

УДК 621.181.2.016:662.951.2

## ИСПЫТАНИЯ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА БЕСПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ И ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.В. Долгов\*, А.С. Заворин, А.Ю. Долгих, А.Н. Субботин

\*ООО «Энергонепфть Томск», г. Стрежевой  
Томский политехнический университет  
E-mail: sergeydolgov555@rambler.ru

Разработана конструкция горелочного устройства беспламенного горения и инфракрасного излучения с пористым наполнителем, перспективная для сжигания взрывоопасных газов. Приведены описание экспериментального стенда для испытания горелочного устройства и результаты испытаний. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о работоспособности устройства при сжигании горючих газов и жидких испаряющихся топлив.

### Ключевые слова:

Горелочное устройство, водород, ацетилен, керосин, криптол, безопасное сжигание, пористая структура, топливовоздушная смесь.

### Key words:

Burner device, hydrogen, acetylene, kerosene, kriptol, safe burning, porous structure, air-fuel mixture.

Актуальность альтернативной энергетики в мире из-за обострения энергетических проблем и удорожания углеводородных топлив неуклонно повышается. В связи с этим растет интерес к развитию энергетики на базе использования в ней ацетилена и водорода в качестве высокоэффективного, недорогого и доступного топлива.

Технологии получения ацетилена и водорода, а также исследования их свойств и особенностей на сегодня достигли достаточно высокого уровня. Однако развитие этих ветвей энергетики сдерживается тем фактором, что в сравнении с основными компонентами природного газа ацетилен и водород очень взрывоопасны (табл. 1). Вследствие этого во всех странах, где имели дело с ацетиленом, в свое время были приняты законы, полностью запрещающие применение жидкого ацетилена и допускающие применение газообразного ацетилена при избыточном давлении не выше 0,025 МПа [1, 2]. Относительно водорода меры безопасности предельно обострены, т. к. в случае его утечки образуется самовоспламеняющаяся гремучая смесь с кислородом воздуха.

Применительно к проблеме безопасности хранения и сжигания взрывоопасных газов большое значение имеют размеры (объем) газонаполненной системы. Так, при увеличении размеров сосуда смесь, не склонную к самовоспламенению, можно привести к взрыву, и наоборот, уменьшение размеров подавляет воспламенение [3]. Эта взаимосвязь открывает возможности для использования пористых систем в качестве рабочей зоны процесса окисления воздухом таких веществ, как ацетилен и водород, поскольку пористая структура не способствует созданию критической для взрыва концентрации газа, ограничивая объем и препятствуя проскоку пламени. Частично эти свойства пористых структур используются в известном классе горелочных устройств беспламенного горения, а также в получивших развитие на их основе горелках инфракрасного излучения. При этом пористыми элементами чаще всего являются специальные жаро-

стойкие керамические насадки с высокой теплоемкостью каркасного материала, что помимо их основного назначения способствует стабилизации горения.

Таблица 1. Параметры воспламеняемости горючих газов [1]

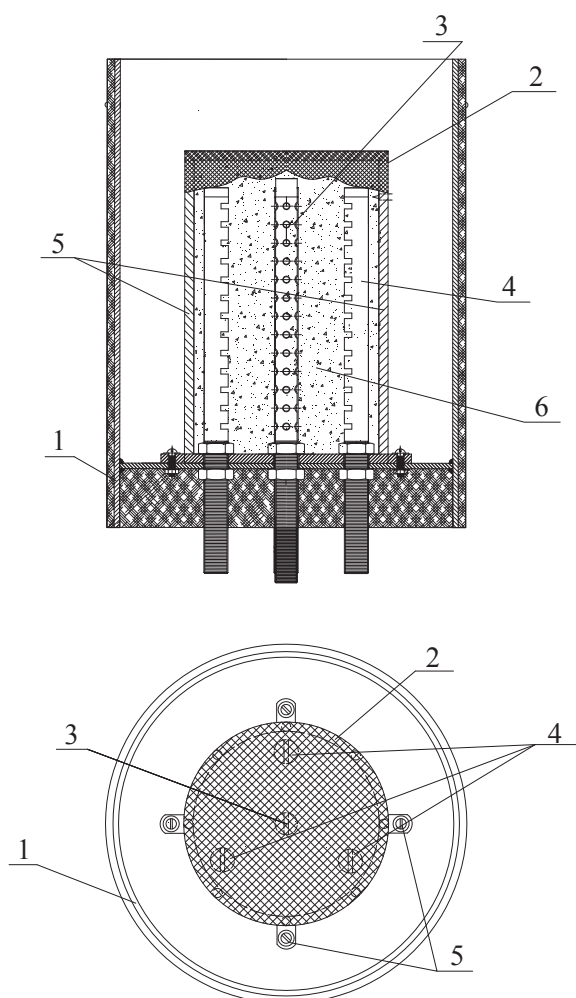
Газ	Температура воспламенения, °С		Предел воспламеняемости при содержании газа в смеси с воздухом, %	
	Низкая	Высокая	Нижний	Верхний
Водород	530	590	4	74
Метан	645	850	5	15
Этан	530	594	3,2	12,45
Пропан	530	588	2,37	9,5
Бутан	490	569	1,86	8,4
Ацетилен	355	500	2,5	80

Дальнейший прогресс в области горелочных устройств этого класса в направлении технологии водородного топлива определяется совершенствованием используемых пористых систем и процессов управляемого смесеобразования внутри них. Распространенными принципами подхода к управлению процессами смесеобразования являются наличие камеры подготовки топливовоздушной смеси, а также нескольких реакционных зон, заполненных зернистым материалом с жаростойкостью до температуры 1500 °С [4, 5]. Наряду с этим применяется увеличение размера пористых каналов в реакционных зонах по мере продвижения топливовоздушной смеси и прироста продуктов сгорания и другие способы влияния на стехиометрические соотношения компонентов среды внутри пор.

В развитие известных преимуществ беспламенных горелок инфракрасного излучения авторами разработано горелочное устройство для безопасного и эффективного сжигания не только газообразных, но и жидких топлив [6].

Устройство (рис. 1) имеет теплоизолированный цилиндрический корпус – 1, в котором размещен опорный каркас – 5 из разнесенных по окружно-

сти стальных прутков, удерживающий на себе сетчатую насадку-излучатель – 2. Пространство внутри сетчатой насадки-излучателя представляет собой рабочую зону – 6 горелочного устройства и заполнено пористыми частицами. Вдоль продольной оси рабочей зоны установлен топливный инжектор – 3 в виде металлической трубки с отверстиями для струйного истечения топлива. Подвод воздуха в рабочую зону горения осуществляется через воздушные инжекторы – 4, которые представляют собой три металлические трубки с перфорациями, обращенными к топливному инжектору, и расположенные вокруг него по окружности с шагом 120°. В корпусе горелочного устройства предусмотрены смотровые окна для визуального контроля процесса горения.



**Рис. 1.** Конструктивная схема горелочного устройства 1 – корпус; 2 – сетчатая насадка-излучатель; 3 – топливный инжектор; 4 – воздушные инжекторы; 5 – опорный каркас; 6 – рабочая зона

Пористая структура в рабочей зоне горелочного устройства образована плотным заполнением всего объема под сетчатой насадкой-излучателем частицами угольного криптола. Этот доступный материал, представляющий собой отсев коксохимическо-

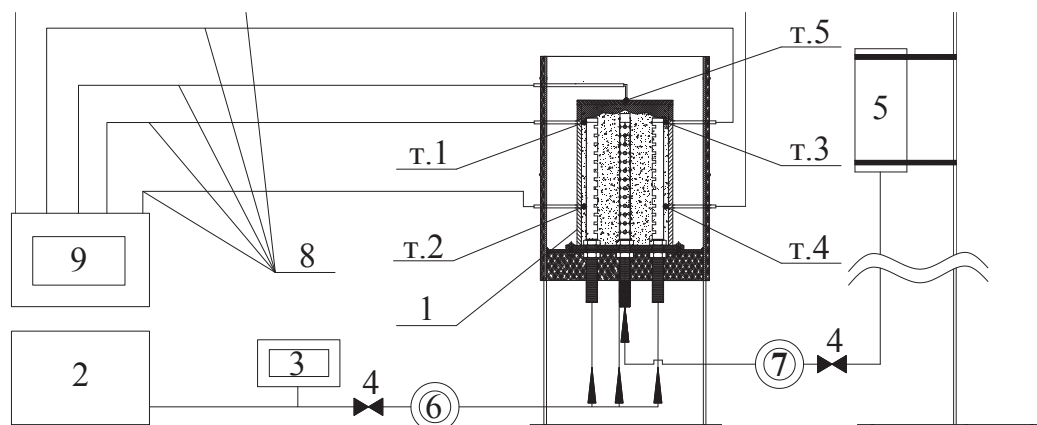
го производства, обладает рядом свойств, которые определяют его несомненную пригодность для использования в горелочных устройствах беспламенного горения. Прежде всего, к таким свойствам относится собственная высокопористая структура частиц, благодаря чему создается необходимая для внутривещного смесеобразования развитая удельная поверхность и обеспечивается незначительное аэродинамическое сопротивление даже для механически уплотненного слоя. Длительная практика применения криптола в электрических печах сопротивления в качестве токопроводящей среды [7] зарекомендовала его достаточно высокими показателями жаростойкости, эффективного термического сопротивления и термической прочности, что способствует увеличению ресурса пористого наполнения при многократном термическом воздействии на него в рабочей зоне горения.

Немаловажное значение для термических процессов в рабочей зоне имеет и то, что криптол по химическому составу представляет собой практически чистый углерод (от 96 %). При высокой удельной поверхности гетерогенного восстановительного взаимодействия с продуктами основного горения и последующего доокисления вторичных продуктов создаются условия для более полного распространения тепловыделения на весь объем рабочей зоны горелочного устройства.

Необходимо отметить, что создание условий для наиболее полного использования свойств криптола в рабочей зоне горелочного устройства предполагает достаточно однородный гранулометрический состав пористого наполнителя.

Для испытаний горелочного устройства изготовлен стенд (рис. 2), который позволяет производить все операции обслуживания устройства и измерения его эксплуатационных характеристик, параметров топливной и воздушной сред. С целью обеспечения безопасности экспериментов на данном этапе разработки горелочного устройства испытания проводились с использованием керосина в качестве топлива.

Горелочное устройство – 1 устанавливалось в рабочее положение, далее проводилась его коммутация с компрессором – 2 для подачи воздуха в рабочую зону горения, с постоянным контролем напора среды посредством установленного напоромера – 3. Линия подачи воздуха включает в себя также игольчатый вентиль – 4 для регулирования количества поступающего на горение воздуха. Для жидких топлив подача в горелку осуществляется за счет гидростатического давления из емкости – 5, находящейся под атмосферным давлением и расположенной на определенной высоте, изменение их расхода производится посредством вентилей – 4. Ротаметрами – 6, 7 фиксировался расход соответственно воздушной и топливной сред. Останов горелочного устройства осуществлялся путем перекрытия вентилей подачи топлива и воздуха с последующим выключением воздушного компрессора.



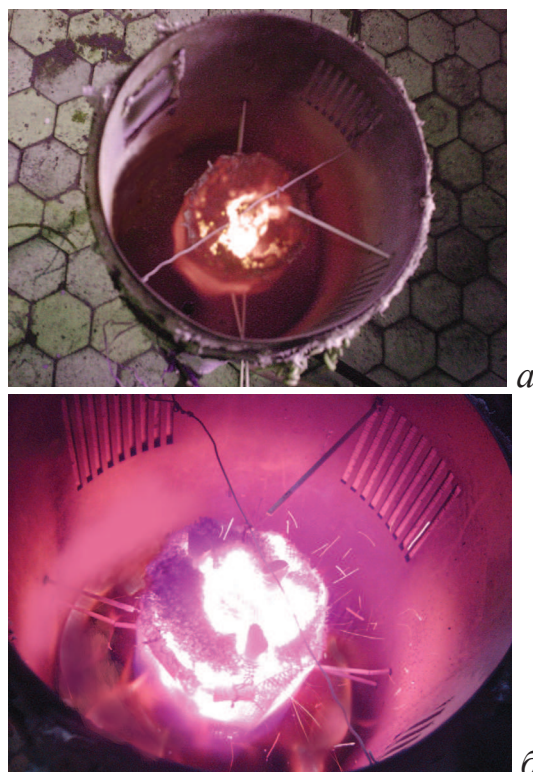
**Рис. 2.** Схема испытательного стенда: 1 – горелочное устройство; 2 – компрессор; 3 – напормер; 4 – игольчатый вентиль; 5 – емкость; 6 – ротаметр (тип РП-8); 7 – ротаметр (тип РП-5); 8 – термопары (№ № 1, 2, 3, 4, 5); 9 – милливольтметр

**Таблица 2.** Результаты испытаний (один цикл)

Время регистрации показаний	Номер термопары	Показание милливольтметра, мВ	Температура, °С	Расход топлива, $\text{м}^3/\text{с} \times 10^8$	Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с} \times 10^3$
12 <sup>00</sup>	1	0	20	–	–
	2	0	20		
	3	0	20		
	4	0	20		
	5	0	20		
12 <sup>05</sup>	1	4,6	131,4	8,3	4,4
	2	4,9	140,0		
	3	5,0	142,8		
	4	5,1	145,7		
	5	5,6	160,0		
12 <sup>10</sup>	1	12,8	365,7	11,7	4,4
	2	11,9	340,0		
	3	12,7	362,9		
	4	13,8	394,3		
	5	8,1	231,4		
12 <sup>20</sup>	1	23,8	680,0	15	4,4
	2	26,0	742,8		
	3	23,7	677,1		
	4	26,1	745,7		
	5	10,8	308,6		
12 <sup>30</sup>	1	24,3	694,2	16,7	4,4
	2	27,1	774,2		
	3	26,8	765,7		
	4	27,7	791,4		
	5	12,3	350,4		
12 <sup>40</sup>	1	16,2	462,8	–(прекращение подачи топлива)	–(прекращение подачи воздуха)
	2	15,3	437,1		
	3	14,8	422,8		
	4	15,9	454,2		
	5	8,9	254,3		
12 <sup>50</sup>	1	12,8	365,7	–(прекращение подачи топлива)	–(прекращение подачи воздуха)
	2	11,5	328,6		
	3	11,6	331,4		
	4	12,3	351,4		
	5	6,1	174,3		
13 <sup>00</sup>	1	6,3	180,0	–(прекращение подачи топлива)	–(прекращение подачи воздуха)
	2	6,9	197,1		
	3	8,7	248,6		
	4	7,8	222,9		
	5	4,6	131,4		

Температура в различных точках рабочей зоны (т. 1, т. 2, т. 3, т. 4) и на внешней поверхности сетчатой насадки-излучателя (т. 5) контролировалась с помощью пяти термопар (градуировка ХА).

Вид сверху на насадку-излучатель в разных эксплуатационных фазах в процессе испытаний показан на рис. 3, а основные результаты приведены в табл. 2 и на рис. 4.



**Рис. 3.** Горелочное устройство инфракрасного излучения в стадии испытания: а) состояние пуска (через 5 минут после розжига); б) состояние номинальной нагрузки

Максимальная зафиксированная температура в пористом заполнении рабочей зоны составила 791,4 °С. При этом средняя температура рабочей зо-

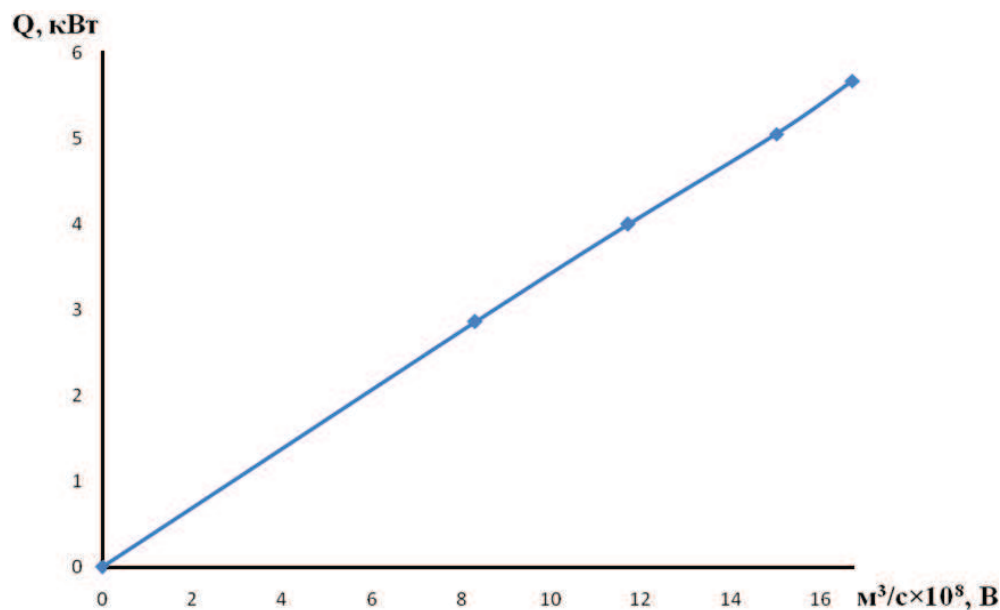


Рис. 4. Зависимость тепловой мощности горелочного устройства от расхода топлива

ны при номинальном режиме на основе показаний всех четырех термопар оказалась равной  $756,4^\circ\text{C}$ , что соответствует порядка  $5,67$  кВт тепловой мощности горелки. Температура излучающего элемента составляет не более  $400^\circ\text{C}$ , что существенно ниже в сравнении с температурой излучающей поверхности горелок с керамической насадкой ( $800\text{--}950^\circ\text{C}$ ) [4]. Многократные циклы испытаний показали, что тепловая мощность ( $Q$ ) горелочного устройства может изменяться в широких пределах (рис. 4), достигая почти  $6$  кВт в диапазоне регулируемого расхода топлива ( $V$ ) до  $16,7 \cdot 10^{-8}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) без каких либо ограничений по условиям проницаемости криптолового заполнения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кязимов К.Г. Справочник работника газового хозяйства. – М.: Высшая школа, 2006. – 278 с.
2. Миллер С.А. Ацетилен, его свойства, получение и применение: в 2 т. Т. 1. – Л.: Химия, 1969. – 879 с.
3. Талантов А.В. Основы теории горения. Ч. 1. – Казань: КАИ им. А.Н. Туполева, 1975. – 273 с.
4. Богомолов А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1977. – 252 с.

#### Выводы

1. Испытаниями на жидком топливе подтверждена работоспособность конструктивного решения горелочного устройства и его соответствие принципам действия горелок беспламенного горения и инфракрасного излучения.
2. Полученные данные по эксплуатационным характеристикам горелочного устройства тепловой мощностью  $6$  кВт свидетельствуют о перспективности использования криптола в качестве материала для создания пористой среды в горелках данного типа.

Работа выполнена в рамках госзадания на НИР (тема 2.59.2012).

5. Горелка: пат. 2125204 Рос. Федерация. № 95112038/06; заявл. 01.07.94; опубл. 20.01.99, Бюл. № 1. – 5 с.
6. Горелочное устройство инфракрасного излучения: решение № 2012141632/06(067033) от 13.02.2013 о выдаче пат. на пол. модель; заявл. 28.09.2012. – 3 с.
7. Сибилев А.В. Электрические печи. – М.; Л.: Главредлитцветмет, 1934. – 739 с.

Поступила 23.01.2013 г.