

03;10

Влияние отраженных акустических возмущений на ускорение фронта пламени

© В.В. Володин, А.Е. Коробов, С.В. Головастов, В.В. Голуб

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
E-mail: vlad11may@gmail.com

Поступило в Редакцию 3 июня 2015 г.

Экспериментально определен частотный спектр акустических возмущений, излучаемых ускоряющимся фронтом пламени в водородно-воздушной смеси в осесимметричном канале постоянного сечения. Изучено влияние акустических возмущений, отраженных от закрытого конца камеры сгорания, на ускорение фронта пламени. Обнаружено, что частотный спектр генерируемых акустических колебаний в условиях эксперимента имеет максимумы на частотах, близких к 250, 800, 1500 Hz. При этом средняя скорость пламени составляет 200 m/s. Получены спектры генерируемых акустических колебаний и скорость фронта пламени в зависимости от материала закрытого конца осесимметричного канала для стехиометрической водородно-воздушной смеси.

Скорость распространения фронта пламени при дефлаграции водородно-воздушных смесей сильно зависит от неустойчивостей фронта пламени. Характер распространения фронта пламени в газовых средах определяется геометрическими характеристиками исследуемого объема, граничными условиями, термодинамическими параметрами, а также различного рода возмущениями, распространяющимися в зоне выделения энергии. К изменениям интенсивности энерговыделения и скорости фронта пламени приводят термодиффузионные, гидродинамические и термоакустические типы неустойчивости.

Одним из первых исследователей генерации волн сжатия пламенами, распространяющимися в замкнутом объеме, и взаимодействия между ними был Маркштейн [1]. Влияние неустойчивостей на динамику фронта пламени приведено в работах [2-4]. Влияние акустического поля на фазу энерговыделения и термодинамические параметры сгораемого газа приведено в работах [5] для перехода горения в детонацию,

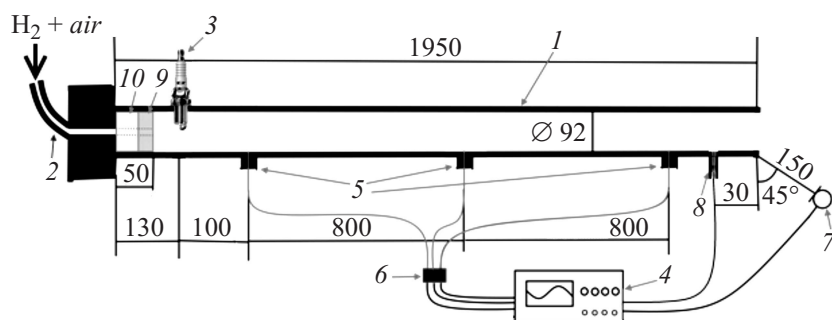


Рис. 1. Схема экспериментального стенда (размеры представлены в миллиметрах). 1 — детонационная труба; 2 — трубка, подающая смесь; 3 — свеча зажигания; 4 — осциллограф; 5 — световоды; 6 — блок фотодиодов; 7 — микрофон; 8 — пьезоэлектрический датчик давления; 9 — звукопоглощающее покрытие; 10 — набор пластин (добор).

в работе [6] для горения. В работах [7,8] описан характер воздействия акустического поля на струю топливной смеси и дальнейшее горение струи.

Несмотря на то что генерируемое внешнее акустическое поле может являться промоутером, ускоряющим фронт пламени, подобное акустическое поле может также приводить к разрушению неустойчивостей, если интенсивность этого поля превышает интенсивность генерируемых неустойчивостей, а частота либо фаза не попадают в резонанс. Подобный метод может оказаться эффективным для предотвращения развития опасных режимов горения.

Целью работы было определение частотного спектра акустических возмущений, излучаемых ускоряющимся фронтом пламени в водородно-воздушной смеси, и влияния акустически поглощающих покрытий на скорость фронта пламени.

Для определения спектра акустических возмущений использовалась стальная цилиндрическая детонационная труба, закрытая с одного конца звукопоглощающим элементом и жесткой алюминиевой стенкой. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Геометрические параметры детонационной трубы и места расположения датчиков указаны на рисунке.

Типы звукопоглощающих поверхностей и их параметры

№	Материал	Толщина, mm	Плотность, kg/m ³	Пористость, %	Размер пор/волокон, μm
1	Без покрытия	—	—	—	—
2	Поролон	9	14.15	98.87	285
3	Базальтовая вата	50	45.00	98.50	22
4	Поролон	38	56.52	95.48	218
5	Металлическая шерсть	50	157.19	98.00	56

Предварительно перемешанная стехиометрическая смесь водорода с воздухом подавалась через медную трубку 2 диаметром 4 mm в детонационную трубу 1. Избыток смеси истекал через открытый конец трубы в атмосферу. Через 2–5 s осуществлялось воспламенение смеси искровым разрядом энергией около 20 mJ 3. Таким образом, начальное давление смеси равнялось атмосферному давлению, температура 300 K.

Для определения амплитудно-частотных характеристик пламени использовался микрофон МДМ-7 7, установленный на расстоянии 150 mm от открытого конца. Сигнал с микрофона подавался на цифровой осциллограф Tektronix DRO 7054 4. Над полученными данными производилось дискретное преобразование Фурье. Таким образом, получался спектр акустических возмущений, создаваемых пламенем. Используемые типы звукопоглощающих поверхностей 9 представлены в таблице. Набор пластин из оргстекла 10 между металлическим торцом трубы и звукопоглощающей поверхностью использовался для того, чтобы обеспечить постоянное одинаковое расстояние между поверхностью звукопоглощающего элемента и искрового разрядника, т.е. расстояние от искрового разрядника до жесткой либо звукопоглощающей стенки во всех экспериментах было одинаковым.

Для определения скорости пламени использовались фотодиоды ФД-256 6. Фотодиоды соединялись с детонационной трубой с помощью оптических световодов 5, установленных на стенке детонационной трубы в радиальном направлении к оси. Для получения профиля давления на выходе из трубы был использован пьезоэлектрический

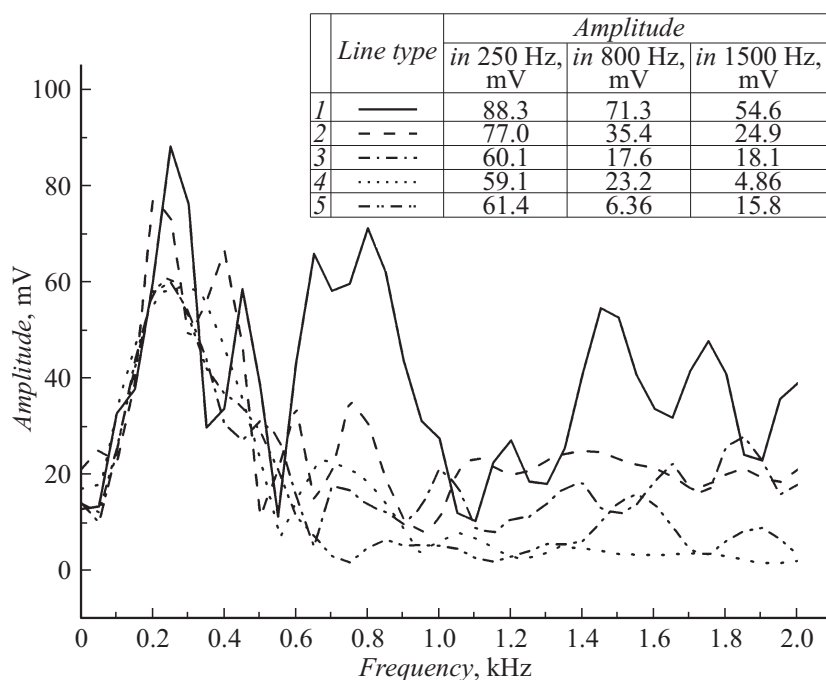


Рис. 2. Звуковой спектр у открытого конца трубы: 1 — без звукопоглотителей; 2 — поролон 9 мм; 3 — базальтовая вата, 4 — поролон 38 мм, 5 — металлическая шерсть.

датчик давления РСВ-111А24 8. Сигналы с датчиков света и давления поступали на цифровые осциллографы Tektronix TDS 3014В.

На рис. 2 представлен спектр акустических колебаний, зафиксированных микрофоном на конце трубы, до прихода фронта пламени. Можно выделить 3 области: в районе 250, 800 и 1500 Hz. Обнаружено, что все используемые звукопоглотители слабо влияют на звуковые колебания низких частот. Это объясняется тем, что длина волны при частоте 250 Hz в стехиометрической водородно-воздушной смеси (скорость звука около 400 м/с) примерно равна 1.6 м, что значительно превышает толщину звукопоглотителей. При увеличении частоты эффективность используемых звукопоглотителей увеличивалась.

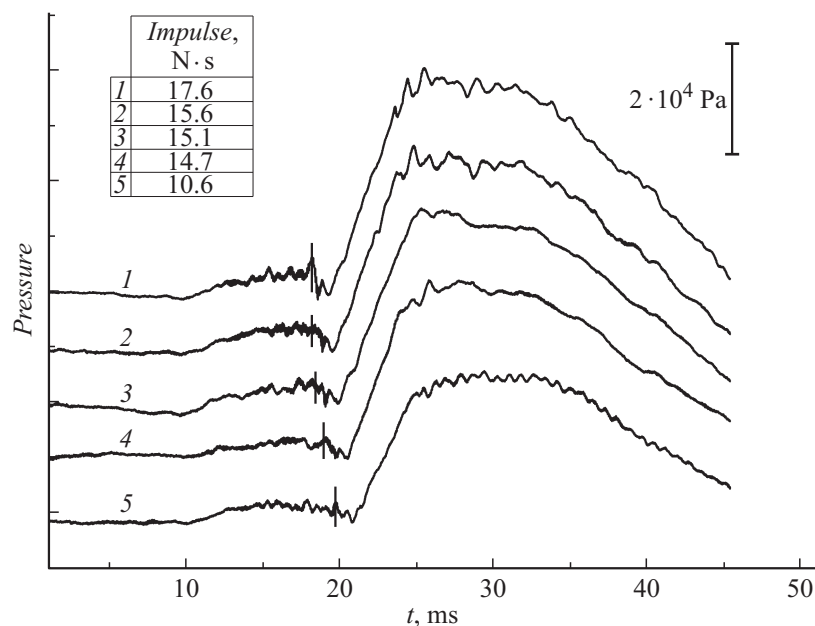


Рис. 3. Давление у открытого конца трубы. Вертикальной серой линией обозначен момент выхода пламени; 1 — без звукопоглотителей, 2 — поролон 9 мм, 3 — базальтовая вата, 4 — поролон 38 мм; 5 — металлическая шерсть.

На рис. 3 представлены профили давлений вблизи открытого конца трубы. Для всех рассматриваемых материалов наблюдалось уменьшение максимального значения и импульса (интеграла по времени) давления. Наилучший результат получен при использовании в качестве звукопоглотителя металлической шерсти. Достигнуто уменьшение импульса давления на 40%. Также наблюдается уменьшение скорости пламени.

Таким образом, исследовано влияние различных звукопоглощающих материалов на ускорение пламени в ограниченном объеме. Показано, что применение металлической шерсти позволило замедлить пламя и снизить величину импульса давления волны сжатия на 40%.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 14-50-00124).

Список литературы

- [1] *Markstein G.H.* (ed.). *Nonsteady Flame Propagation: AGARDograph*. Elsevier, 2014. V. 75. 337 p.
- [2] *Yanez J., Kotchourko A., Lelyakin A.* // *Nuclear Engineering and Design*. 2012. V. 250. P. 678–686.
- [3] *Rubtsov N.M.* et al. // *Mendeleev Communications*. 2014. V. 24. N 1. P. 50–52.
- [4] *Regele J.D., Kassoy D.R., Vasilyev O.V.* // *Combust. Theory Modelling*. 2012. V. 16. N 4. P. 650–678.
- [5] *Massa L., Lu F.K.* // *Combust. Theory Modelling*. 2011. V. 15. N 3. P. 347–371.
- [6] *Wang Z.* et al. // *Proc. Combust. Institute*. 2015. V. 35. N 2. P. 2137–2144.
- [7] *Krivokorytov M.S., Golub V.V., Moralev I.A.* // *Tech. Phys. Lett.* 2013. V. 39. N 9. P. 814–817.
- [8] *Kartheekyan S., Chakravarthy S.R.* // *Combust. flame*. 2006. V. 146. N 3. P. 513–529.