

УДК 622.233.39

В. В. Поветкин, д-р техн. наук, проф.,**М. Ф. Керимжанова**, канд. техн. наук, доц., **А. З. Букаева***Казахский национальный исследовательский технический университет**им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан**Тел. 8 (727) 292-69-19; E-mail: vv1940_povetkin@mail.ru*

РАЗРАБОТКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО БУРА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

В статье рассмотрены основные параметры термодинамического рабочего тела для разрушения горных пород за счет реализации нового метода сгорания топливной смеси в ударных волнах, инициированных высокоскоростным факелом в газодинамических генераторах горения. Приведены аналитические зависимости для расчета процессов горения в базовой горелке и газодинамическом сопле.

Ключевые слова: *резак, камень, детонационное горение, топливные компоненты (бензин, керосин, воздух).*

V. V. Povetkin, M. F. Kerimdzanova, A. Z. Bukayeva

DEVELOPMENT OF THERMODYNAMIC BUREAU FOR THE DESTRUCTION OF RIGID ROCKS

The main parameters of the thermodynamic working body for rock destruction due to the realization of a new method of combustion of a fuel mixture in shock waves initiated by a high-speed torch in gas dynamic combustion intensifiers are considered in the article. Analytic dependencies are also proposed for the calculation of combustion processes in the base burner and gas-dynamic nozzle.

Keywords: *Cutter, rock, detonation burning, fuel components (gasoline, kerosene, air).*

Разработанные конструкции терморезаков решили ряд технологических задач – повысили производительность разрушения горных пород, автоматизировали запуск горелок в работу, что существенно важно для разработки рабочих органов механизированных термоагрегатов [1-4].

Проводимые автором исследования для получения явления детонации в свободной струе горелки, 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. Прирост производительности незначителен, т.к. эти процессы горения можно производить более качественно в самих горелках при соответствующих стехиометрических состояниях и, в связи с этим, не требуется усложнять конструкцию горелки. Тем более при технологической схеме обработки в виде «полосового источника» тепла, когда пятно контакта струи с породой расположено по всей длине газовой струи горелки.

Проводимые исследования по интенсификации горения показывают перспективность применения явления детонационного горения для термического разрушения горных пород [5].

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

Для проверки эффекта детонационного горения был разработан и испытан термо-детонационный бур, работающий на химическом топливе [6]. Разрушение горных пород должно происходить за счет термического воздействия на забой непрерывно истекающего рабочего факела и накладываемых на него мощных ударных волн. Описываемое в изобретении явление детонации практически не доказано, бур не прошел широкие испытания и не нашел применения.

Качественная оценка детонационного горения была проведена на бензовоздушной горелке с интенсификатором горения в виде цилиндрического насадка на часть струи горелки с вводом воздуха через перфорацию насадка на некотором расстоянии от среза сопла [7].

В устройстве (рисунок 1) детонационный эффект достигается за счет возбуждения стационарного скачка уплотнения (ударной волны) в начале основного участка сверхзвуковой, обогащенной горючим компонентом, газовой струи горелки путем ее трения о шероховатости внутренней поверхности насадка и контакта с холодным эжектируемым воздухом и введения в него с целью интенсивного (детонационного) горения недостающего эжектируемого, обогащенной горючим струей через перфорационные каналы насадка, окислителя.

В сверхзвуковом потоке, вытекающем из сопла Лавалья горелки в цилиндрическую перфорированную камеру возбуждения (насадок), за счет трения о ее шероховатые стенки и контакта с холодным всасываемым атмосферным воздухом образуется мощный стационарный скачок уплотнения (ударная волна), который постоянно питается эжектируемым через перфорацию окислителем из атмосферного воздуха, чем обеспечивается интенсивное (детонационное) 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), 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, образуя мощный поток раскаленных газов повышенной интенсивности, скорости и массового расхода.

В лабораторных условиях испытывались несколько конструкций горелок.

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 Лавалья горелки, при этом длина цилиндрического насадка до эжекционных окон равна 1,2...1,5 его внутреннего диаметра, который больше критического сечения сопла Лавалья 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. В работах [8,9] описывается явление искусственного создания детонационных волн – мощных скачков уплотнения при трении о внутренние стены трубы, внутри которой протекает газовая струя.

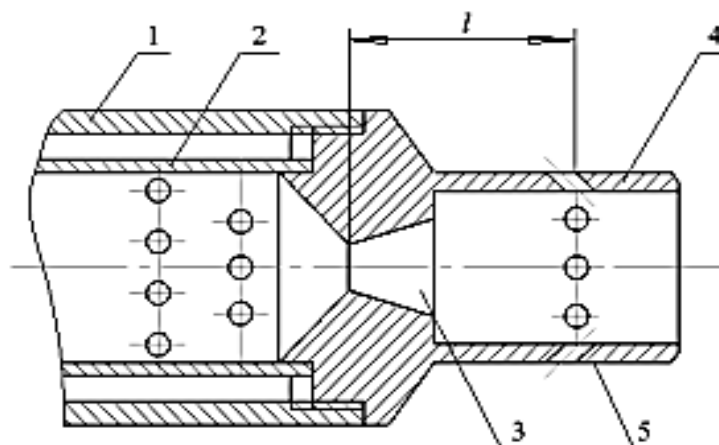


Рисунок 1. Устройство соплового аппарата горелки для термодетонационного разрушения. 1 - горелка; 2 - камера сгорания; 3 - сопло; 4 - насадок; 5 - каналы перфорации.

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.

Учитывая то, что этот значительный эффект получается без дополнительного расхода воздуха от компрессора, а также и то, что прирост производительности в 1,5 раза достигается при увеличении расхода горючего только на 20%, то есть в 1,2 раза, то экономический эффект от затрат на горючее при применении описываемого устройства составляет около 30% затрат на горелку без насадка.

Для определения теплопередающих параметров сверхзвуковых высокотемпературных газовых струй была разработана специальная горелка с возможностью использования в качестве горючего бензина, дизельного топлива и газа пропана [7,8].

Тепловые параметры струи определяли на лабораторном стенде с помощью датчика [12].

На первом этапе испытаний определялась тепловая эффективность газовой струи. На втором этапе испытаний изучалась эффективность термодетонационного разрушения горных пород в зависимости от времени нагрева и энергии удара детонационных волн. Объем разрушения определялся по количеству отбитой массы в единицу времени при различных режимах работы горелки.

Предложенный способ сгорания топливных компонентов в скачках уплотнения – ударных волнах, инициируемых в газодинамических насадках, позволяет значительно повысить эффективность работы бензовоздушных горелок [7]. Особенность конструкций такой горелки состоит в том, что она становится двухконтурной; в первом контуре горелки происходит создание высокоскоростной и высокотемпературной газовой струи, инициируемой соплом Лавала камеры сгорания обычной бензовоздушной горелки, и использование этой газовой струи для транспортировки избыточного горючего, предварительно нагретого в камере сгорания, и создание мощного скачка уплотнения в газодинамическом насадке – во втором контуре. Сгорание избыточного горючего происходит в ударной волне в детонационном режиме горения.

Разработанные по изобретению [3,4] рабочие органы - термоинструменты, в которых можно сжигать практически любые виды горючих, и снабженные интенсифицирующими устройствами горения, в данном случае служат устройством для создания ударного импульса - ударной волны и сжигания в ней избыточного горючего.

Исходными данными для теплового и газодинамического расчета базовой горелки первого контура для создания ударного импульса являются:

1) температура газов на выходе из сопла камеры сгорания. Максимально допустимая температура на выходе из камеры сгорания ограничивается жаропрочностью материала, из которого изготовлено сопло. Опыт показывает, что сопла, изготовленные из нержавеющей стали типа 12Х18Н9Т, надежно работают до температур порядка 1400° К. Для сопел, изготовленных из обычной стали, эта температура не должна превышать 1000°...1100° К;

2) расход воздуха, который задается, исходя из производительности применяемого компрессора и количества терморезаков. Для обеспечения достаточно высокой производительности терморезака расход воздуха через него, как показывает опыт, не должен быть меньше 3 м³/мин.;

3) давление в камере сгорания. Для получения высокой скорости истечения газов из сопла и, следовательно, высокой производительности терморезака давление в камере сгорания должно быть максимально возможным. Однако повышение его ограничивается характеристиками компрессоров. Максимальное давление в ресивере универсальных передвижных компрессоров не превышает 0,7 МПа, давление же в камере сгорания обычно на 0,1...0,2 МПа ниже давления в ресивере из-за наличия гидравлических потерь.

Расчет камеры сгорания, то есть расчет собственно процесса сгорания, сводится обычно к определению коэффициента избытка воздуха, обеспечивающего заданную температуру газа перед соплом, и расхода топлива в единицу времени [9,11].

Коэффициент избытка воздуха представляет собой отношение действительного количества воздуха, поступающего в камеру сгорания, к количеству воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания топлива:

$$\alpha = \frac{G_v}{G_T L_0}, \quad (1)$$

где G_v и G_T - расход воздуха и топлива, кг/с;

L_0 - теоретически необходимое количество воздуха в килограммах для полного сгорания 1 кг топлива, которое зависит от элементарного состава топлива и определяется по формуле:

$$L_0 = \frac{1}{0,232} \left(\frac{8}{3} G_T + 8H_T - O_T \right), \quad (2)$$

где G_T , H_T , O_T - весовые доли соответственно углерода, водорода и кислорода в топливе.

Выходное сопло камеры сгорания терморезака предназначено для преобразования части теплосодержания, которым обладает газ на выходе из камеры сгорания, в кинетиче-

скую энергию газовой струи. Это преобразование сопровождается уменьшением давлений и снижением температуры газа и увеличением его удельного объема - расширения.

При проектировании сопла необходимо более полно удовлетворить следующим основным требованиям, предъявляемым к сопловому аппарату:

1) сопло должно обеспечивать получение высоких скоростей истечения при минимальных потерях;

2) конструкция и технология изготовления сопла должны быть более простыми.

Основными видами потерь при истечении являются:

1) потери на трение газа о стенки сопла. Для уменьшения этих потерь внутреннюю поверхность сопла необходимо делать более гладкой. Шероховатость поверхности приводит к значительным потерям и увеличивает отдачу тепла в стенки сопла, вызывая этим перегрев последнего и уменьшение скорости истечения;

2) потери, связанные с возникновением вихрей и скачков уплотнения в результате отрыва газового потока от стенок при неправильной профилировке проточной части сопла.

Для обеспечения безотрывного течения газа в сопле Лаваля необходимо переход от сужающейся части к расширяющейся осуществлять по плавной кривой с радиусом кривизны не меньше диаметра критического сечения. Угол раскрытия расширяющейся части сопла должен быть небольшим (не более 150). При больших углах раскрытия поток не успевает расширяться в радиальном направлении, в результате чего у стенок образуются зоны пониженного давления, приводящие к вихреобразованию и появлению скачков уплотнения.

Ввиду того, что в сужающейся части сопла газ движется с относительно небольшими (дозвуковыми) скоростями, профиль этого участка сопла практически не оказывает влияния на величину потерь.

Температура и скорость газов на выходе из сопла определяется по известным из газовой динамики [9] формулам:

$$T_3 = T_2 \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{K_r - 1}{K_r}}, \quad (3)$$

$$W_3 = \sqrt{\zeta_c \cdot 2g \frac{K_r}{K_r - 1} R_r T_2 \left[1 - \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{K_r - 1}{K_r}} \right]}, \quad (4)$$

где P_3 , T_3 и W_3 - давление, температура и скорость газа на выходе из сопла;

K_r - показатель адиабаты продуктов сгорания в процессе расширения;

R_r - газовая постоянная;

g - ускорение силы тяжести;

ζ_c - к.п.д. сопла (для хорошо сформированных сопел равен 0,95...0,95).

Интенсификация горения топливной смеси в бензовоздушных горелках по предложенной схеме в цилиндрической 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 цилиндрической насадке (шероховатость поверхности, эжектируемый холодный воздух) при истечении сверхзвуковой газовой струи из сопла основной горелки. Сверхзвуковая струя несет несгоревшие частицы топлива $\alpha = 0,5...0,7$, которые, проходя через фронт ударной волны, сгорают с высокой скоростью, образуя но-

вую высокоскоростную струю. За счет повышения химического потенциала газовой струи горелки и значительно увеличивается суммарная энергетическая мощность горелки.

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 [8-10].

Автором выполнены проектные расчеты и разработана опытная модель терморезака ТР-13/22, имеющая следующую техническую характеристику:

Расход воздуха, м³/мин - 2,5...3,5;

Расход горючего, л/ч - 12...17;

Давление топливных компонентов, МПа - 0,7;

Зажигание - от запальной топливной жидкости;

Габариты ($D \times L$), м - 0,05 x 0,45.

На рисунках 2, изображены испытания керосино-воздушного и бензо-воздушного инструментов.

Модель терморезака ТР-13/22 с газодинамическим насадком прошла испытания на работоспособность, т.е. устойчивый запуск от зажигательной смеси (бензина) с дальнейшим переводом на основную топливную смесь (керосин, соляровое масло и др.). В конструкции терморезака предусмотрена для этого резервная магистраль. Испытание терморезака производилось на различных стехиометрических соотношениях топливных компонентов ($\alpha = 0,5...0,8$). Массовый сбой составлял от 150 до 300 кг/ч по курдайскому граниту.

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.

На рисунке 3 представлены результаты экспериментов по определению производительности новой горелки. Общий прирост производительности составляет 50 % без дополнительного расхода воздуха от компрессора, расход же горючего увеличился на 2,5 кг/ч.

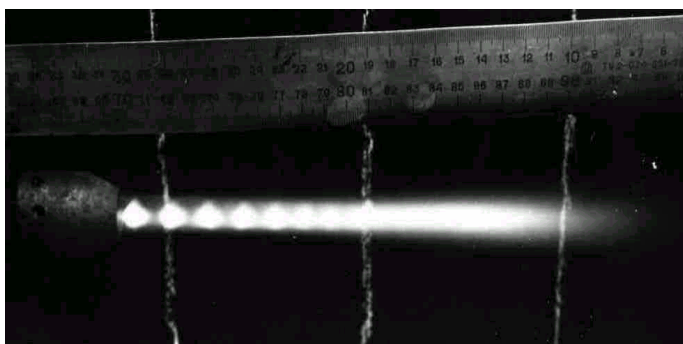


Рисунок 2. Газовый факел керосино-воздушной горелки
топливо – (керосин + воздух)

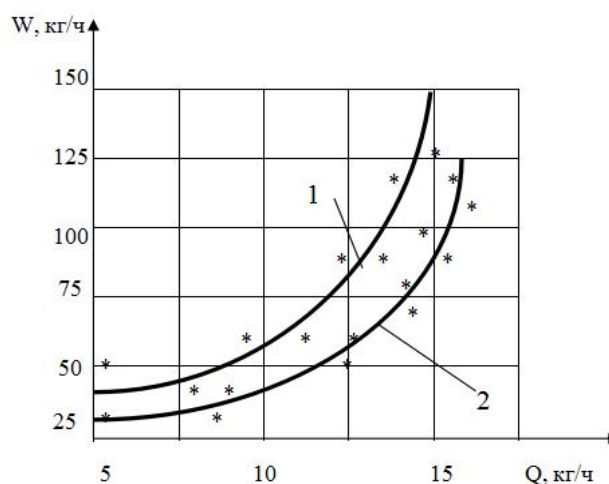


Рисунок 3. Зависимость производительности разрушения W от расхода топливных компонентов Q (курдаийский гранит). 1 - керосин + воздух; 2 - бензин + воздух

Выводы:

1. Обоснованы основные параметры термодинамического рабочего органа для разрушения горных пород за счёт реализации нового способа горения топливной смеси в ударных волнах, инициируемых высокоскоростным факелом горелки в газодинамических интенсификаторах горения.

2. На основе современной теории предложены аналитические зависимости для расчета процессов горения в базовой горелке и газодинамическом насадке:

- коэффициента избытка воздуха α_0 ;
- температуры и скорости газов на выходе из сопла T_2 и W_2 ;
- выходного сечения сопла $f_в$ насадка;
- площади критического сечения сопла $f_{кр}$ базовой горелки.

3. Экспериментально установлено, что устройство газодинамического насадка, площадь которого в сечении в 3 раза превышает площадь критического сечения сопла базовой горелки, позволяет получить факел горелки до 250...300 мм длины с активной зоной до 300 мм, а производительность разрушения горных пород новой горелки в 1,5...2 раза превышает производительность базовой горелки.

4. Разработан рабочий орган - термоинструмент, работающий на бензовоздушной и керосино-воздушной топливной смеси ТРВ-13/22 с газодинамическим насадком для воз-

буждения мощных скачков уплотнения и сжигания в них избыточного горючего, защищённый А. С. №1383875, №1209855 и №1221346, позволяющий использовать его в качестве рабочего органа механизированных термоагрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 575418 СССР. Устройство для термического разрушения минеральных сред струями раскаленного газа / М. Г. Аубакиров, В. С. Бобович, В. В. Поветкин, С. М. Сейтбаталов, Б. В. Федоров; опубл. Бюл.И. 1977, №37.
2. А.с. 724720 СССР. Огнеструйная горелка для термического разрушения минеральных сред / В. И. Архипкин, В. В. Поветкин, А. С. Сеитов, М. И. Спасенов, С. В. Шапарев; опубл. в Бюл.И. 1980, №12.
3. А.с. 1209855 СССР. Устройство для термического разрушения твердых пород / В. В. Поветкин, С. М. Сейтбаталов, М. Г. Тлеуов; опубл. в Б.И. №5, 1986.
4. А.с. 1221346 СССР. Устройство для термического разрушения горных пород / М. Г. Тлеуов, В. В. Поветкин; опубл. в Б.И. 1986, №12.
5. Ястребов, Е. К. Повышение эффективности огнеструйного разрушения горных пород дожиганием топлива в призабойном пространстве: автореф. дис. ...канд. техн. наук / Е. К. Ястребов – Алма-Ата: 1990.
6. А.с. 166292. СССР. Устройство для термического разрушения пород (термодетонационный бур) / Д. П. Клемешев, Э. М. Рудяк, П. Р. Синдеев; опубл. Бюл. И 1964, №22.
7. А.с. 1383875. СССР. Устройство для термического разрушения горных пород / А. Н. Москалев, В. В. Поветкин, и др.; опубл. Бюл. И. 1988, №19.
8. Щелкин, К. И. Газодинамика горения / К. И. Щелкин, Л. К. Трошкин – М.: Наука, 1962.
9. Синарев, А. В. Жидкостные ракетные двигатели / А. В. Синарев, А. Г. Добровольский. – М.: Воениздат, 1965. – С. 450.
10. Шетинков, Е. С. Физика горения газов / Е. С. Шетинков – М.: Наука, 1965. – 740 с.
11. Голдаев, И. П. Методика инженерного расчета воздушно-реактивных горелок термоинструментов / И. П. Голдаев, А. П. Фурсов и др. // Изв. вузов. Горный журнал – 1972. – №4. – С. 76-81.
12. Саллерс Дж. П. Термопарные приемники для оценки локальных коэффициентов теплоотдачи в ракетных двигателях / Дж. П. Саллерс // В кн.: Измерение нестационарных температур и тепловых потоков. – М.: Мир, 1966. – С. 127-137.

Поступила в редколлегию 29.05.2017 г.