

Влияние отраженных акустических возмущений на ускорение фронта пламени

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт
высоких температур РАН, 125412, Москва, Россия

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 взаимодействии между ними был Маркштейн [1]. Влияние неустойчивостей на динамику фронта пламени приведено в работах [2,3,4]. Влияние акустического поля на фазу энерговыделения и термодинамические параметры сгораемого газа приведено в работах [5] для перехода горения в детонацию, 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 влияние 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.

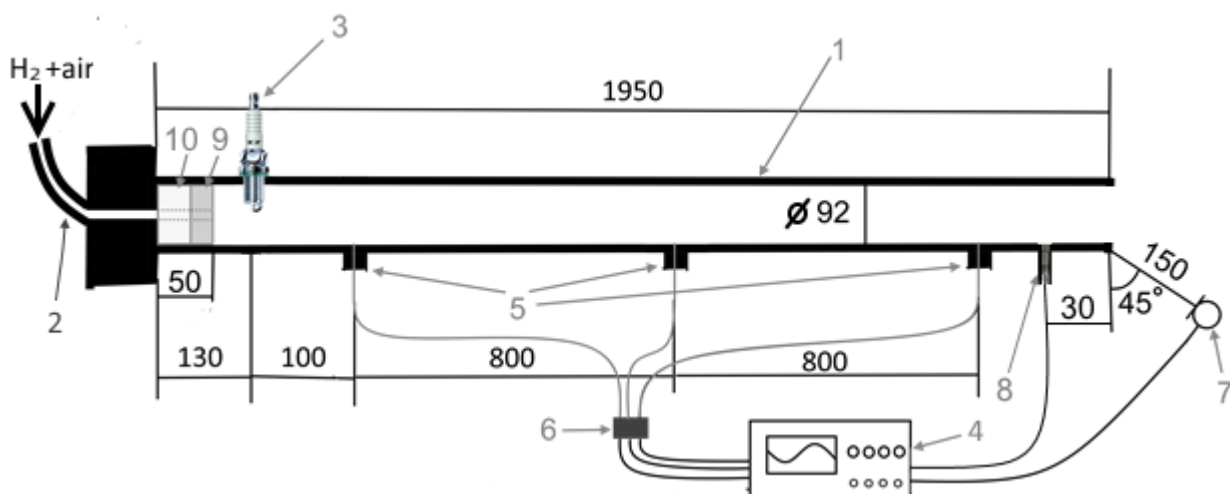


Рис. 1. Схема детонационной трубы (размеры представлены в миллиметрах). 2 – трубка, подающая смесь; 3 – свеча зажигания; 4 – осциллограф; 5 – световоды; 6 – блок фотодиодов; 7 – микрофон; 8 – пьезоэлектрический датчик давления; 9 – звукопоглощающее покрытие; 10 – набор пластин (добор).

Предварительно перемешанная стехиометрическая смесь водорода с воздухом подавалась через медную трубку (2) диаметром 4 мм в детонационную трубу. Избыток смеси истекал через открытый конец трубы в атмосферу. Через 2-5 с осуществлялось воспламенение смеси искровым разрядом энергией около 20 мДж (3). Таким образом, начальное давление смеси равнялось атмосферному давлению, температура 300 К.

Для определения амплитудно-частотных характеристик пламени использовался микрофон МДМ-7 (7), установленный на расстояние 150 мм 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 представлены в Таблице I. Набор пластин из оргстекла 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.

1. 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

Для определения скорости пламени использовались фотодиоды ФД-256. 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 датчик давления РСВ-111А24. 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 Hz, 800 Hz 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 m/s) примерно равна 1.6 m, что значительно превышает толщину звукопоглотителей. При увеличении частоты эффективность используемых звукопоглотителей увеличивалась.

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 %. Так же наблюдается уменьшение скорости пламени.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, N 14-50-00124.

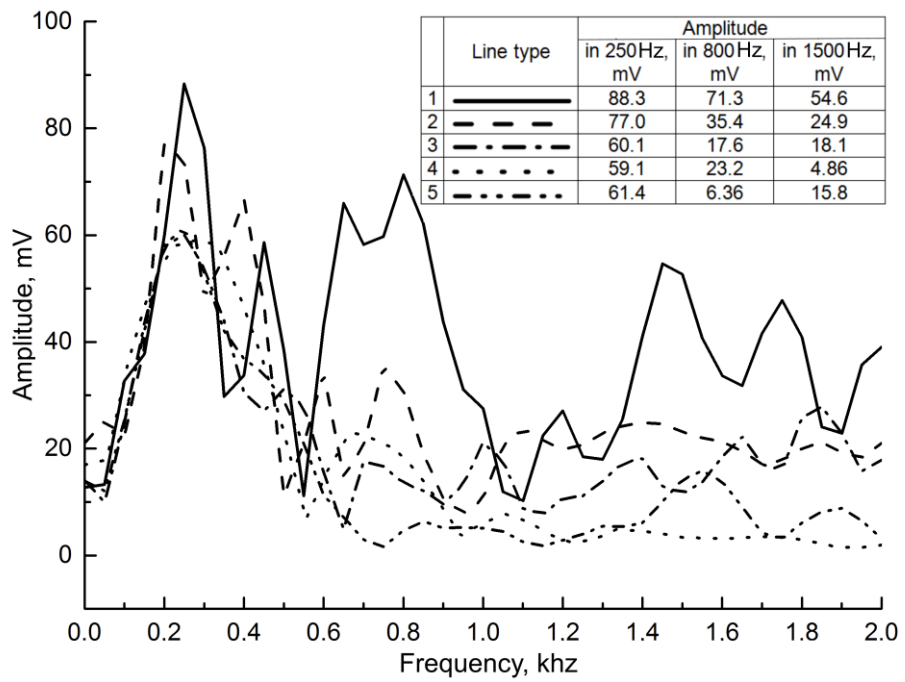


Рис. 2. Звуковой спектр у открытого конца трубы; 1 - без звукопоглотителей; 2 – поролон 9 mm; 3 – базальтовая вата; 4 - поролон 38 mm; 5 – металлическая шерсть.

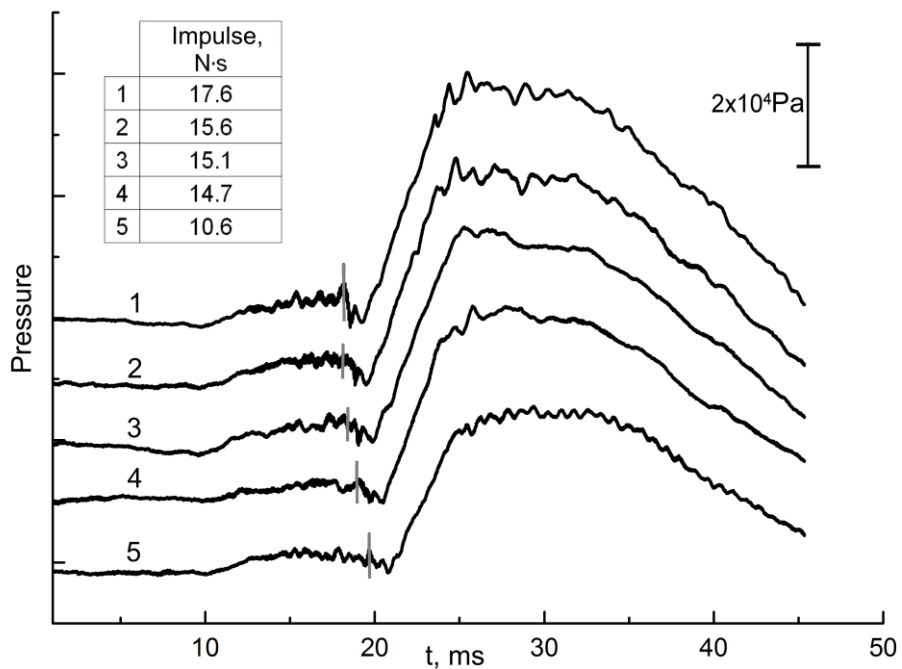


Рис. 3. Давление у открытого конца трубы. Вертикальной серой линией обозначен момент выхода пламени; 1 - без звукопоглотителей; 2 – поролон 9 mm; 3 – базальтовая вата; 4 - поролон 38 mm; 5 – металлическая шерсть.

Список литературы

1. *Markstein G. H. (ed.). Nonsteady Flame Propagation: AGARDograph.* – Elsevier, 2014. – Т. 75. 337 p.
2. *Yanez J., Kotchourko A., Lelyakin A. // Nuclear Engineering and Design.* – 2012. – Т. 250. – С. 678-686.
3. *Rubtsov N. M. et al. // Mendeleev Communications.* – 2014. – Т. 24. – №. 1. – С. 50-52.
4. *Regele J. D., Kassoy D. R., Vasilyev O. V. // Combustion Theory and Modelling.* – 2012. – Т. 16. – №. 4. – С. 650-678.
5. *Massa L., Lu F. K. // Combustion Theory and Modelling.* – 2011. – Т. 15. – №. 3. – С. 347-371.
6. *Wang Z. et al. // Proceedings of the Combustion Institute.* – 2015. – Т. 35. – №. 2. – С. 2137-2144.
7. *Krivokorytov M. S., Golub V. V., Moralev I. A. // Technical Physics Letters.* – 2013. – Т. 39. – №. 9. – С. 814-817.
8. *Karthekeyan S., Chakravarthy S. R. // Combustion and flame.* – 2006. – Т. 146. – №. 3. – С. 513-529.