

А.В. Бабурин
(Академия ГПС МЧС России; e-mail: info@academygps.ru)

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАМЕНИ МЕТАНА ПРИ ЗАМЕНЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ВОЗДУХА НА СМЕСЬ (O₂ + CO₂)

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов срыва и проскока кинетического пламени метана на горелке при замене окислительной среды воздуха на смесь (O₂ + CO₂). Дан сравнительный анализ изменения пределов срыва и проскока при переходе к искусственной окислительной среде. Проведена оценка возможности использования стабилизаторов пламени.

Ключевые слова: проскок, стабилизация, горение.

A.V. Baburin STABILIZATION OF THE METHANE FLAME IN COURSE OF REPLACING THE AIR OXIDATION MEDIUM FOR SYNTHETIC MIXTURE (O₂ + CO₂)

The results of experimental studies of kinetic methane flame breakdown and breakthrough on burner, when replacing the oxidation medium of air for mixture (O₂ + CO₂) produced. A comparative analysis of changes to the breakdown and breakthrough in a case of transition to a synthetic oxidation medium specified. A possibility of the using of flame stabilizers cleared up.

Key words: breakthrough, stabilization, combustion.

Для эффективного улавливания диоксида углерода из продуктов сгорания и дальнейшего его полезного использования промышленное сжигание органических топлив предлагается проводить не в воздухе, а в искусственной окислительной среде, представляющей из себя смесь кислорода с CO₂ [1]. При этом источником CO₂ являются сами продукты горения. Однако устойчивый процесс горения газа в факеле возможен лишь в ограниченном интервале скоростей истечения горючей смеси из горелки. При малых скоростях истечения возможен проскок пламени в горелку, а при больших – срыв. Явление проскока пламени ограничивает минимальную производительность горелок, вызывая пережог смесителя, а при крупных смесителях сопровождается взрывом. Во избежание проскока пламени скорость истечения смеси из горелки должна превышать некоторую минимальную критическую скорость, которая зависит от скорости распространения пламени, диаметра и конструкции горелки. При увеличении диаметра горелки необходимо увеличивать скорость потока, так как критические значения скорости истечения связаны соотношением

$$g_{кр1}/g_{кр2} = d_1/d_2.$$

В горелках большого диаметра при сжигании природного газа в смеси с воздухом проскок пламени наблюдается при скорости истечения 3-4 м/с [2]. Предел срыва пламени, в отличие от проскока, зависит не только от скорости горения смеси и диаметра горелки, но и от того, в какую атмосферу вдувается горючая смесь. Например, известно, что при замене в окружающей среде воздуха на азот предел срыва пламени уменьшается [3]. При переходе к CO_2 он снижается еще больше.

При переходе от воздуха к окислительной среде ($\text{O}_2 + \text{CO}_2$) в горючей смеси происходит замена инертного разбавителя N_2 на CO_2 . Поскольку теплофизические свойства этих газов существенно различаются, то следует ожидать и существенных изменений в теплофизических свойствах горючей системы, что отразится на пределах срыва и проскока пламени.

Проведенные ранее эксперименты показали, что при горении метана (CH_4) в окислительной среде ($\text{O}_2 + \text{CO}_2$) наиболее близкими по своим характеристикам к параметрам горения в воздухе являются смеси, содержащие 34-38 % кислорода [4]. Для таких смесей и были проведены исследования пределов срыва и проскока пламени.

При факельном сжигании метановоздушных смесей в воздухе зона горения окружена газовой средой, состоящей из диоксида углерода (~10 %), паров воды (~20 %) и азота (~70 %). При переходе от воздуха к окислительной среде ($\text{O}_2 + \text{CO}_2$) изменяется и окружающая атмосфера, она содержит только диоксид углерода (~70 %) и пары воды (~30 %). Такая атмосфера обладает более сильным тушащим эффектом, поэтому при горении метана в смеси с O_2 и CO_2 пределы устойчивого горения могут оказаться уже.

Изучение пределов устойчивого горения проводили на горелке туннельного типа с диаметрами сопла 4,5 и 4,0 мм. Экспериментальная установка представляла собой систему подачи на горелку газов – CH_4 , CO_2 , O_2 , хранившихся в металлических баллонах, и воздуха, подаваемого компрессором. Система подачи обеспечивала объемный расход горючей смеси в пределах 0,0-1,6 л/мин при скорости потока газа до 3,9 м/с. Горелка могла быть выполнена из стеклянных или металлических (стальных) трубок различного диаметра и помещалась в топочный объем, изолированный от притока воздуха снаружи (рис. 1).

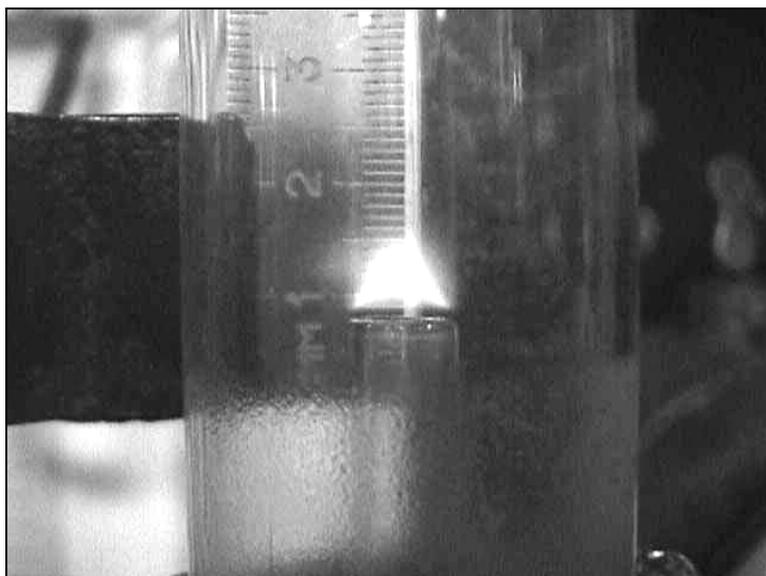


Рис.1. Пламя на срезе горелки, помещенной в топочный объём

Исследовались метановоздушные смеси и смеси метана с окислительной средой ($O_2 + CO_2$), содержащей 36 % O_2 при нескольких значениях коэффициента избытка воздуха: $\alpha = 0,9; 1,0$ и $1,1$. Пределы устойчивого горения показаны на рис. 2. Вопреки ожидаемому, процесс горения метана в окислительной среде ($0,36 O_2 + 0,64 CO_2$) оказался более устойчивым, чем в воздухе. По-видимому, это объясняется тем, что при сжигании метана в окислительной среде ($0,36 O_2 + 0,64 CO_2$) продукты горения обладают более высоким суммарным теплосодержанием и поэтому зона горения менее чувствительна к внешним воздействиям.

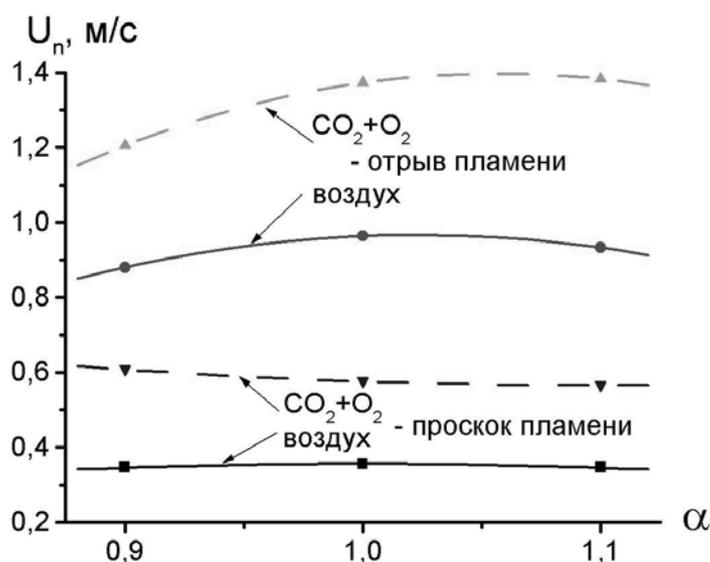


Рис. 2. Пределы устойчивого горения метана в воздухе и окислительной среде ($0,36 O_2 + 0,64 CO_2$). (Диаметр сопла горелки 4,5 мм)

Высокое теплосодержание продуктов горения повышает способность пламени и к проскоку. Скорость, при которой происходит проскок пламени, оказалась также выше. В целом область устойчивого горения в окислительной среде ($0,36 \text{ O}_2 + 0,64 \text{ CO}_2$) шире, чем в воздухе. Увеличение концентрации кислорода в окислительной среде ($\text{O}_2 + \text{CO}_2$) также приводит к повышению предельных значений скоростей для проскока и отрыва пламени и расширению области устойчивого горения (рис. 3).

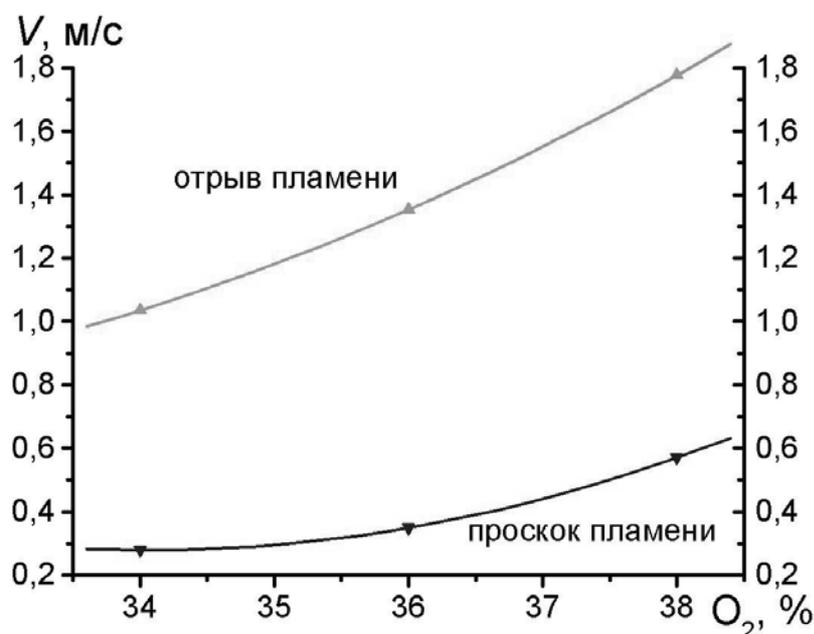


Рис. 3. Пределы устойчивого горения метана в окислительной среде ($\text{O}_2 + \text{CO}_2$) с различной концентрацией кислорода

Согласно данным [3], окружающая атмосфера, в которую вдувается горючая смесь, в первую очередь, оказывает влияние на пределы срыва пламени и практически не влияет на проскок. Устойчивое горение кинетического пламени обеспечивается путем непрерывного поджигания горючей смеси вблизи горелки. Но в этом случае стехиометрическая или более бедная горючая смесь у краев горелки сильно разбавляется окружающим воздухом или продуктами горения. Скорость распространения пламени в таких смесях и температура горения резко снижаются, зажигательное кольцо становится менее устойчивым, что приводит к отрыву пламени от горелки. Наиболее эффективно зажигающее кольцо только в области ламинарных режимов. С повышением форсировки горелки размеры и тепловая мощность этого кольца сильно уменьшаются и оно постепенно теряет

роль источника зажигания. При этом фронт пламени будет постепенно удлиняться, и, в конце концов, во всём скоростном поле не найдется ни одной точки, где бы соблюдалось равновесие скоростей потока и скорости распространения пламени, и горение окажется невозможным.

Для того, чтобы в таком потоке все же возник и стабилизировался фронт пламени, необходимо изменить распределение скоростей потока за счёт создания участков заторможенных скоростей, в которых снова окажется возможным необходимое динамическое равновесие. Этого можно достичь чисто гидродинамическими средствами, введя в поток какое-нибудь препятствие – стабилизатор пламени, в качестве которого используются:

1) введенный по оси потока твердый стержень (проволока), поверхность которого начинает тормозить движение вязкого газа, при этом фронт пламени расходится кверху, срываясь по краям. Если создаваемое препятствием местное торможение потока газа не распространяется должным образом на все сечение потока, то по периферии области воздействия препятствия будет двигаться невоспламеняющаяся горючая смесь, вызывая соответствующий механический недожог.

2) введенное в форсированный поток препятствия в виде кольца или сетки, создающей множество мелких конусов горения, по одному в каждой своей ячейке. Такое "неестественное" развитие фронта горения может привести к значительной суммарной поверхности, достаточной для сжигания всего потока, если не останется участков сечения, не покрытых очагами горения [5].

С помощью стабилизаторов пламени предельную скорость отрыва при горении стехиометрической смеси метана с окислительной средой ($0,36 \text{ O}_2 + 0,64 \text{ CO}_2$) также можно значительно повысить. При использовании в качестве стабилизатора металлической проволоки на сопле горелки диаметром 4 мм (рис. 4) предельное значение скорости срыва увеличивалось от 1,35 до 1,72 м/с. При использовании в качестве стабилизатора металлической сетки на сопле горелки диаметром 3 мм пламя не срывалось даже при скорости потока 3,89 м/с. Однако в этих случаях сами стабилизаторы, выполненные в данных опытах из стальной нелегированной проволоки и латунной сетки, подвергаются значительному нагреву, что потенциально может вызвать их пережог и потерю стабилизирующей способности.

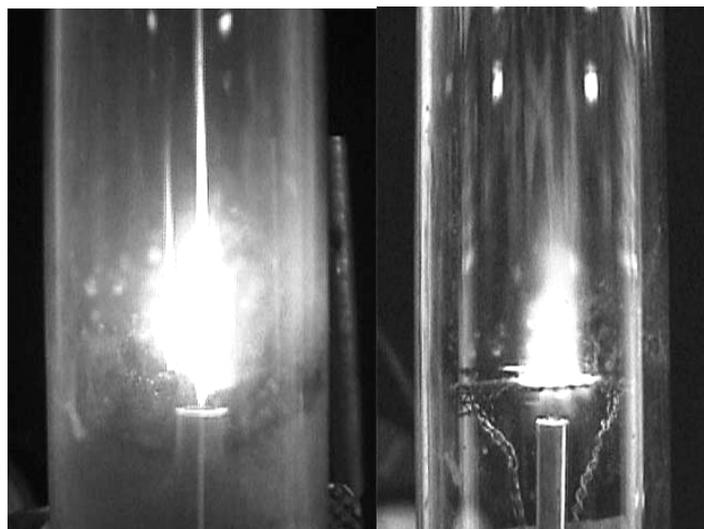


Рис. 4. Стабилизация пламени горючей смеси $\text{CH}_4 + 1,02 \cdot 2 (\text{O}_2 + 1,97 \text{CO}_2)$ металлической проволокой и на металлической сетке

Выводы:

1. Область устойчивого горения метана в окислительной среде ($\text{O}_2 + \text{CO}_2$) при концентрации в ней кислорода 34-38 % несколько шире, чем в воздухе. Однако срыв и проскок происходят при более высоких скоростях потока газовой смеси. При этом существует "перекрывающаяся" область устойчивого горения метана в смеси с воздухом и в смеси с окислительной средой ($\text{O}_2 + \text{CO}_2$), что позволяет использовать существующие промышленные топочные агрегаты без их конструктивного изменения.

2. Значительное увеличение скорости потока газа через горелку с целью увеличения жаропроизводительности возможно при использовании стабилизаторов пламени, при этом устойчивость пламени метана в смеси ($0,36 \text{O}_2 + 0,64 \text{CO}_2$) выше, чем в воздухе.

Литература

1. Ахмедов Р.Б., Ахмедов Э.Р. Перспективы экологически безопасной технологии сжигания органических топлив и горючих отходов с эффективным улавливанием и полезным использованием CO_2 . Международный форум "Энергетика и общество", Москва, 24-25 июня 1998 г.
2. Лавров Н.В., Шурыгин А.П. Введение в теорию горения и газификации топлива. - М.: АН СССР, 1962.
3. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. - М.: Мир, 1968.
4. Baburin A.V., Begishev I.R., Belikov A.K., Komrakov P.V. The parameters of methane kinetic burning in the oxidation medium ($\text{O}_2 + \text{CO}_2$) // Sixth International Conference on Carbon Dioxide Utilization, Sept. 9-14 2001, Breckenridge, Colorado, USA. Pre-printed Abstracts #1, p. 9.
5. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. - М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1959.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 22 апреля 2009 г.