 12.04.2018 г. и №2018/0948.1 от 14.12.18 г. на получение патентов на изобретение, которые, в настоящее время, прошли формальную положительную экспертизу.

Оценка полноты решений поставленных задач

Выполненные исследования и результаты экспериментальных работ позволяют сделать заключение, что они соответствуют, в полной мере, основным задачам, поставленным в диссертационной работы, а именно:

- выполнен анализ современного состояния камнедобывающей отрасли добычи и обработки блочного камня из крепких горных пород;
- выполнено обоснование использования высокоскоростных огневых струй в технологических процессах и производствах;
- произведено исследование процессов, технологии и оборудования для

добычи и обработки блочного камня из крепких горных пород с применением огнеструйных горелок;

- выполнено обоснование параметров конструкции бензовоздушного термоинструмента с интенсификатором горения для разрушения крепких горных пород;

- проведены экспериментальные исследования новой конструкции бензовоздушного термоинструмента для обработки гранитных блоков;

- выполнено обоснование применения промышленного робота с огнеструйным рабочим органом для поверхностной обработки крупных блоков из крепких горных пород;

- опубликованные по теме диссертации научные работы отражают основное содержание диссертационной работы и соответствуют предъявляемым к ним требованиям. На все работы имеются ссылки в тексте диссертации.

Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов

В результате выполненных научно-исследовательских работ по расширению области использования сверхзвуковых высокоскоростных, высокотемпературных газовых струй в различных технологических процессах и производствах и, на основе теоретических и комплексных экспериментальных исследований процессов термического разрушения горных пород, выявлены закономерности влияния их свойств и параметров тепловых потоков на характер и производительность разрушения, изложены научно-обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение эффективности добычи блоков из крепких горных пород, имеющей важное значение для экономики страны.

Результаты диссертационной работы были внедрены на камнеобрабатывающем предприятии ИП «Титушин», на что получен Акт внедрения (Приложение Д).

Одновременно, предприятию ИП «Титушин» переданы:

- методика и технология поверхностной обработки (пассировки) блоков и резки щелевых выработок (грубой обработки) термоинструментом БВР-60М.

- новая конструкция термоинструмента БВР-60М с эжекционной насадкой, с внутренним диаметром 20(24) и ТРВ-12М1.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения.

Выполнен ориентировочный технико-экономический расчет эффективности на одну установку, который показал ожидаемую годовую экономическую эффективность внедрения термоинструментов с интенсификаторами горения для обработки крупных блоков из крепких горных пород составит более 2760 тыс. тенге.

Технико-экономическая эффективность проекта состоит из новизны технических решений, а именно создания новых конструкций термодинамического рабочего органа и реализации в нем нового способа горения, позволяющего использовать в эжекционной насадке, эжектированного атмосферного воздуха и догорания в нем несгоревшего горючего.

В данном случае имеем экономию воздуха, вырабатываемого компрессором, а это порядка 20...30 % от общего расхода.

Экономическая эффективность складывается также из повышения производительности разрушения огнеструйными горелками нового типа, составляющей до 50 и более процентов и социального эффекта – защите оператора и окружающей среды от вредного воздействия шума горелки (110...120 дБ) при механизированной обработке.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.

Выполненный анализ литературных источников, результаты теоретических и прикладных исследований, представленных в настоящей диссертационной работе позволяют сделать вывод о том, что диссертационная работа соответствует современному научно-техническому уровню. Все полученные результаты имеют корреляцию с литературными сведениями, дополняют известные данные, представляют собой разработку новой конструкции огнеструйных термоинструментов для обработки и резки крепких горных пород.

Научно-методический уровень представленной диссертационной работы отражает комплексность данных исследований, что подтверждается Актом внедрения результатов исследований в производство (Приложение Д).

Приведенные результаты достоверны и представляют научную ценность и расширяет область практического применения термических методов разрушения крепких горных пород термоинструментами, что подтверждено публикацией соответствующих научных трудов автора и обсуждением результатов на международных конференциях различного уровня.

Оригинальность и новизна исследований выражены в том, что установлена эффективная зона разрушения горной породы по длине струи факела, составляющая 0,05...0,35 м, что обеспечивается бензовоздушной горелкой с насадкой – интенсификатором горения, при расходе топливных компонентов: бензина – 0,0035...0,0077 кг/с; воздуха – 0,1057...0,228 кг/с, при коэффициенте избытка окислителя $\alpha_T=0,7...1,1$, что позволяет повысить их производительность разрушения на 30...50% при обработке блоков, горных пород и резке щелевых выработок; предложена структурная схема манипулятора промышленного четырехзвенного робота типа ПППВ, описываемая в виде матрицы однородного преобразования методом Денавита-Хартенберга в i -й системе координат и установлены аналитические зависимости четырехзвенного манипулятора ПППВ с учетом действующих сил и моментов (инерциальные, центробежные, кориолисовы и гравитационные).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Назарбаев Н.А. Послание Президента Республики Казахстан «Новые возможности развития в условиях четвертой промышленной революции» от 10 января 2018 года.
- 2 Ракишев Б.Р., Дауренбекова А.Н. Добыча блоков декоративного камня на карьерах Казахстана // Горный журнал Казахстана. - 2011. - №3. - с. 1-5
- 3 Синельников О.Б. Добыча природного облицовочного камня – М.: Изд-во РАСХН, 2005. – 245с.
- 4 Природный камень Казахстана: реалии и перспективы // Казахстанская правда, 18 мая 2007 г.
- 5 Carlo Montani. Stone 2007. World Marketing Handbook, 2007, II Sole 24 ORE Business Media S.r.l.
- 6 Алтынов Ж.Л. Создание комплекса манипуляционных устройств для изготовления изделий из крепких горных пород термомеханическим способом: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.05.06. – Алматы: КазНТУ, 2009. – 42 с.
- 7 Мендекеев Р.А. Научно-прикладные основы создания техники и технологий для камнедобывающей промышленности: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.05.06. – Бишкек: Кыргызско-Узбекский университет, 2008. – 46 с.
- 8 Чирков А.С. Добыча и переработка строительных горных пород: Учебник для вузов. - М.: Изд-во МГТУ, 2001. - 623 с.
9. О гранитах, мраморах и прочих облицовочных камнях Казахстана <http://www.graniteh.ru/info/kaz.asp>
- 10 Казахстанский гранит <http://pqd.ru/kazahstanskiy-granit>.
- 11 Поветкин В.В., Керимжанова М.Ф., Нурымов Е.К., Букаева А.З. Современное состояние добычи блочного строительного камня из крепких горных пород//Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века». – Донецк: МСМ, 2016. - Т. 2. – С.90-95.
- 12 Ракишев Б.Р., Бабин Ю.Н., Бобович В.С. и др. Добыча блоков горных пород средней и высокой крепости. – Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1990. – 94с.
- 13 Осколков В.Д. Облицовочные камни месторождений СССР. Справочное пособие. – М.: Недра, 1984. - 192 с.
- 14 Орлов А.М. Добыча и обработка природного камня. - М.: Стройиздат, 1977. - 349 с.
- 15 Поветкин В.В. Процессы и технология огнеструйной обработки блоков крепких горных пород: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.15.11. – Алматы: КазНТУ, 2001. – 42 с.
- 16 Бежанов Ф.Х. Свойства горных пород и интенсивность их термического разрушения // В кн.: Новые физические методы разрушения минеральных сред. - Л.: Недра, 1970. - С.12-19.
- 17 Поветкин В.В. Огнеструйная обработка гранитных блоков. – Алматы: КазНТУ, 2001. - 145с.

- 18 Беликов Б.П., Залесский Б.В., Розанов Ю.А., Санина Е.А., Тимченко И.П. Методы исследований физико-механических свойств горных пород // В сб.: Физико-механические свойства горных пород. - М.: Наука, 1964 г. – 142с.
- 19 Тюльнина М.В. Организационно-экономический механизм инновационного менеджмента на предприятиях по добыче и обработке природного камня: автореф. ... канд. экон. наук: 08.00.05. - М.: МГГУ, 2002. – 23 с.
- 20 Бакка И.Т., Ильченко И.В. Облицовочный камень. Геолого-промышленная и технологическая оценка месторождений. Справочник. - М.: Недра, 1992. – 303 с.
- 21 Научно-публистический журнал «Stone». Пер. с англ. – М.: 2008, - №2. - 85 с.
- 22 Сагунов Е.Г., Рахман В.Б., Дюсембаев А.Д. Облицовочные камни Казахстана. Атлас-каталог. – Алма-Ата: Казахстан, 1978. - 88 с.
- 23 Кузьяев Л.С. Исследование термобуримости крепких горных пород: автореф. ... канд. техн. наук. – М.: Моск. ин-т радиоэлектроники и горной электромеханики, 1965. - 13с.
- 24 Ягупов А.В., Покровский М.А., Васильев А.П., Варич М.С. Огневое бурение взрывных скважин. - М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.
- 25 А. с. 160019. СССР. Прибор для термической резки и обработки горных пород / Бричкин А.В., Генбач А.Н.; опубл. 14.01.1964. Бюл. №2. – 4 с.
- 26 Полевичек Е.П., Шкаринов Л.И. Воздушный термоотбойник - эффективный инструмент для обработки крепкого естественного камня. - М.: Журнал "Строительные материалы", 1965. - №12, - С.15-21.
- 27 Першин Г.Д., Голяк С.А., Уляков М.С., Караулов Н.Г., Сорокин И.С., Домнин В.Ю., Иштакбаев Р.Ф. Современные технологии добычи блочного гранита // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – Москва, 2014. - №12, - С.163-167.
- 28 Голдаев И.П., Половичек Е.П., Попов Н.Н., Фурсов А.П., Жердев Г.С. Опыт применения терморезаков ТРВ-1 для резки гранита в массиве // Сб. материалов ВНИИЭСМа. – Киев, 1971. – С.22-26.
- 29 Лебедев И.Е., Степанов А.В. Рабочий по добыче блочного камня. Под ред. М. Е. Культэ. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Стройиздат, 1987. - 119 с.
- 30 Голдаев И.П. Создание, исследование и внедрение газоструйных инструментов для термического разрушения горных пород: автореф. ... д-ра техн. наук. - М.: Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского, 1965. - 43 с.
- 31 Пат. 2381897 РФ. Устройство для распиловки камня алмазным канатом / Макарев Г.Г.; опубл. 20.02.2010, Бюл. №5. - 11 с.
- 32 Сычев Ю.И., Берлин Ю.Я. Распиловка камня. Учеб. для проф.-техн. училищ. - М.: Стройиздат, 1989. - 320 с.
- 33 Гуров М.Ю. Обоснование технологических параметров добычи и разделки гранитных блоков канатно-алмазными пилами: автореф. ... канд. техн. наук: 25.00.22, 25.00.20. - М.: Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2002. - 16 с.

34 Додис Я.М., Нифадьев В.И. Разрушение горных пород при бурении и взрывании. Учебное пособие. – Бишкек: КРСУ, 2006. - 374 с.

35 Григорьев Г.В. Обоснование режимов работы гидроструйного инструмента для обработки горных пород: автореф. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Тула: Тул. гос. ун-т, 2003. - 18с.

36 Поляков А.В. Разработка метода расчета эффективности процесса резания горных пород струями воды сверхвысокого давления и обоснование параметров устройства для их получения применительно к проходческим комбайнам: автореф. ... канд. техн. наук. 05.05.06. - Тула: Тул. гос. ун-т, 2006. - 20 с.

37 Першин Г.Д., Голяк С.А., Доможиров Д.В., Караулов Н.Г., Пшеничная Е.Г., Уляков М.С., Иштакбаев Р.Ф., Домнин В.Ю., Пивоварова К.А., Лобастов А.П. Современные способы подготовки гранитных блоков к выемке // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 1-4. – С. 655-658.

38 Москалев А.Н. Исследование и разработка способов интенсификации процессов термического бурения горных пород: автореф. ... д-ра техн. наук. – М.: Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского, 1971. – 30 с.

39 А.с. 1017504. СССР. Огнеструйная горелка / Ястребов Е.К., Стырон Б.К., Шерстюк Б.Ф.; опубл. 15.05.1983, Бюл. №18. – 3 с.

40 А.с. 454057. СССР. Реактивная горелка для огнеструйной обработки минеральных сред / Генбач А.Н., Сейтбаталов С.М., Бабин Ю.Н., Головкина Л.А.; опубл. 25.12.74, Бюл. №47. – 2 с.

41 А.с. 575418. СССР. Устройство для термического разрушения минеральных сред струями раскаленного газа / Аубакиров М.Г., Бобович В.С., Поветкин В.В., Сейтбаталов С.М., Федоров Б.В.; опубл. 28.11.77, Бюл. №37. - 3с.

42 А.с. 724720. СССР. Огнеструйная горелка для термического разрушения минеральных сред / Архипкин В.И., Поветкин В.В., Сеитов А.С., Спасенов М.И., Шапарев С.В.; опубл. 30.03.80, Бюл. №12. - 2 с.

43 Hamrick Joseph T., Rose Leslie C., Ignition process for downhole gas generation / World Energy System (Пат. 4053015. США, 1979).

44 А.с. 1209855. СССР. Устройство для термического разрушения твердых пород / Поветкин В.В., Сейтбаталов С.М., Тлеуов М.Г.; опубл. 07.02.86, Бюл. №5. - 3 с.

45 А.с. 1221346. СССР. Устройство для термического разрушения горных пород / Тлеуов М.Г., Поветкин В.В.; опубл. 30.03.86, Бюл. №12. - 3 с.

46 Пат. 15191 РК. Горелка термоинструмента / Генбач А.А., Беркинбаев Г.Д., Абитов К.А., Алшымбаева Р.Т.; опубл. 16.07.2007, Бюл. №7. – 5 с.

47 Ястребов Е.К. Повышение эффективности огнеструйного разрушения горных пород дожиганием топлив в призабойном пространстве: автореф. ...канд. техн. наук: 05.15.11. – Алма-Ата: Казах. политехн. ин-т им. В.И. Ленина, 1990. - 18 с.

48 Инновационный пат. 23135 РК. Устройство для термического разрушения горных пород / Поветкин В.В., Алипов К.С.; опубл. 15.11.10, Бюл. № 11. – 3 с.

49 Голдаев И.П., Полевичек Е.П., Попов Н.Н., Фурсов А.П., Сердев Г.С.. Термическое разрушение крепких горных пород воздушными газоструйными термоинструментами // В кн.: Новые физические методы разрушения минеральных сред. - Л.: Недра, 1970. - С.85-91.

50 Дмитриев А.П. и др. Основные показатели способа // В кн.: Термодинамические процессы в горных породах. - М.: 1967, - вып. 1, - 233 с.

51 Бурков Ю.П., Птицын В.М. Термическая обработка гранита. - Киев: Будивельник, 1966. - 39 с.

52 Михельсон Р.В., Беришвили Г.А. Новые методы изготовления блочного камня. - Тбилиси: Мецниереба, 1973. – 93 с.

53 Рахимов В.Р., Шифрин Е.И., Фазылов С.С. Совершенствование технологии добычи облицовочного камня. – Ташкент: Узбекистан, 1983. – 214 с.

54 Шапарев С.В. Определение технологических параметров процесса разрушения горных пород с различными свойствами при термообработке: автореф. ... канд. техн. наук: 05.15.11. – Алма-Ата: Казахский политехн. ин-т им. В. И. Ленина, 1987. - 19 с.

55 Кучерявый Ф.И., Крысин Р.С., Бурков Ю.П. Совершенствование технологии разработки гранитных карьеров. - Киев: Техника. 1966. - 267 с.

56 Першин А.П. Исследование тепловых параметров газовых струй горелок для термического разрушения горных пород. автореф. ... канд. техн. наук. - М.: Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского, 1964, - 18 с.

57 Фурсов А.А. Обоснование оптимальных параметров термического расширения взрывных скважин на карьерах железистых кварцитов: автореф. ... канд. техн. наук: 25.00.20. – М.: Моск. гос. гор. ун-т., 2003. - 22 с.

58 Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. - М.: Недра, 1978. - 304 с.

59 Бричкин А.В., Погреб В.И., Генбач А.Н. Оптимальный угол встречи газовой струи с поверхностью забоя при термическом бурении // Изв. вузов. Горный журнал, - Москва, 1963. - №12. - С.88-92.

60 Дмитриев А.П. Исследование физических основ и технических средств термического бурения взрывных скважин: автореф. ... д-ра техн. наук. - М.: Моск. горный ин-т, 1968. - 38 с.

61 Добровольский Г.Н. Исследование процесса термического бурения взрывных скважин на карьерах: автореф. ... канд. техн. наук. - М.: Моск. горный ин-т, 1967, - 15 с.

62 Шишкин Ю.Е. Исследование процесса термического разрушения неоднородных по тепловым свойствам горных пород: Автореф. ... канд. техн. наук. - М.: Моск. горный ин-т, 1970. - 17 с.

63 Голдаев И.П., Фурсов А.П. и др. Методика инженерного расчета воздушно-реактивных горелок термоинструментов // Изв. вузов. Горный журнал. – Москва, 1972, - №4, - С.76-81.

64 Килль И.Д. Исследование процессов разрушения горных пород под действием высокотемпературных газовых струй при бурении взрывных скважин на карьерах: автореф. ... канд. техн. наук. - М.: Моск. горный ин-т, 1967. - 22 с.

65 Бергман Э.Д., Дудолодов Л.С., Захарова В.В., Марцишевский Ю.В., Покровский Г.Н. Измерение температуры забоя при термическом бурении горных пород // В кн.: Новые физические методы разрушения минеральных сред. - Л.: Недра, 1970, - С.20-24.

66 Бергман Э.Д., Покровский Г.Н. Термическое разрушение горных пород плазмобурами. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1971. - 127 с.

67 Березовский Б.Г. Исследование термического метода добычи и обработки гранитов Армянской ССР: автореф. ...канд. техн. наук. - М.: Моск. горный ин-т, 1967. -14 с.

68 Тер-Азарьев И.А., Березовский Б.Г. Эффективность обработки твердых горных пород термическим способом. - М.: Стройиздат, 1967. - 91 с.

69 Ягупов А.В. Тепловое разрушение горных пород и огневое бурение. - М.: Недра, 1972. - 160 с.

70 Поветкин В.В., Керимжанова М.Ф., Букаева А.З. Применение сверхзвуковых термоинструментов при ремонте трубопроводов // Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века». – Донецк: МСМ, 2016. - Т. 2. – С.84-89.

71 Povetkin V.V., Khandozhko A.V., Bukayeva A.Z., Nurymov Y.K. Theoretical basics of flame-jet rock destruction // Vestnik KazNITU №2(120). – Almaty, 2017. – P.109-115.

72 Дмитриев А.П., Гончаров С.А., Германович Л.Н. Термическое разрушение горных пород. - М.: Недра, 1990, - 255 с.

73 Германович Л.Н., Дыскин А.В. Модель разрушения хрупкого материала с трещинами при одноосном нагружении // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1988. - № 2. - С.118-131.

74 Коваленко А.Д. Основы термоупругости: учебное пособие для механико-математических факультетов ун-тов / АН УССР, Институт механики. – Киев: Наукова думка, 1970. - 424 с.

75 Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 1. Производственные процессы: учебник для вузов. -4-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1985. - 509с.

76 Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 2. Технология и комплексная механизация: учебник для вузов. -4-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1985. – 549 с.

77 Малышева Н.А. Сиренко В.Н. Технология разработки месторождений нерудных строительных материалов: Учеб. пособие для вузов по специальности "Технология и комплексная механизация производства нерудных строит. материалов" - М.: Недра,1978. - 253 с.

78 Бакка Н.Т. Комбинированный способ отбойки гранитных блоков// Реферативная информация. Серия "Промышленность нерудных и неметаллорудных материалов" /ВНИИЭСМ. 1978. - Вып. 2. - С.23-24

79 Поветкин В.В., Букаева А.З., Базарбеков Ш.А. Технологические особенности способов отделения монолита от массива // Сборник трудов Международной научно-технической конференции Сатпаевских чтений «Научное наследие Шахмардана Есенова». – Алматы, 2017. – С.695-698.

- 80 Ракишев Б.Р., Бабин Ю.Н., Шерстюк Б.Ф., Бобович В.С. Техника и технология добычи гранитных блоков. – М.: Недра, 1989. – 197 с.
- 81 Yerlik Nurymov, Amina Bukayeva, Algazy Zhauyt, Vitaly Povetkin, Yerlan Askarov. Study of thermal stonecutting tools // Journal of Vibroengineering Procedia. – Latvia, 2016. - Vol. 8. - P. 22-27(Scopus).
- 82 Каталог алмазного камнеобрабатывающего инструмента фирмы «SEA Utensili Diamantati S.P.A.» - Itali: Cadelbosco Sopra, 1991. - 50 с.
- 83 Бакка Н.Т. Рациональные области использования термогазоструйного резания гранита//Экспресс - информация. Серия "Промышленность нерудных и неметаллорудных материалов"/ ВНИИЭСМ.1985. - Вып. 5.- С.13 -14.
- 84 Бабин Ю.Н., Бобович В. С. Проходка щелевых выработок в гранитном массиве // Экспресс - информация. Серия "Промышленность нерудных и неметаллорудных материалов" /ВНИИЭСМ. 1986. - Вып. 1. - С.5 -8.
- 85 Черепанов Г.П., Ершов Л.В. Механика разрушения. - М.: «Машиностроение», 1977 г. - 224 с.
- 86 Дягтяренко Н.В. Исследование и разработка технологии добычи гранитных блоков при комбинированных способах подготовки их к выемке: автореф. ... канд. техн. наук: 05.15.03. - М.: 1983. - 22 с.
- 87 А.с. 417300. СССР. Способ обработки строительного камня / Поветкин В.В., Генбач А.Н., Сейтбаталов С.М., Михеев С.В.; опубл. 28.02.74, Бюл. №8. - 2 с.
- 88 Генбач А.Н., Поветкин В.В., Сейтбаталов С.М. и др. Механизированная добыча и разделка блоков на Янцевском гранитном карьере // В кн. Труды Всесоюзн. научной конф. по физике горных пород и процессов. – М.: МГИ, 1974. – С.123-124.
- 89 Поветкин В.В., Нурымов Е.К., Букаева А.З., Серменов А.И. Совершенствование огнеструйного способа резки горных пород при добыче блочного камня из гранитов // Журнал «Поиск», - Алматы, 2017. - №1(1). - С. 176-182.
- 90 Поветкин В.В., Букаева А.З. Разработка термоинструментов с интенсификаторами горения для разрушения крепких горных пород при добыче блочного камня // Студенческий научно-технический журнал «Инженер». - Донецк, 2018. - №1(25). - С.82-85.
- 91 Инновационный пат. 29758 РК. Термический резак для резки камня с двумя соплами // Поветкин В.В., Аскарров Е.С., Поветкин А.В., Шуханова Ж.К.; опубл. 15.04.15, Бюл. №4. – 3 с.
- 92 А.с. 1383875. СССР. Устройство для термического разрушения горных пород // Москалев А.Н., Поветкин В.В. и др.; опубл. 22.11.87, Бюл. №10. – 3с.
- 93 Povetkin V.V., Khandozhko A.V., Bukayeva A.Z., Nurymov Y.K. Study of the application high velocity thermal spraying tools used in technological processes and production // News of the academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. - Almaty, 2017. - №5. - P.190-201 (Scopus).

94 Поветкин В.В., Букаева А.З. Методика расчета основных параметров горелки термоинструмента // Студенческий научно-технический журнал «Инженер». - Донецк, 2018. - №1(25). - С.86-88.

95 Поветкин В.В., Керимжанова М.Ф., Букаева А.З. Разработка термодинамического бура для разрушения крепких горных пород // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». - Донецк, 2017. - Выпуск 4(59). – С.56-63.

96 Янтовский Е.И. Потоки энергии и эксергии. – М.: Наука, 1988. – 144 с.

97 Поветкин В.В. Теоретические основы расчета потоков тепловой энергии при разрушении горной породы термическим способом // «Поиск» Научный журнал МО РК. – Алматы, 1998, - №4. – С.20-25.

98 Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. - М.: Изд. Акад. наук СССР, 1963. - 255 с.

99 Синярев Г.Б., Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. - М.: Оборонгиз, 1955. - 488 с.

100 Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: Учеб. руководство: Для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит, 1991. - 600 с.

101 Шетинков Е.С. Физика горения газов. - М.: Наука, 2012. - 371 с.

102 Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. - М.: Физматгиз, 1963. – 175с.

103 Нетлетон М. Детонация в газах: Пер с англ. Ермолаева Б.С., Фролова С.М.; Под ред. Гвоздевой Л.Г. - М.: Мир, 1989, - 280 с.

104 Зельдович Я.Б. Теория детонации. - М.: Медиа, 2012. – 136 с.

105 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е, перераб. и доп. - М.: «Энергия», 1975. - 488 с.

106 Соколов Е.Я. Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. - М: Энергоатомиздат, 1989. - 350 с.

107 Поветкин В.В., Спасенов М., Миронов Ю.К., Зайцев В.Ф. К вопросу создания машин для добычи и обработки блочного камня // Сборник тезисов докладов XVII научно-технической конференции. – Алма-Ата, 1984. – С.140-145.

108 Поветкин В.В., Алтынов Ж.Л., Орлова Е.П., Букаева А.З. Огнеструйная обработка блочного камня на четырехзвенном манипуляторе // Горный журнал Казахстана. - Алматы, 2018. - №6. - С.14-19.

109 Поветкин В.В., Федоров Б.В. Теоретическое обоснование метода крупного скола при термической обработке гранитных блоков // Сборник «Совершенствование процессов разрушения горных пород». – Алма-Ата: Изд. КазПТИ им.В.И.Ленина, 1985. – С.158-163.

110 Крахмалев О.Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов: монография. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2012. – 210 с.

111 Алтынов Ж.Л. Особенности составления динамической модели манипуляционного робота для обработки каменных изделий // Материалы

Междунар. научно-технической конф. «Инновации в образовании, науке и технике». 22 июня 2006 г. - Бишкек: КГТУ им. И.Раззакова, 2006. - С.121-124.

112 Алтынов Ж.Л., Байгунчечков Ж.Ж., Омаров К.А. Динамический анализ параллельного манипулятора с функционально независимыми приводами позиционирующего типа // VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, 23-29 августа 2001 г. – Пермь, 2001. – С.38-39.

113 Терешин В.А. Об автоматическом алгоритме исследования динамики промышленных роботов // Сборник научных трудов ЛПИ. – Л.: 1985. - №410. – С.49-55.

114 Алтынов Ж.Л. Об автоматизации исследования динамики робота-манипулятора, применяемого в горной промышленности // «Ізденіс-Поиск» Научный журнал МОН РК. – Алматы, 2009. - №2. – С.305-317.

115 Поветкин В.В., Алтынов Ж.Л., Нурымов Е.К., Исаева И.Н., Букаева А.З. Методика оценки сложных систем с позиций надежности // Сборник статей по материалам XII международной заочной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке» 2 часть, г. Харьков. - Д.: научно-информационный центр «Знание», 2016. – С.74-80.

116 Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии»: учебное пособие для вузов. - СПб: Химиздат, 2003. - 608 с.

117 Поветкин В.В. Методика расчета параметров процесса огнеструйной обработки на механизированных установках // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Горное дело в Казахстане. Состояние и перспективы». - Алматы: ЦАГС, 2000. – С.10-15.

118 Поветкин В.В., Букаева А.З., Нурымов Е.К. Воздействие высокоскоростного газового потока струи горелки при резке гранитных блоков // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». - Донецк, 2017. - Выпуск 3(58). - 50-58 с.

119 Поветкин В.В., Букаева А.З., Хандожко А.В. Использование бензовоздушных горелок для добычи и обработки блочного камня // Научноёмкие технологии в машиностроении. - Брянск, 2017. - № 12. – С.8-14.

120 Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. - М., Машиностроение, 2016. - 461 с.

121 Тасыбаев М.М. Основы расчета параметров и создание огнеструйного оборудования для ремонта дорог с асфальтобетонным покрытием: автореф. ... канд. техн. наук: 05.05.04. – Алматы: КазНТУ, 2005. – 26 с.

122 Поветкин В.В., Букаева А.З. Устройство для термического разрушения горных пород. Регистрационный № 2018/0227.1 от 12.04.2018.

123 Поветкин В.В., Букаева А.З. Устройство для термического разрушения горных пород. Регистрационный № 2018/0228.1 от 12.04.2018.

124 А.с. 166292. СССР. Устройство для термического разрушения горных пород / Климешов В.П., Рудяк С.М., Синдеев П.Р.; опубл. 19.11.64, Бюл. №22. - 2 с.

125 Инновационный пат. 20976 РК. Устройство для термического разрушения горных пород / Поветкин В.В., Алипов К.С., Москалев А.Н., Поветкин А.В., Алтынов Ж.Л.; опубл. 16.03.2009, Бюл. №11. – 3 с.

126 Поветкин В.В., Керимжанова М.Ф., Букаева А.З., Асан А.Е. Инновационные технологии и оборудование в нефтедобычи // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Технология и техника бурения скважин», Геологоразведочное и нефтегазовое дело XXI веке: технологии, наука, образование. - Алматы, 2016. – С.218-225.

127 Поветкин В.В., Орлова Е.П., Букаева А.З. Способ и устройство для разработки месторождений тяжелой нефти или битума. Регистрационный № 2018/0948.1 от 14.12.2018.

128 Кессель Л.А. Экономическая эффективность новой технологии и методы ее определения. - М.: ГосИНТИ, 1976. – 215 с.

129 Инструкция по оценке экономической эффективности промышленных роботов. – М.: НИИМаш Минстанкопрома, 1983. – 52 с.

130 Инструкция по оценке экономической эффективности создания и использования автоматических манипуляторов с программным управлением (промышленных роботов). – М.: НИИМаш Минстанкопрома, 1983. - 102 с.

131 Гранитные блоки в категории гранит в Казахстане <https://satu.kz/Granitnye-bloki.html?category=131202>.

132 Жетису гранит: прайс лист <http://zhetysu-granit.kz/prais-lis>.

Приложение А

Таблица А1 – Характеристики основных топлив для термоинструментов

Наименование	Средний элементный состав			Молекулярный вес, М, кг/к.моль	Теплотворная способность QМ, ккал/кг (кДж/кг)
	С	Н	О		
Автобензин	0,855	0,145	-	110...120	10500 (53995)
Керосин освет.	0,858	0,135	0,004	150...165	10080 (42200)
Дизельное топливо	0,858	0,135	0,007	180...200	10150 (42530)

Примечание: Кроме того, допустимо применение дизельного топлива для тихоходов (соляровое масло), пропана, бутана и их смесей, а также природного газа (типа метан)

Показатель изоэнтропы n для давлений в камере сгорания от 5 до 30 ат или 0,5...3 МПа колеблется (таблица А2).

Таблица А2 – Значение показателя изоэнтропы в камере сгорания и коэффициента избытка окислителя

Топливо	α_T	n
Бензин-воздух	0,7...1,0	1,25...1,27
	1,0...3,0	1,25...1,34
Керосин-кислород	0,7...1,0	1,08...1,13

На основании расчетов установлено, что между η_α и α_T существует линейная зависимость:

$$\eta_\alpha = 1,32 \alpha_T - 1,32, \quad (\text{А.1})$$

где: α_T – коэффициент избытка окислителя, $\alpha_T = 1,0$

Коэффициент $\eta_{дис}$ находится аналитически, путем определения состава продуктов сгорания без и с учетом диссоциации.

Приложение Б

Акты производственных испытаний

АКТ

Производственных испытаний термонструментов для поверхностной обработки гранитных блоков из крепких горных пород методом крупного скола

г.Алматы

16.03.2018

Комиссия в составе представители от НАО КазНИТУ имени К.И. Сатпаева профессор Поветкин В.В., докторант Букаева А.З. и представители ИП «Титушин» директор Титушин Р.Н., операторы Фурманов П.В., Титушин Н.А. провели промышленные испытания термонструмента БВР-60М с эжекционной насадкой с внутренним диаметром 20/24.

Техническая характеристика термонструмента:

Расход воздуха - 5-6 м³/мин;

Расход горючего (бензин 50% + дизельное топливо 50%) - 20-25 л/час;

Диаметр сопла - 16 мм;

Диаметр сопла насадка - 20 (24) мм;

Длина факела - 40-45 см;

Скорость резки - 0,5-1,0 см/с;

Площадь резки - 2,5-3,0 м²/час.

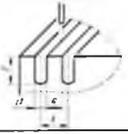
Обработка при крупном сколе осуществлялась бензовоздушным термонструментом БВР-60М с эжекционной насадкой. Зависимость глубины резания от скорости перемещения газового потока горелкой БВР-60М представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Таблица технологических параметров резки щелевых выработок

Гранит	Глубина резания в мм от подачи горелки м/мин					
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Курдайский	100	80	70	60	50	35
Куртинский	85	60	40	35	30	20

Производительность пассивки блоков осуществлялась при скорости перемещения горелки вдоль поверхности блока со скоростью $V_{np} = 0,5, 1,0, 1,5$ см/с, при этом образовывалась щелевая выработка глубиной 0,05-0,07 м и шириной 0,07 м. Ширина перемычки составляла 0,04-0,06 м. Ниже в таблице 2 приведены данные крупного скола (Куртинский гранит).

Таблица 2 – Опытные данные крупного скола (Куртинский гранит)

Наименование работ	Скорость V_{np} , см/с	Расстояние между канавками L , мм	Ширина канавки l_1 , мм	Глубина канавки z , мм	Ширина перемычки R , мм	Массовый сбой, см ³
Грубая обработка	-	-	-	-	-	2000-2500
Нарезка канавок 	0,5	130	70	70	60	3500-4000
	1,0	110	60	35	50	
	1,5	90	50	30	40	
Чистовая теска	-	-	-	-	-	1000-1500

Результаты производственных испытаний огнеструйных термоинструментов установлено, что большинство горных пород хорошо разрушаются термическим способом с производительностью, значительно превышающей механическую обработку. Удельная производительность по сбою горных породы при термической обработке блоков бензовоздушными горелками без насадка равна $90 \div 150$ кг/ч, а керосино-кислородными – $150 \div 300$ кг/ч, бензовоздушными горелками с насадкой – $150 \div 350$ кг/ч.

Предложенная новая конструкция термоинструмента БВР-60М с эжекционной насадкой может быть рекомендована для внедрения в производство, для поверхностной обработки крепких горных пород и проведения щелевых выработок при грубом сбое.

Директор ИП «Титушин»
Операторы



Титушин Р.Н.

Фурманов П.В.

Титушин Н.А.

От НАО «КазНИТУ имени К.И.Сатпаева»

Поветкин В.В.

Букаева А.З.

А К Т

Производственных испытаний термонструментов для поверхностной обработки гранитных блоков из крепких горных пород и проведение щелевых выработок

г. Алматы

12.10.2017

Комиссия в составе представители от НАО КазННТУ имени К.И. Сатпаева: профессор Поветкин В.В., докторанты Букаева А.З., Нурымов Е.К. и представители ИП «Титушин» директор Титушин Р.Н., операторы Фурманов П.В., Титушин Н.А. провели промышленные испытания термоинструмента ТРВ-12М1 с эжекционной насадкой с внутренним диаметром 20/22.

Гранит - Куртинского месторождения.

Техническая характеристика термоинструмента:

Расход воздуха - 2,5-3,5 м³/мин;

Расход горючего (бензин 50% + дизельное топливо 50%) - 12-17 л/час;

Диаметр сопла - 13 мм;

Диаметр сопла насадка - 20 (22) мм.

В результате испытания было установлено:

Длина факеля горелки - 25-30 см;

Скорость резки - 0,5-1,0 см/с;

Площадь резки - 1,5-2,0 м²/час;

Производительность по сбюю при поверхностной обработке - 150-200 кг/ч.

Выводы:

Конструкция термоинструмента для поверхностной обработки и резки щелевых выработок обеспечивает рабочие режимы резки в пределах 0,5-1,2 см/сек, при глубине щели 0,05-0,07 м/с.

Термоинструмент ТРВ-12М1 с эжекционной насадкой 20/22 мм, в результате испытания показал высокую надежность, легкий запуск в работу. Были испытаны три насадки с дожиганием горючего в эжектируемом воздухе цилиндрической насадки с перфорационными отверстиями. Производительность по сбюю превосходит существующие конструкции термоинструментов в 2,5-3,0 раза.

Конструкционная схема термоинструмента ТРВ-12М1 с эжекционными насадками может быть положена в основу разработки конструкции промышленных образцов терморезака для обработки и резки гранитных блоков, создания рабочего органа машины для резки щелевых выработок и внедрения их в производство камнеобрабатывающих предприятий.

Предложенная новая конструкция термоинструмента ТРВ-12М1 с эжекционной насадкой может быть рекомендована для внедрения в производство, для поверхностной обработки крепких горных пород и проведения щелевых выработок при грубом сбюе.

Директор ИП «Титушин»

Операторы

От НАО «КазННТУ имени К.И.Сатпаева»



Титушин Р.Н.

Фурманов П.В.

Титушин Н.А.

Поветкин В.В.

Букаева А.З.

Нурымов Е.К.

Приложение В

Решение обратной задачи кинематики для четырехзвенного манипулятора типа ПППВ

По данному алгоритму, приведено решение обратной задачи кинематики для четырехзвенного манипулятора типа ПППВ.

Рассмотрим манипулятор, структурная схема которого изображена на рисунке 3.24, состоящий из трех поступательных и одной вращательной кинематических пар.

Составим таблицу В1 из параметров сочленений манипулятора.

Таблица В1 – Параметры сочленений манипулятора

Звено	Тип пары	θ_i	d_i	α_i	a_i	$Sin\alpha_i$	$Cos\alpha_i$
1	поступательная	0°	d_1	-90°	a_1	-1	0
2	поступательная	90°	d_2	-90°	0	-1	0
3	поступательная	-90°	d_3	0°	0	0	1
4	вращательная	θ_4	0	90°	a_4	1	0

Затем, используя обобщенные преобразования для каждого сочленения, получаем

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & A_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 A_4 &= \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & a_4 C_4 \\ S_4 & 0 & -C_4 & a_4 S_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

Для того, чтобы получить T -матрицы нужно найти произведения матриц A_i по формуле $T_i^j = A_i \cdot A_{i+1} \cdot \dots \cdot A_j$, а именно:

$$\begin{aligned}
 A_1 A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & a_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ -1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & A_1 A_2 A_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -d_1 + a_1 \\ 1 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 A_1 A_2 A_3 A_4 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -d_3 + a_1 \\ C_4 & 0 & S_4 & a_4 C_4 + d_2 \\ -S_4 & 0 & C_4 & -a_4 S_4 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

T – преобразование, относящееся к выходной звене такое, что начало системы координат рабочей точки имеет вектор положения $p=[p_x, p_y, p_z]$. С началом координат связана декартова прямоугольная система координат, ориентация которой определяет ориентацию рабочего инструмента. Векторы a , o и n образуют правостороннюю систему координат, т. е. $a \times o = n$, $o \times n = a$ и $n \times a = o$. Заметим, что в этом случае

$$T_i = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.3})$$

Матрица (B.3) полностью известна, тогда как четыре переменных d_1, d_2, d_3, θ_4 являются искомыми неизвестными. Приравнявая элементы матрицы (B.2) к элементам (B.3), получаем следующие 12 уравнений для определения вектора углов и перемещений в сочленениях:

$$n_x = 0, \quad n_y = C_4, \quad n_z = -S_4, \quad (\text{B.4})$$

$$o_x = -1, \quad o_y = 0, \quad o_z = 0,$$

$$a_x = 0, \quad a_y = S_4, \quad a_z = C_4, \quad (\text{B.5})$$

$$p_x = -d_3 + a_1, \quad (\text{B.6})$$

$$p_y = a_4 C_4 + d_2, \quad (\text{B.7})$$

$$p_z = -a_4 S_4 + d_1, \quad (\text{B.8})$$

где для краткости использованы следующие обозначения:

$$C\theta_i = C_i = \text{Cos}\theta_i, \quad S\theta_i = S_i = \text{Sin}\theta_i.$$

Чтобы получить решения, из (B.4) получаем

$$\theta_4 = \arccos(n_y).$$

Решения являются неустойчивыми и плохо обусловленными по следующим причинам:

1. Функция \arccos неудобна тем, что точность вычисления её значения зависит от этого значения;

2. В точках, где $\sin\theta_4$ принимает близкие к нулю значения, т.е. при $\theta_4 \approx 0^\circ$ или $\theta_4 \approx 180^\circ$, они либо не определены, либо дают низкую точность вычислений угла θ_4 .

Для вычисления угла θ_4 , значения которого лежат в пределах $-\pi \leq \theta_4 \leq \pi$, воспользуемся функцией арктангенса, вычисляющей значение с учетом принадлежности аргумента соответствующему квадранту.

Из (B.4) и (B.5)

$$\theta_4 = \arctg(-n_z/n_y). \quad (\text{B.9})$$

Эта функция определена следующим образом:

$$\begin{cases} 0^\circ \leq \theta_4 \leq 90^\circ, & \text{если } x > 0, y > 0 \\ 90^\circ \leq \theta_4 \leq 180^\circ, & \text{если } x < 0, y > 0 \\ \theta_4 = \arctg(y/x) & -180^\circ \leq \theta_4 \leq -90^\circ, & \text{если } x < 0, y < 0 \\ -90^\circ \leq \theta_4 \leq 0^\circ, & \text{если } x > 0, y < 0. \end{cases}$$

Теперь, из формул (В.6), (В.7) и (В.8) находим линейные перемещения для первого, второго и третьего звеньев:

$$\begin{aligned} d_1 &= p_z + a_4 S_4, \\ d_2 &= p_y - a_4 C_4, \\ d_3 &= -p_x + a_1. \end{aligned}$$

Полученные выражения решают вопрос об определении обобщенных координат механизма манипулятора по заданному положению выходного звена. Если вычислить значения обобщенных координат, которые будут реализованы системой управления манипулятора, то его рабочая точка будет занимать предписанные положения в пространстве, т.е. рассмотренная задача решает вопрос программирования этого манипулятора при позиционном управлении.

Пространственное движение твердого тела общего вида определяется шестью независимыми параметрами, следовательно, на движение выходного звена механизма наложено одно общее условие связи. Этим условием связи может быть выражение (В.9), которое учитывается при решении вопроса о возможности применения рассматриваемой схемы манипулятора в заданной технологической операции. Неиспользованные уравнения служат для проверки полученных значений обобщенных координат.

Для теоретического изучения динамики манипуляционных роботов, определения конструктивных параметров и законов управления необходимо иметь расчетные механические модели, с достаточной точностью описывающие свойства реальных роботов. Выбор расчетной модели в каждом конкретном случае определяется кинематической схемой манипулятора, механическими свойствами (инерционными, упругими, диссипативными и т.п.) его деталей, узлов, типом и характеристиками приводов, а также необходимой точностью производимых расчетов.

В исследованиях динамики манипуляционных роботов одним из возможных методов описания динамической модели является метод, основанный на использовании уравнений Лагранжа второго рода. Этот метод применим для любых голономных механических систем с конечным числом степеней свободы, в том числе и для систем, содержащих деформируемые элементы (пружины, упругие стержни и т. п.), если можно пренебречь их инерционностью.

Вывод уравнений динамики движения манипулятора методом Лагранжа-Эйлера отличается простотой, единством подхода и приводит к системе нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка и отражают эффекты, связанные с действием сил инерции, обусловленных ускоренным

движением звеньев, действием кориолисовых и центробежных сил, а также действием сил тяжести. Совместное использование матричного преобразования Денавита-Хартенберга и метода Лагранжа приводит к компактной векторно-матричной форме уравнений движения, удобной для аналитического исследования и допускающей реализацию на ЭВМ. Если известны решения обратной задачи кинематики, то и известны обобщенные координаты, позволяющие придать рабочей точке положение и ориентацию относительно базовой системы координат.

Уравнения движения четырехзвенного манипулятора методом Лагранжа-Эйлера основаны на использовании уравнения

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = \overline{1,4}, \quad (\text{B.10})$$

где L – функция Лагранжа, $L=K-P$;

K – кинетическая энергия манипулятора;

P – потенциальная энергия манипулятора;

q_i – обобщенные координаты манипулятора;

\dot{q}_i – первая производная по времени обобщенных координат;

Q_i – обобщенные силы (или моменты), создаваемые в i -том сочленении для реализации заданного движения i -го звена.

Для того, чтобы воспользоваться уравнениями, необходимо знать кинетическую энергию рассматриваемой физической системы, а следовательно, и скорости всех ее точек с учетом движения всех сочленении манипулятора.

Исследовались режимы позиционирования при одновременной обработке трех степеней подвижности из нулевого состояния в положение, при котором третья поступательная кинематическая пара (КП) приняла другое крайнее положение и вращательная КП повернута на 90° .

На данных движениях прослеживаются упрощенные (квазистатические) критериальные оценки

$$\delta R = a/t_n^2, \quad t_3 = \chi^{-1} \ln(a_n / \Delta t_n^2), \quad Q_j = d_j / t_n^2, \quad (\text{B.11})$$

где δR – максимальное отклонение рабочего органа от заданной траектории, мм; $a = 3,2 \text{ мм} \cdot \text{с}^2$; t_n – время позиционирования, с; t_3 – время затухания переходных процессов, с; $\chi = 11 \text{ с}^{-1}$; $a_n = 0,35 \text{ мм} \cdot \text{с}^2$; Δ – требуемая точность движения на траектории, мм; Q_j – динамическая нагрузка в j -м приводе, Н·м; $d_{123} = (3,1; 2,5; 1,2) \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$. При уменьшении времени отработки t_n возрастает время затухания переходных процессов. Существует критическое время позиционирования $t_n = t_{кр}$, при котором суммарное время $t_n + t_3$ оказывается наименьшим $t_{кр} = 2/\chi$.

Для четырехзвенного манипуляционного робота в данном режиме работы $t_{кр} = 0,2 \text{ с}$.

Приложение Г

Акт лабораторных испытаний

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по перспективному
развитию вуза



Киричек А.В.

АКТ

лабораторных испытаний процесса нанесения плазменных покрытий с помощью
промышленного робота FANUC ARC Mate 100iC

г.Брянск

«20» 06 2018г.

Мы, нижеподписавшиеся, начальник отдела «Модульного технологического оборудования» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск, Россия), д.т.н., доцент Хандожко А.В. и представитель НАО «Казахский национальный исследовательский университет имени К.И.Сатпаева» (г.Алматы, Казахстан), PhD докторант Букаева А.З., составили настоящий акт испытаний в лабораторных условиях процесса нанесения плазменных покрытий с помощью промышленного робота FANUC ARC Mate 100iC. Программа управления промышленным роботом составлена с учетом рекомендаций Букаевой А.З. по программированию с учетом динамических характеристик робота и технологического устройства.

Эксперименты показали:

1. В ходе наплавки получен слой материала удовлетворительного качества.
2. Фактическая траектория движения робота совпадает с программируемой с достаточной для процесса наплавки точностью.
3. Вносимые поправки в управляющую программу по учету динамики процесса благоприятно сказываются на технологическом процессе — уменьшаются колебания при изменении направления движения и при изменении величины скорости движения.
4. Промышленный робот позволяет с точки зрения технологических возможностей и техники безопасности использование в качестве рабочего органа термоинструментов с высокоскоростными высокотемпературными струями.

Представитель от ФГБОУ ВО «БГТУ»

Представитель от НАО «КазНИТУ»

Начальник отдела «МТО», д.т.н., доцент
Хандожко А.В.

PhD докторант каф. «ССиТМ»
Букаева А.З.

Приложение Д

Акт внедрения результатов исследований

АКТ

Внедрения результатов исследований, полученных в диссертационной работе Букаевой Амины Захаровны, выполненной по теме «Исследование и разработка конструкции термодинамического рабочего органа для поверхностной обработки блоков из крепких горных пород»

г.Алматы

20.04.2018

Мы, нижеподписавшиеся, представители от НАО «КазНИТУ имени К.И. Сатпаева» д.т.н., профессор кафедры «Стандартизация, сертификация и технология машиностроения» Поветкин В.В., докторант Букаева А.З. и представители ИП «Титушин» директор Титушин Р.Н., операторы Фурманов П.В., Титушин Н.А., рассмотрели представленную диссертационную работу Букаевой А.З. и в результате пришли ко мнению - полученные научные и практические результаты выполненной диссертационной работы передать для внедрения на камнеобрабатывающее предприятие ИП «Титушин».

Представители НАО «КазНИТУ имени К.И.Сатпаева» передают следующие полученные научные и практические результаты, выполненной диссертационной работы Букаевой А.З. на тему «Исследование и разработка конструкции термодинамического рабочего органа для поверхностной обработки блоков из крепких горных пород» для внедрения в производство:

- методику и технологию поверхностной обработки (пассировки) блоков и резки щелевых выработок (грубой обработки) термоинструментом БВР-60М.
- новую конструкцию термоинструмента БВР-60М с эжекционной насадкой с внутренним диаметром 20(24).

Техническая характеристика термоинструмента:

Расход воздуха - 5-6 м³/мин;

Расход горючего (бензин 50% + дизельное топливо 50%) - 20-25 л/час;

Диаметр сопла - 16 мм;

Диаметр сопла насадка - 20 (24) мм;

Длина факела - 40-45 см;

Скорость резки - 0,5-1,0 см/с;

Площадь резки - 2,5-3,0 м²/час.

Выводы. Результаты диссертационной работы Букаевой А.З. переданы для внедрения в производство:

- методика и технология поверхностной обработки (пассировки) крепких горных пород и проведения щелевых выработок при грубом сбое;
- термоинструмент новой конструкции БВР-60М с эжекционной насадкой для проведения широких производственных испытаний и внедрения в производство.

Директор ИП «Титушин»

Операторы

От НАО «КазНИТУ имени К.И.Сатпаева»



Титушин Р.Н.

Фурманов П.В.

Титушин Н.А.

Поветкин В.В.

Букаева А.З.

Приложение Е

Цены на изделия из гранита и на камни бортовые

Таблица Е1 – Цены на изделия из гранита стандартных размеров: 300×300мм, 300×600мм, 400×600мм, 400×400мм, 600×600мм

п/п	Наименование гранита	Вид обработки	Толщина, мм	Цена за 1м ² , тенге Без НДС	Цена за 1м ² , тенге с НДС
1	Капал-Арасан серый, мелкозернистый	термообработанный	20	10 200	11 424
			30	12 200	13 664
2	Куртинский коричневый, мелкозернистый	термообработанный	20	10 200	11 424
			30	12 200	13 664
3	Жельтау № 11 красный, крупнозернистый	термообработанный	20	10 200	11 424
			30	12 200	13 664
4	Жельтау № 7 бежевый, мелкозернистый	термообработанный	20	9 700	10 864
			30	11 900	13 328

Таблица Е2 – Цены на камни бортовые (дорожный) Тип 1ГП

Камень бортовой (дорожный) Тип 1ГП			
Наименование гранита	размер	Цена без НДС	Цена с НДС
из гранита Капал-Арасан	300мм x 150мм x пр.	за п.м. – 8036 тенге	9000
из гранита Жельтау № 11 (красный)	300мм x 150мм x пр.	за п.м. – 8036 тенге	9000
из гранита Жельтау № 7 (розовый)			
из гранита Курты	300мм x 150мм x пр.	за п.м. – 9821 тенге	11 000
Блоки гранитные I – II группы	размер произвольный	за м ³ – 30 000 тенге	33600
Блоки гранитные III – IV группы	размер произвольный	за м ³ – 18 000 тенге	20160

Приложение Ж

О положительном результате формальной экспертизы



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ӘДІЛЕТ МИНИСТРЛІГІНІҢ
"ҰЛТТЫҚ ЗАТКЕРІК МЕНШІК
ИНСТИТУТЫ"
ШАРАШАҒЫЛЫҚ ЖҰРТТУ
ҚУҚЫҒЫНДАҒЫ РЕСПУБЛИКАЛЫҚ
МЕМЛЕКЕТТІК КӘСПОРНЫ



РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ НА ПРАВЕ
ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ»
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Қорғалған тас жаны, 25 ғимараты, Астана қ. Қазақстан Республикасы, 010000
<http://www.kazpatent.kz> e-mail: kazpatent@kazpatent.kz

шөссе Қарғалқын, здание 25, с. Астана, Республика Казахстан, 010000
<http://www.kazpatent.kz> e-mail: kazpatent@kazpatent.kz

Хат алмасу кезінде 12.04.2018
№ 2018/0227.1 өтініміне сілтеме беруді сұраймыз

Поветкин Виталий Васильевич
ул. Айтеке би, д. 132/1, кв. 8,
г. Алматы, 050050
vv1940_povetkin@mail.ru

При переписке просим ссылаться на заявку
№ 2018/0227.1 от 12.04.2018

Уведомление о положительном результате формальной экспертизы

Настоящим РГП «НИИС» уведомляет заявителя о том, что формальная экспертиза по заявке на изобретение «Устройство для термического разрушения горных пород» завершена.

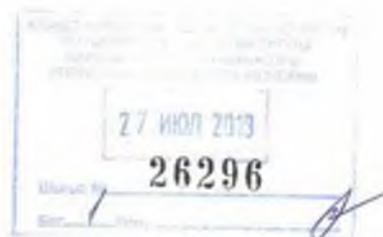
- (21) 2018/0227.1
- (22) 12.04.2018
- (71) Поветкин Виталий Васильевич (KZ)
- (72) Поветкин Виталий Васильевич (KZ); Букаева Амина Захаровна (KZ)

Начальник управления

К. Исакова

Эксперт

О. Жұбанов





1836352

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ӘДІЛЕТ МИНИСТРЛІГІНІҢ
"ҰЛТТЫҚ ЗИЯТКЕРЛІК МЕНШІК
ИНСТИТУТЫ"
ШАРУАШЫЛЫҚ ЖҮРГІЗУ
ҚҰҚЫҒЫНДАҒЫ РЕСПУБЛИКАЛЫҚ
МЕМЛЕКЕТТІК КӨСПОРНЫ



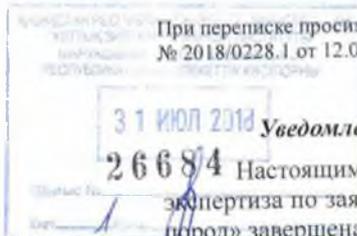
РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ НА ПРАВЕ
ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ»
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Қорғалжын үзе жолы, 3Б ғимараты, Астана қ. Қазақстан Республикасы, 010000
<http://www.kazpatent.kz> e-mail: kazpatent@kazpatent.kz

шоссе Қорғалжын, здание 3Б, г. Астана, Республика Казахстан, 010000
<http://www.kazpatent.kz> e-mail: kazpatent@kazpatent.kz

Хат алмасу кезінде 12.04.2018
№ 2018/0228.1 өтініміне сілтеме беруді сұраймыз

Поветкин Виталий Васильевич
ул. Айтеке би, д. 132/1, кв. 8,
г. Алматы, 050050
vv1940_povetkin@mail.ru



При переписке просим ссылаться на заявку
№ 2018/0228.1 от 12.04.2018

31 ЮЛ 2018 **2668/4** *Уведомление о положительном результате формальной экспертизы*
Настоящим РГП «НИИС» уведомляет заявителя о том, что формальная
экспертиза по заявке на изобретение «Устройство для термического разрушения горных
пород» завершена.

- (21) 2018/0228.1
- (22) 12.04.2018
- (71) Поветкин Виталий Васильевич (KZ)
- (72) Поветкин Виталий Васильевич (KZ); Букаева Амина Захаровна (KZ)

Начальник управления

К. Исакова

Эксперт

О. Жұбанов



1919605

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ӘДІЛЕТ МИНИСТРЛІГІНІҢ
"ҰЛТТЫҚ ЗИЯТКЕРЛІК МЕНШІК
ИНСТИТУТЫ"
ШАРАУШЫЛЫҚ ЖҮРГІЗУ
ҚҰҚЫҒЫНДАҒЫ РЕСПУБЛИКАЛЫҚ
МЕМЛЕКЕТТІК КӨСПОРНЫ



РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ НА ПРАВЕ
ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ»
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Корғалжин тас жолы, 3Б ғимараты, Астана қ. Қазақстан Республикасы, 010000
тел.: +7 (7172) 62-15-15, +7 (7172) 62-15-04
<http://www.kazpatent.kz> e-mail: kazpatent@kazpatent.kz

шоссе Корғалжин, здание 3Б, г. Астана, Республика Казахстан, 010000
тел.: +7 (7172) 62-15-15, +7 (7172) 62-15-04
<http://www.kazpatent.kz> e-mail: kazpatent@kazpatent.kz

Хат алмасу кезінде 14.12.2018

№ 2018/0948.1 өтініміне сілтеме беруді сұраймыз

Поветкин Виталий Васильевич

Уд. Айтеке би, д. 132/1, кв. 8,

г. Алматы, 050050

vv1940_povetkin@mail.ru

При переписке просим ссылаться на заявку
№ 2018/0948.1 от 14.12.2018



Направляем Вам уведомление о положительном результате формальной экспертизы по заявке на изобретение «Способ и устройство для разработки месторождений тяжелой нефти и битума».

Одновременно уведомляем, о необходимости доплаты за второй независимый пункт формулы изобретения, т.к., Вами заявлено два объекта: «способ» и «устройство».

Приложение: уведомление на 1 листе
уведомление о доплате 1 на листе

Начальник управления

К. Исакова

Исп.: О. Жұбанов
8 7172 62 15 47

Приложение И

