

03:08

Влияние акустических колебаний на диффузионное горение метана

© М.С. Кривокорытов, В.В. Голуб, В.В. Володин

Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва

E-mail: mikhail.k@phystech.edu

Поступило в Редакцию 12 января 2011 г.

В настоящее время особенно актуальны экологические аспекты, связанные со сжиганием углеводородов, такие как снижение содержания токсичных соединений в продуктах сгорания. Кроме того, всегда остается важной задача о повышении эффективности использования практически любого вида топлива. Рассмотрен один из механизмов воздействия на процессы горения, а именно влияние акустических возмущений на диффузионное горение метана. Исследовалось влияние акустических возмущений на характеристики диффузионного факела, получена зависимость концентрации оксидов азота в продуктах горения от частоты акустического воздействия.

Известно, что акустические возмущения влияют на пламя, создавая неустойчивости и меняя форму пламени. При диффузионном горении, когда горючий газ истекает в окружающее пространство, реакции горения протекают на поверхности соприкосновения горючего с воздухом. В этом случае звуковые волны взаимодействуют с пламенем как непосредственно, так и косвенно. Прямое взаимодействие между волнами и пламенем происходит в зоне горения, тогда как косвенное взаимодействие происходит в области потока еще не прореагировавшего газа, независимо от особенностей пламени.

В зависимости от частоты и амплитуды звука появление участка, на который наложено акустическое воздействие, может серьезно повлиять на структуру и движение пламени в целом. Результатом акустического воздействия на диффузионное горение является множество эффектов, таких как снижение концентрации сажи [1] и оксидов азота [2] в продуктах горения, увеличение эффективности сгорания топлива [3]. Кроме того, в ряде случаев в результате акустических возмущений наблюдается эффект бифуркации пламени [4]. Авторы [1] наблюдали колебания под действием звука. По их мнению, эти колебания улучшают

перемешивание горючего и окружающего воздуха, что приводит к увеличению температуры в зоне реакции и догоранию частиц углерода. В экспериментах с коаксиальной подачей горючего и воздуха [2] улучшение перемешивания, по мнению авторов, приводит к снижению температуры в зоне реакции и концентрации NO_x . Несмотря на очевидные различия в выводах, делаемых авторами, стоит отметить, что все вышеупомянутые явления носят резонансный характер, т.е. проявляются на определенных частотах акустического воздействия. Ответ на вопрос, от чего зависит резонансная частота воздействия, требует большего количества экспериментальных данных.

Данная работа посвящена влиянию акустических возмущений на диффузионное горение метана. В эксперименте горелка представляет собой вертикальную трубку с открытым верхним концом, имеющую внутренний диаметр $d_{in} = 3 \text{ mm}$; на конце трубки предусмотрена возможность устанавливать профилированное сопло подачи газа с выходным диаметром 1.25 mm . Длина трубки в сто раз превосходит ее диаметр, так что профиль скоростей на выходе из трубки можно считать классическим хаген–пуайзелевским, при условии ламинарности потока. Как известно, критическое значение числа Рейнольдса для течения в трубе лежит между 2000 и 2300, что соответствует объемным скоростям потока 44 и 50.6 l/min , что в свою очередь соответствует линейным скоростям потока 598.4 и 688.2 m/s (при нормальных условиях 1 bar , 20°C). В эксперименте подача горючего регулировалась газовым ротаметром в пределах от 0 до 1.41 l/min (19 m/s), так что поток в трубке можно считать ламинарным. Источником акустических возмущений служила система, состоящая из генератора сигналов ГЗ-33, усилителя Radiotekhnika Y-101 и динамической головки Senon Audio PT25Z. Для определения уровня звукового давления использовался цифровой измеритель уровня шума AZ 8922. В экспериментах частота акустических возмущений менялась в пределах от 0 до 7 kHz , уровень звукового давления от 0 до 120 dB . Для определения содержания в продуктах горения оксидов азота использовался промышленный газоанализатор от MRU GmbH. Для получения качественных оценок о поведении конвективных потоков вокруг пламени проводилась съемка факела промышленным тепловизором.

Фотографии пламени под действием акустического поля при истечении газа через сопло представлены на рис. 1, скорость подачи метана составляла $0.55 \pm 0.05 \text{ l/min}$ ($7.5 \pm 0.7 \text{ ms}$). Плоскость излучателя звука

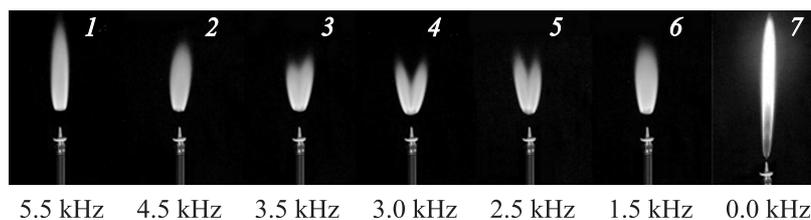


Рис. 1. Фотографии пламени. Уровень звукового давления — 100 dB.

перпендикулярна плоскости рисунка. Излучатель звука находится на расстоянии 10 см от оси горелки. В условиях эксперимента фронт акустического возмущения можно считать плоским, так как на расстоянии порядка высоты факела фазовая задержка составляет $\sim 1^\circ$. На рис. 1, 7 представлена фотография присоединенного диффузионного факела при истечении газа через сопло в отсутствие акустического излучения. Повышение скорости подачи газа приводило к дестабилизации горения и отсоединению пламени. При этом наблюдается явление гистерезиса — порог скорости подачи горючего, при котором происходит изменение состояния пламени (присоединенное/отсоединенное), зависит от текущего состояния пламени. Отрыв пламени происходит при скорости подачи газа 1.10 ± 0.05 l/min (15.0 ± 0.7 m/s), обратное присоединение при скорости 0.60 ± 0.05 l/min (8.2 ± 0.7 m/s). При наложении акустического поля отрыв и присоединение пламени происходят при меньших скоростях подачи метана: 1.00 ± 0.05 l/min (13.6 ± 0.7 m/s) и 0.50 ± 0.05 l/min (6.8 ± 0.7 m/s) соответственно. Это явление наблюдается во всем исследуемом частотном диапазоне.

Как показал эксперимент, под действием акустического поля поведение пламени значительно меняется. Во-первых, стоит отметить отсоединение пламени. Во-вторых, наблюдается бифуркация пламени, т.е. разделение факела, причем факел делится в плоскости, перпендикулярной излучателю звука. Явление становится заметным в широком частотном диапазоне 1.5–4.5 kHz (рис. 1, 6–2), дальнейшее увеличение частоты вплоть до 7 kHz не вызывает видимых изменений в форме пламени. При уровне звукового давления < 70 dB явление практически незаметно, увеличение уровня звукового давления приводит к увеличению угла между ветвями раздвоенного факела.

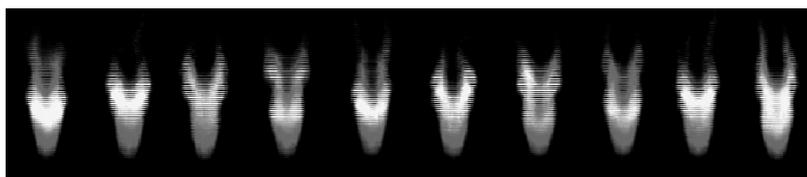


Рис. 2. Диффузионный факел под действием акустических возмущений. Кадры сделаны тепловизором, частота кадров 12.5 Hz.

Кадры, сделанные тепловизором, для случая оторванного пламени представлены на рис. 2; в эксперименте скорость подачи метана равнялась 0.55 ± 0.054 l/min (7.5 ± 0.7 m/s), частота акустического воздействия 3.0 kHz, уровень звукового давления 100 dB.

На рис. 2 отчетливо видно разделение факела. Мы наблюдаем не просто раздвоение факела, а и определенную зависимость степени раздвоения от времени с частотой 2.5 Hz. На кадрах видны области повышенной температуры (белые пятна), следующие друг за другом вверх по потоку. В областях с повышенной температурой факел расширяется. Стоит отметить, что тепловизор дает косвенную информацию о температуре в факеле по температуре окружающего факел воздуха, которая значительно ниже температуры пламени. Однако можно сделать следующий качественный вывод: наблюдаемые области повышенной температуры есть следствие конвективных потоков, вихревых структур, находящихся за пределами видимой зоны пламени. Эти вихревые структуры следуют друг за другом, вызывая локально интенсивное перемешивание горючего с окислителем, что вызывает рост температуры и увеличение поперечного размера факела. Вышесказанное подтверждается на экспериментах с факелом без акустического воздействия, где области повышенной температуры следуют друг за другом вверх по потоку с частотой ~ 4 Hz со скоростью ~ 0.2 m/s.

Для определения возможных применений наблюдаемых эффектов были проведены эксперименты по измерению токсичных выбросов в продуктах горения. На рис. 3 представлены результаты по измерению концентрации NO_x в продуктах горения. Прямая линия на рисунке соответствует концентрации NO_x в отсутствие акустических возмущений. Как видно из рисунка, концентрация оксидов азота в продуктах горения

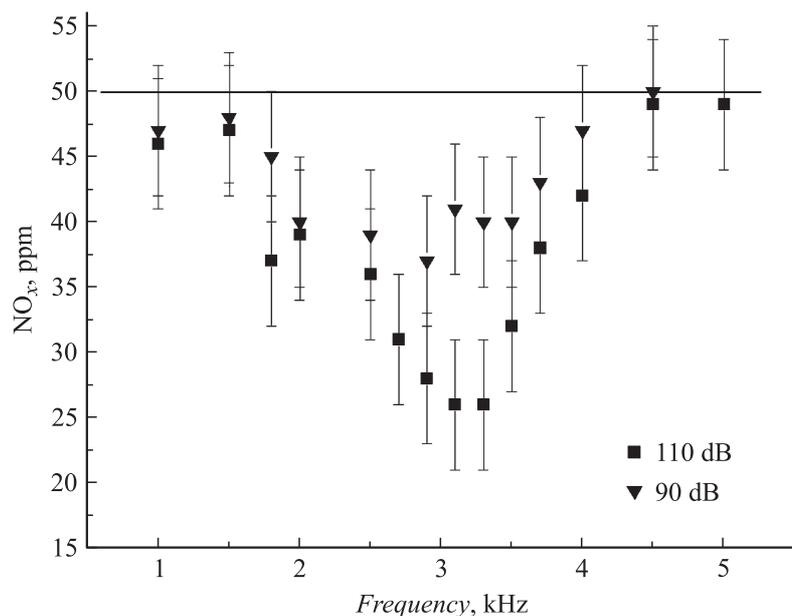


Рис. 3. Концентрация NO_x в продуктах горения.

зависит от частоты акустических возмущений и уровня звукового давления, причем частотная зависимость носит резонансный характер. На резонансной частоте ~ 3 kHz концентрация минимальна. Увеличение уровня звукового давления усиливает эффект снижения концентрации NO_x . Так, при уровне звукового давления 90 dB концентрация на резонансной частоте составляет ~ 37 ppm, а при уровне звукового давления 110 dB концентрация снижается до 25 ppm, что составляет половину концентрации NO_x в продуктах горения без акустических возмущений.

Проведенное экспериментальное исследование показало, что акустические возмущения влияют на пламя. Под действием акустических возмущений происходит отрыв факела от сопла горелки (рис. 1). Известно, что под воздействием акустического излучения изменение коэффициентов диффузии и теплопроводности может достигать 31% [5].

Изменения теплопроводности и теплового баланса в тонком слое присоединенного пламени могут объяснять отсоединение пламени.

В отсоединенном пламени был обнаружен эффект бифуркации в широком частотном диапазоне 1.5–4.5 kHz. При этом эксперимент показал, что разделение факела обусловлено разделением струи еще не прореагировавшего метана. Этот факт позволяет предположить, что явление не связано с процессами горения. Так почему же делится струя? Ответ на этот вопрос можно будет получить после проведения экспериментов с трассерным методом визуализации потока. Однако, по мнению авторов настоящей работы, в этом случае наиболее состоятельными являются два подхода: развитие гидродинамической неустойчивости в потоке еще не прореагировавшего газа и взаимодействие вихревых структур за пределами пламени [6].

В эксперименте раздвоение факела, очевидно, приводит к улучшению перемешивания топлива с воздухом, при этом концентрация NO_x в продуктах горения снижается. Условия образования оксидов азота при горении до сих пор не разработаны в достаточной мере и требуют глубокой проработки весьма сложной химической кинетики процесса в сочетании с детальным изучением тепломассообмена и его влияния на кинетику. Тем не менее известны „термический“, „быстрый“ и „топливный“ механизмы образования NO. Образование „топливных“ оксидов азота связывают с наличием азота в топливе, в то время как „термический“ и „быстрый“ механизмы непосредственно связаны с кинетикой реакций при горении. Выход „быстрых“ оксидов азота зависит от соотношения топливо–воздух, в то время как выход „термических“ оксидов азота зависит от температуры. Увеличение температуры и концентрации воздуха должно приводить к увеличению выхода NO.

Бифуркация пламени, вызванная акустическим воздействием, приводит к снижению концентрации NO_x в продуктах горения за счет снижения концентрации „термических“ и „быстрых“ NO, т.е. снижения температуры пламени, и улучшения перемешивания топливо–воздух. Однако роль того и другого процесса требует дополнительного изучения.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный контракт № 16.518.11.7007 от 12 мая 2011 г.

Список литературы

- [1] *Saito M., Sato M., Nishimura A.* // *Fuel*. 1998. V. 77. P. 973.
- [2] *Jeongseog Oh., Pilwon Heo, Youngbin Yoon* // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2009. V. 34. P. 7851–7861.
- [3] *Yoshida H., Koda M., Ooisi Y., Kobayashi K.P.* // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2001. V. 22. P. 372.
- [4] *Masataro Suzuki et al.* // 22nd ICDERS. Minsk, Belarus, 2009.
- [5] *Архангельский М.Е.* // *УФН*. 1967. Т. 92. В. 2.
- [6] *Reynolds W.C., Parekh D.E., Juvet P.J.D., Lee M.J.D.* // *Annu. Rev. Fluid. Mech.* 2003. V. 35. P. 295.