

УДК 622.233.39

DOI: 10.12737/article\_5a313b63b01a13.12923103

**В.В. Поветкин**, д.т.н.,

**А.З. Букаева**, магистр,

(Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22а),

**А.В. Хандожко**, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)

E-mail: chandosh@yandex.ru; vv1940\_povetkin@mail.ru

## Использование бензовоздушных горелок для добычи и обработки блочного камня

*Описаны этапы развития термоструйных горелок с интенсификаторами горения топливных компонентов. Проведены исследования для получения явления детонации в свободной струе горелок при сжигании топливных компонентов. Приведены конструктивные особенности разработок бензовоздушных термоинструментов, позволяющие интенсифицировать процессы горения топливных компонентов.*

**Ключевые слова:** горная порода; бензовоздушные горелки; керосино-кислородные горелки; термоинструмент; топливные компоненты (бензин, керосин, воздух), детонационное горение.

**V.V. Povetkin**, D. Eng.,

**A.Z. Bukueva**, Master,

(Satpayev Kazakh National Research Technical University 22a, Satpayev Str., Almaty, Kazakhstan 050013)

**A.V. Khandozhko**, D. Eng.

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University", 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

## Air-petrol burners use for solid stone mining and processing

*The development stages of thermo-jet burners with the intensifiers of fuel component combustion are described. Investigations for obtaining a detonation phenomenon in a free jet of burners at fuel component combustion are shown. The design peculiarities in developments of air-petrol thermo-tools allowing the intensification of the processes of fuel component combustion are shown.*

**Keywords:** rock; air-petrol burners; kerosene-oxygen burners; thermo-tool, fuel components (petrol, kerosene, air); detonation combustion.

Гранит является одной из наиболее ценных и востребованных пород строительного камня, пригодного для производства станин и др. в машиностроении. В частности, значительные запасы этих пород имеются в Восточном, Центральном и Южном Казахстане.

Традиционная технология добычи гранита предусматривает проходку разрезных и врубовых траншей в массивах горных пород с использованием буровзрывных процессов. При этом широко используются бризантные взрывные вещества (аммонит). При взрывах имеют место значительные потери камня за

счет трещинообразования, приводящего к нарушению прочности и блочности основного массива.

С целью устранения недостатков, присущих буровзрывному способу проходки разрезных и врубовых траншей, на ряде месторождений гранита Казахстана, Украины применяется технология добычи блоков с использованием термической резки. Огнеструйный способ является перспективной альтернативой традиционной технологии.

При добыче гранитных блоков огнеструйный способ обеспечивает резание и обработку

горных пород при удовлетворительной повреждаемости и с высокими скоростями. Так, производительность резания кислородно-керосиновыми горелками достигает  $1,3 \text{ м}^2$  площади резания в час, а бензовоздушной –  $0,8 \text{ м}^2/\text{ч}$ .

Разрезные и врубовые траншеи в массиве прорезаются двумя вертикальными щелями на глубину залегания пласта (до подошвы уступа). Терморезаки позволяют прорезать щели глубиной до 5 м и более, 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 Республики Казахстан показало, что породы большинства месторождений хорошо разрушаются воздушными газоструйными термоинструментами с приемлемой для практики скоростью. Средняя производительность резания составляет  $0,65 \text{ м}^2$  щели в час.

Опытно-промышленная резка пород Майкульского карьера амазонитовых гранитов (Республика Казахстан) бензовоздушными терморезаками ТРВ-5 конструкции КазПТИ обеспечила производительность резания одной горелкой  $0,5 \text{ м}^2/\text{ч}$ .

Основным инструментом для огнеструйного разрушения можно считать конструкцию на основе авторского свидетельства №160019, выданного А.В. Бричкину и А.Н. Генбач в 1964 г., с формулой изобретения, выполненной в следующей редакции: «Прибор для термической резки и обработки пород, включающий реактивную горелку, а также топливо и газопроводы с регулирующими устройствами, отличающийся тем, что, с целью образования пульсирующего направленного потока раскаленного газа, обеспечивающего получения ровной поверхности заданной формы при обработке, например, строительного камня, реактивная горелка прибора снабжена соплом Лавалья с укороченной диффузорной частью».

В камнеобрабатывающей промышленности нашли применение два типа термоинструментов, работающих на сжигании углеводородного горючего в кислородной среде: кислородно-керосиновые и бензовоздушные.

Терморезаки, работающие на керосино-кислородной смеси имеют следующие показатели:

– производительность обработки –  $1...2 \text{ м}^2/\text{ч}$ , при толщине снимаемого слоя  $0,05...0,06$  м или  $100...150$  кг/ч отбиваемого материала;

– скорость бурения –  $12...30$  м/ч при диаметре шпура  $0,028...0,04$  м в зависимости от свойств породы;

– расход кислорода –  $15...18 \text{ м}^3/\text{ч}$ , керосина –  $8...9$  л/ч, охлаждающей воды –  $160...200$  л/ч;

– давление рабочих компонентов: кислорода –  $0,12...0,15$  МПа, керосина –  $0,12...0,15$  МПа, воды –  $0,3...0,5$  МПа.

Бензовоздушные термоинструменты отличаются простотой устройства и обслуживания. Вместо сложных систем подачи горючего, окислителя и охлаждающей воды, как это имеет место при использовании керосино-кислородных горелок, используется воздушный компрессор, емкость для горючего и терморезак [5].

На рис. 1 представлена конструкция ручного терморезака ТРВ-12М, предназначенного для поверхностной обработки гранитных заготовок.

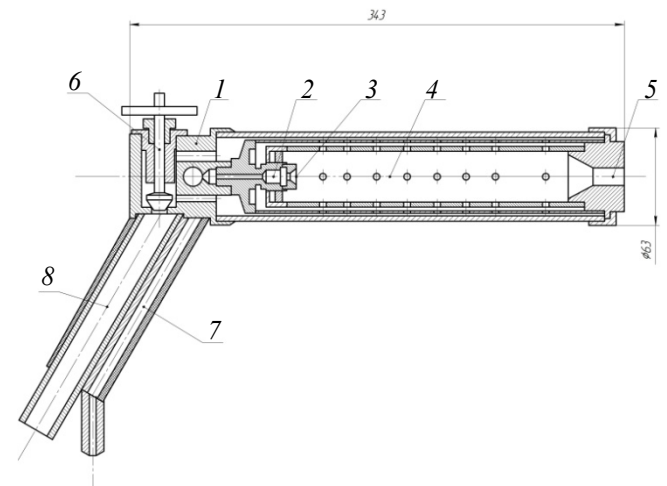


Рис. 1. Терморезак ТРВ-12М:

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

На рис. 2 и 3 представлены основные схемы взаимодействия высокотемпературных и высокоскоростных струй горелок с горной породой при поверхностной обработке и резке щелевых выработок.

Рядом авторов [3, 6, 7] решена тепловая задача, в которой найдены основные параметры газового потока и производительность разрушаемой породы.

По первой схеме (рис. 2) ведётся процесс разрушения горной породы, при котором пят-

но контакта газовой струи с породой имеет круговую или эллиптическую форму.

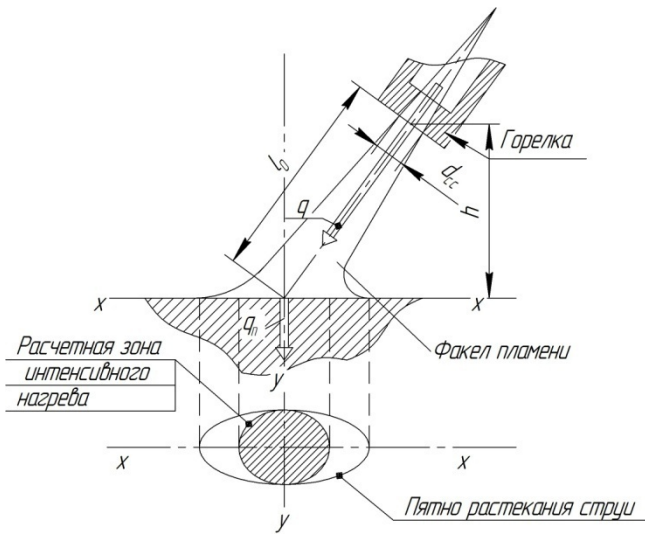


Рис. 2. Взаимодействие газовой струи с породой

По второй схеме (рис. 3) разрушение породы осуществляется при параллельном протекании газового потока, относительно горной породы, с некоторым заглублением, возможно на весь диаметр струи.

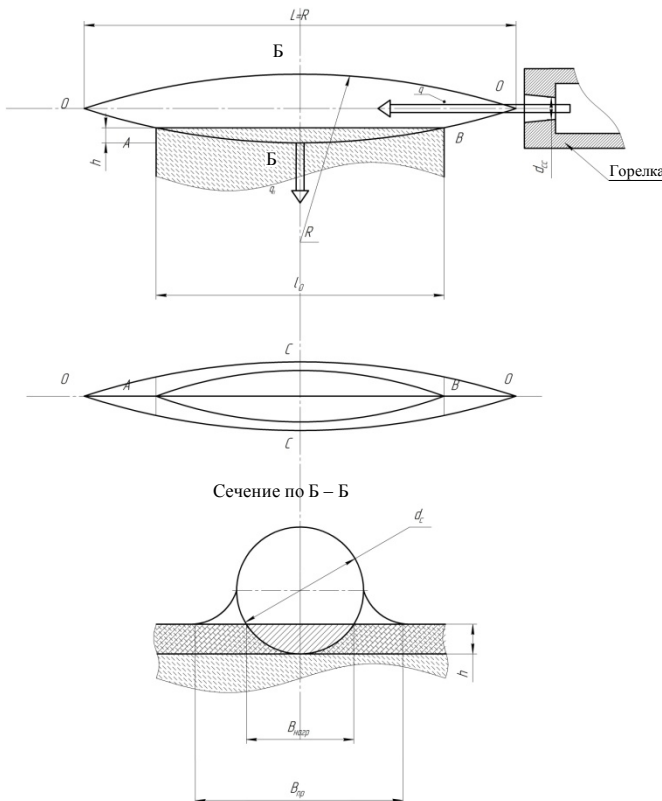


Рис. 3. Взаимодействие параллельной газовой струи с породой

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/м<sup>2</sup>, что в 2 - 3 раза выше, чем у бензовоздушных, имеющих  $(1,5...4,0) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, производительность их по сбою также выше [4]. Предлагается схема разрушения полосовым источником тепла (рис. 3), как основной схемы работы термоинструмента.

Установлено [2], 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 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 [4, 6]. 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 распыливании дальность 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. Для определения необходимого объема  $V_k$  используют один из следующих параметров:

1. Условное время пребывания продуктов сгорания в камере  $\tau_{ycl}$ :

$$\tau_{ycl} = \frac{V_k}{G \cdot v_k}, c, \quad (1)$$

где  $V_k$  – объем камеры сгорания,  $m^3$ ;  $G$  – расход топлива,  $г/с$ ;  $v_k$  – средний удельный объем топлива и продуктов сгорания,  $m^3/кг$ .

2. Приведённая длина камеры сгорания

$$l_{пр} = \frac{v_k}{f_{кр}}, m, \quad (2)$$

где  $f_{кр}$  – площадь сопла в критическом сечении камеры;

$$f_{кр} = \frac{G \cdot \beta}{P_z}, m^2, \quad (3)$$

где  $\beta$  – удельный импульс давления в камере,  $м/с$ ;  $P_z$  – давление газов внутри камеры сгорания, Па.

При проектировании камеры сгорания пользуются соотношением  $f_k / f_{кр} = 6 \dots 20$ .

Усовершенствованным вариантом терморезака ТРВ-60, применяемого для резки щелевых выработок, является конструкция БВР-80, представленная на рис. 4. Отличительной особенностью этого инструмента является наличие специальной термодинамической насадки 2 для эжектирования атмосферного воздуха в ударные волны – «скачки» уплотнения и дожигания в них несгоревшего горючего в обогащенной струе факела горелки за пределами критического сечения сопла.

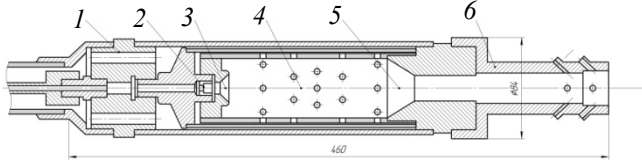


Рис. 4. Терморезак БВР80:

1 – распределительная головка; 2 – форсунка; 3 – захватитель; 4 – камера сгорания; 5 – сопло; 6 – газодинамический насадок

Скачки уплотнения образуются из-за рельефа внутренней поверхности насадки, образованного кольцевыми сверлениями отверстий, через которые всасывается эжектируемый воздух в основную струю горелки. В этой конструкции основной терморезак с камерой сгорания и соплом служит основным инструментом для создания ударного импульса в эжекционном насадке в области перфораций.

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

Использование бензовоздушных горелок в качестве рабочих органов механизированных термоагрегатов сдерживается сравнительно низкой 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.

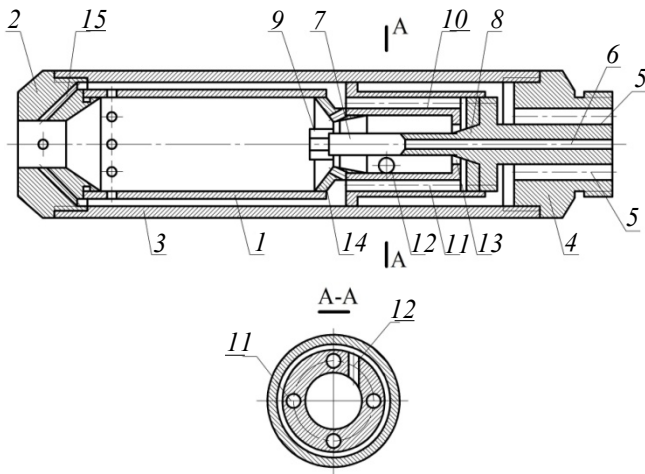
Однако ввиду простоты работы и организации питания топливными компонентами бензовоздушных горелок, их использование в качестве рабочих органов механизированных установок является актуальным. Повышение мощности бензовоздушных горелок без значительного развития их габаритных размеров и увеличения размеров факела горелки возможно за счет интенсификации процессов горения.

Одним из средств интенсификации горения свободных струй за пределами среза сопла является дожигание продуктов неполного сгорания обогащенной топливом смеси эжектированием атмосферного воздуха. При использовании в горелках тяжелых топливных смесей, необходимо также усовершенствование способа поджига горелок.

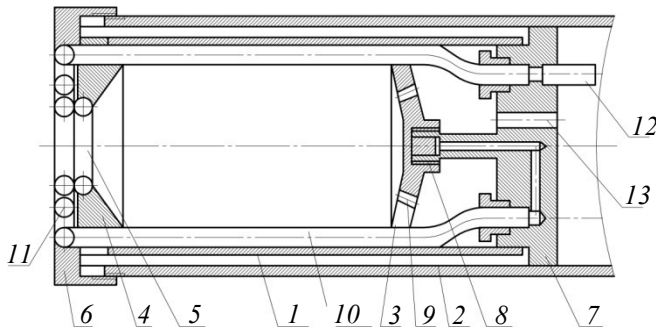
Следующий этап исследования интенсификации горения свободных струй был проведен с помощью горелки, разработанной с участием авторов изобретения (рис. 5) [7].

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.

Другой конструкцией огнеструйной горелки, повышающей термодинамические параметры струи за счет подогрева горючего до газообразного состояния и подачи его в камеру сгорания, является конструкция горелки, выполненная по изобретению [8] (рис. 6).



**Рис. 5. Устройство для разрушения горных пород:**  
 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



**Рис. 6. Устройство для разрушения горных пород:**  
 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

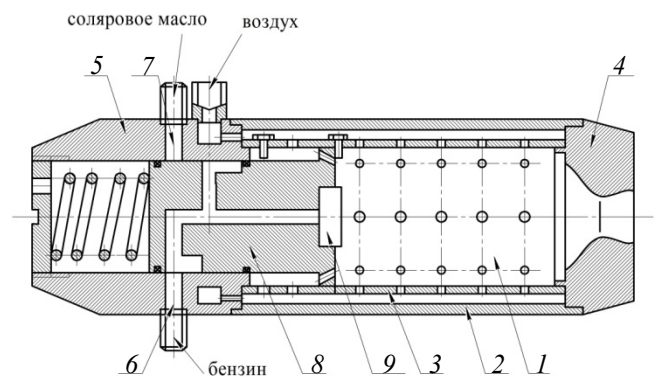
Эта конструкция позволила повысить тепловые и механические параметры струи горелки за счет организации горения газообразного горючего, предварительно подогретого до температуры испарения. Испытание горелки показало возможность организации такого процесса горения. Предварительные испытания горелки на газообразных топливных смесях (пропан + кислород (воздух)) указывают на целесообразность их использования при наличии необходимых источников их производства.

Важным элементом создания термоинструментов, работающих на тяжелых топливных компонентах, является их запуск в работу. Устойчивый запуск их в работу возможен только

в том случае, когда имеется комбинированная система подачи топливных компонентов в камеру сгорания. Сначала подается легко воспламеняемая смесь и ведется ее поджиг, затем перекрываются каналы легко воспламеняемого горючего (бензина) и открываются каналы тяжелого горючего.

Цель изобретения заключается в том, чтобы повысить надежность запуска горелки при меньших энергетических затратах на предварительный подогрев горючего. Это достигается в результате того, что свернутая по спирали часть магистрали горючего примыкает к наружной стороне сопловой крышки и к поверхности сопла.

Устройство автоматического переключения горючего со стартового на основной вид изображено на рис. 7 [9].



**Рис. 7. Устройство для огнеструйного разрушения горных пород:**

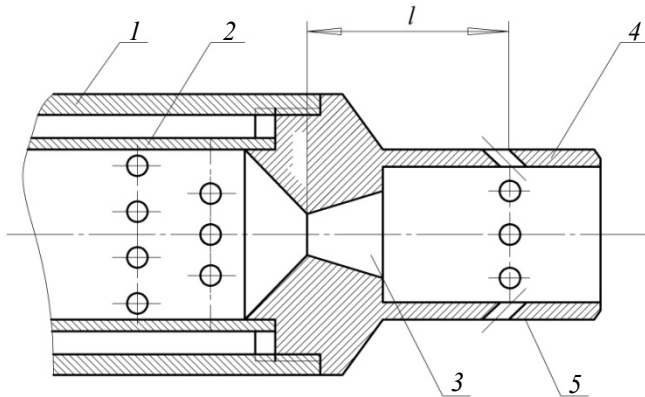
1 – камера сгорания; 2 – наружный кожух; 3 – кольцевая полость; 4 – сопло; 5 – распределительная головка; 6, 7 – каналы подачи бензина и солярового масла; 8 – подвижный поршень; 9 – форсунка

Разработанные конструкции терморезаков [7 – 11] решили ряд технологических задач – повысили производительность разрушения горных пород, автоматизировали запуск горелок в работу, что существенно важно для разработки рабочих органов механических термоагрегатов.

Проводимые исследования по интенсификации горения показывают перспективность применения явления детонационного горения для термического разрушения горных пород [10].

Качественная оценка детонационного горения была проведена на бензовоздушной горелке с интенсификатором горения в виде цилиндрической насадки на часть струи горелки с вводом воздуха через перфорацию насадка на некотором расстоянии от среза сопла [10]. В устройстве (рис. 8) детонационный эффект

достигается за счет возбуждения стационарного скачка уплотнения (ударной волны) в начале основного участка сверхзвуковой, обогащенной горючим компонентом, газовой струи горелки. Это достигается за счет трения струи рабочего тела о рельеф внутренней поверхности насадка и контакта с холодным эжектируемым воздухом и введения в него с целью интенсивного (детонационного) горения недостающего эжектируемого, обогащенного горючим струей через перфорационные каналы насадка, окислителя.



**Рис. 8. Устройство для термодетонационного разрушения:**

1 – горелка; 2 – камера сгорания; 3 – сопло; 4 – насадок; 5 – каналы перфорации

В сверхзвуковом потоке, вытекающем из сопла Лавала горелки в цилиндрическую перфорированную камеру возбуждения (насадок), за счет трения о ее рельефные стенки и контакта с холодным всасываемым атмосферным воздухом образуется мощный стационарный скачок уплотнения (ударная волна). Эта волна постоянно питается эжектируемым через перфорацию окислителем из атмосферного воздуха, чем обеспечивается интенсивное (детонационное) высокопроизводительное горение.

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

Газовый поток горелки подогревает избыточное горючее (до 1500...1800 °С). Горючее, 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 интенсивности, скорости и массового расхода.

В результате этих испытаний установлен оптимальный угол наклона эжекционных окон насадка, который составляет 40...50 ° к его оси, а суммарная площадь окон эффективна в пределах 50...60 % от площади критического сечения сопла Лавала горелки. При этом длина цилиндрического насадка до эжекционных окон равна 1,2...1,5 его внутреннего диаметра, который больше критического сечения сопла Лавала в 1,5...2,0 раза.

В описываемом устройстве при взаимодействии сверхзвуковой струи с холодным эжектируемым воздухом и за счет трения струи о шероховатости внутренней стенки цилиндрического насадка 4 в месте входа окон 5 возбуждается мощный стационарный скачок уплотнения (ударная волна), в который поступает эжектируемый воздух для реагирования с горючим. Этим достигается быстрое (детонационное) горение и полное дожигание смеси.

Дожигание горючего в мощном скачке уплотнения в начале основного участка струи и вновь разгон струи в цилиндрическом насадке позволяет повысить мощность струи, ее геометрические размеры по сравнению с существующими, при этом существенно повышается производительность и эффективность разрушения горных пород.

Этот значительный эффект получается без дополнительного расхода воздуха от компрессора. При этом производительность увеличивается в 1,5 раза при увеличении расхода горючего только на 20 %. Это обеспечивает экономический эффект около 30 % по сравнению с применением горелки без насадки.

Для определения теплопередающих параметров сверхзвуковых высокотемпературных газовых струй была разработана специальная горелка с возможностью использования в качестве горючего бензина, дизельного топлива и газа пропана. На рис. 9 показан фрагмент работы горелки с газодинамическим насадком при разрушении блока горной породы, при проведении щелевой выработки.

Предварительными экспериментами было выявлено, что с увеличением количества эжекционных окон, увеличиваются размеры факела и мощность ударных волн.

В настоящее время существует техническая возможность использовать термоинструменты со сверхзвуковым факелом для различных технологических операций, для разрушения горных пород при проведении щелевых выработок.

Исследования показали, что бензовоздушные горелки, с интенсификатором горения,

позволяют использовать в них детонационное горение для повышения производительности термического разрушения горных пород, автоматизировать запуск горелок в работу.



Рис. 9. Процесс работы терморезака ТРВ-12 М1 с насадкой

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поветкин, В.В., Нурымов, Е.К., Букаева, А.З., Серменов, А.И. Совершенствование огнеструйного способа резки горных пород при добыче блочного камня из гранитов // Поиск. – 2017. – №1(1). – С.176 – 182.
2. 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.
3. 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.
4. Povetkin V.V., Khandozhko A.V., Bukayeva A.Z., Nurymov Y.K. Theoretical basics of flame-jet rock destruction. VestnikKazNRTU№2(120) – Almaty, 2017. – pp. 109–115.
5. 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.
6. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Машиностроение, 2016. – 461 с.
7. А.с. №575418 СССР. Устройство для термического разрушения минеральных сред струями раскаленного газа // Аубакиров М.Г., Бобович В.С., Поветкин В.В., Сейтбатов С.М., Федоров Б.В. Оpubл. в бюл. №37, 1977.
8. 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. Оpubл. в бюл. №12, 1980.

9. А.с. №1209855 СССР. Устройство для термического разрушения твердых пород // Поветкин В.В., Сейтбатов С.М., Тлеуов М.Г. Оpubл. в бюл. №5, 1986.

10. А.с. №1221346 СССР. Устройство для термического разрушения горных пород // Тлеуов М.Г., Поветкин В.В. Оpubл. в бюл. №12, 1986.

11. А.с. №1383875. СССР. Устройство для термического разрушения горных пород // Москалев А.Н., Поветкин В.В. и др. Оpubл. в бюл. №19, 1988.

## REFERENCES

1. Povetkin, V.V., Nurymov, E.K., Bukayeva, A.Z., Sermenov, A.I. *Rock Flame-jet Cutting Method Updating at Granite Block Mining* // Search. – 2017. – No.1(1). – pp. 176-182.
2. Povetkin, V.V. *Processes and Technology of Strong Rock Flame-jet Processing*: author's abstract of D. Eng.: 05.15.11. – Almaty: KazNTU, 2001. – pp. 42.
3. Altynov, Zh.L. *Creation of Manipulation Device Complex for Manufacturing Strong Rock Products by Thermo-mechanical Method*: author's abstract of D. Eng.: 05.05.06. – Almaty: KazNTU, 2009. – pp. 42.
4. Povetkin V.V., Khandozhko A.V., Bukayeva A.Z., Nurymov Y.K. Theoretical basics of flame-jet rock destruction. VestnikKazNRTU№2(120) – Almaty, 2017. – pp. 109–115.
5. Germanovich, L.N., Dyskin, A.V. Model of brittle cracked material destruction at uniaxial load // *Proceedings of the AS of the USSR. Solid Mechanics*. – 1988. – No.2. – pp. 188-131.
6. Dobrovolsky, M.V. *Liquid-propellant Engines*. – M.: Mechanical Engineering, 2016. – pp. 461.
7. Author's Certificate No. 575418 the USSR. *Device for Mineral Media Thermal Destruction with Hot Gas Jet* // Auba-kirov M.G., Bobovich V.S., Povetkin V.V., Seitbatalov S.M., Fyodorov B.V. Published in Bull. No.37, 1977.
8. Author's Certificate No. 724720 the USSR. *Flame-jet Burner for Thermal Destruction of Mineral Media* // Arkhipkin V.I. Povetkin V.V., Seitov A.S., Spasenov M.I., Shaparev S.V. Published in Bull. No.12, 1980.
9. Author's Certificate No. 1209855 the USSR. *Device for Solid Rock Thermal Destruction* // Povetkin V.V., Seitbatalov S.M., Tleuov M.G. Published in Bull. No.5, 1986.
10. Author's Certificate No. 1221346 the USSR. *Device for Rock Thermal Destruction* // Tleuov M.G., Povetkin V.V. Published in Bull. No.12, 1986.
11. Author's Certificate No. 1383875 the USSR. *Device for Rock Thermal Destruction* // Moskalyov A.N., Povetkin V.V. et al. Published in Bull. No.19, 1988.

Рецензент д.т.н. Ж.Л. Алтынов