

03

Релаксационное горение газовой смеси в трубе: „парадокс“ движения поршня

© М.М. Алексеев, В.П. Самсонов, О.Ю. Семенов

Сургутский государственный университет, Сургут
E-mail: svp@iff.surgu.ru

Поступило в Редакцию 25 апреля 2012 г.

Проведено экспериментальное исследование закономерностей распространения фронта пропановоздушного пламени и поршня от закрытого конца трубы к открытому. Показано, что длина трубы и коэффициент заполнения трубы горючей смесью определяют условия возникновения колебаний поршня и фронта пламени. Обнаружено, что в определенные фазы колебаний скорости поршня и фронта пламени направлены противоположно друг другу. Колебания газа в трубе порождают релаксационный режим горения, при котором скорость распространения фронта пламени влияет на изменение амплитудно-частотных характеристик. Приведены зависимости периодического изменения координат поршня и фронта пламени от времени. Предложено физическое объяснение явления встречного движения фронта пламени и поршня.

Автоколебаниям при релаксационном горении в энергетических установках посвящено множество классических работ [1,2]. Релаксационное горение осуществляется в камерах сгорания, в которых в результате совокупности физико-химических процессов периодически восстанавливаются начальные условия для продолжения горения, нарушаемые фронтом пламени. При распространении пламени в длинном канале амплитуды колебаний могут быть сравнимы с его длиной. Частота колебаний давления и скорости при увеличении амплитуды становится меньше звуковой [3,4]. Важным с точки зрения технических приложений примерами являются процессы внутренней баллистики: горение смесей в двигателях внутреннего сгорания, в шахтах газопроводах и др. Однако в научной литературе сведения об экспериментальных исследованиях взаимодействия фронта пламени с элементами конструкций камеры внутреннего сгорания весьма ограничены. Как правило, упоминаются исследования, посвященные лишь визуализации течений горючих смесей в двигателях внутреннего сгорания или визуализации фронта пламе-

ни на ранних стадиях после воспламенения смеси [5–7]. До настоящего времени автоколебания газа и фронта пламени хорошо изучены для камер сгорания — резонаторов Гельмгольца в рамках теории линейной акустики. Типичным является развитие воронки на поверхности фронта пламени, известное как „тюльпанообразное“ пламя. Оно связано с колебаниями столба продуктов сгорания в трубе и колебаниями поршня и изучалось в ряде работ, например [8,9]. В работе [10] выработан критерий возникновения ударно-волновых течений газового столба в трубе, определяющего движение поршня. Сведения об исследованиях структуры фронта пламени при релаксационном горении, когда период колебаний макроскопического объема горючей смеси меньше характерного времени его сгорания в научной литературе, отсутствуют.

Целью данной работы является экспериментальное исследование закономерностей распространения фронта пламени и поршня в длинной трубе от закрытого конца трубы. В экспериментах использовали как цилиндрические трубы, так и трубы с прямоугольным поперечным сечением. Диаметры цилиндрических труб равнялись 15, 50 и 110 mm. Размеры поперечного сечения прямоугольных труб оставляли равными 31.0×3.2 mm. Длины труб превышали их поперечные размеры в 15–100 раз. В цилиндрическую трубу вводили полый поршень в форме цилиндра. В прямоугольной трубе поршень имел форму буквы „Н“, что позволяло уменьшить массу поршня. Длина поршня превышала его диаметр (поперечный размер поршня). Его, в свою очередь, подбирали так, чтобы сила трения между стенками поршня и трубы была минимальной. Площадь поперечного сечения зазора между стенками поршня и трубы примерно в 100 раз меньше поперечного сечения трубы, поэтому скоростью прохождения газа в зазоре и падением давления вдоль длины поршня можно было пренебречь.

Трубу заполняли пропановоздушной смесью через вентиль в закрытом конце. Зажигание смеси осуществляли искрой при высоковольтном разряде между двумя электродами, встроенными в стенки канала у закрытого конца. Видеосъемку движения поршня и распространения фронта пламени производили через прозрачные стеклянные стенки трубы скоростной цифровой кинокамерой AOS Technologies AG X-PRI и цифровой автофокусной зеркальной фотокамерой Canon EOS 30D.

Длина трубы, коэффициент заполнения трубы горючей смесью, нормальная скорость распространения пламени и величина зазора между боковыми стенками поршня и трубы являются параметрами

эксперимента, определяющими амплитуду, частоту и декремент затухания колебаний столба газа в трубе. Коэффициент заполнения трубы горючей смесью b задавали, выбирая необходимое отношение объема горючей смеси V к общему объему трубы V_0 : $b = V/V_0 = l/L$, L и l — длина трубы и координата начального положения основания поршня, отсчитываемая от закрытого конца трубы. Нормальную скорость распространения пламени изменяли путем изменения концентрации пропана в смеси с воздухом. Опыты повторяли при различных значениях относительной величины зазора между боковыми стенками поршня и трубы δ . Ее вычисляли по формуле: $\delta = (R - r)/R$, где r и R — соответственно радиусы (размеры поперечного сечения) поршня и трубы. Это позволяло исследовать влияние присоединенной массы газа на амплитудно-частотные характеристики релаксационного горения газа в трубе.

После воспламенения смеси поршень смещается в сторону открытого конца трубы. Величина максимального смещения поршня определяется величиной

$$X_p = (a - 1)l, \quad (1)$$

где $a = P/P_0$ — коэффициент расширения продуктов горения, P и P_0 — давление продуктов сгорания и воздуха, находящегося перед поршнем. Очевидно, что если $L < X_p$, то поршень вылетит из открытого конца трубы, и колебания в трубе будут совершать только газ в трубе и фронт пламени. Релаксационное горение тогда будет осложняться процессами смешения горючей смеси и продуктов сгорания с воздухом, засасываемым в трубу. Если $L > X_p$, то в колебания вовлекается поршень.

Из соотношения (1) следует, что коэффициент расширения продуктов горения определяет условия колебания столба газа в трубе. Физически это связано с тем, что при расширении малого объема газа упругие силы могут оказаться меньше сил вязкого трения. Кроме того, относительная величина зазора δ определяет условия колебания поршня, так как от него зависит отношение силы трения между поршнем и стенками трубы к силе, действующей со стороны газа. Увеличение зазора между боковой поверхностью поршня и стенками трубы приводит к уменьшению амплитуды колебания поршня и увеличению амплитуды колебаний фронта пламени.

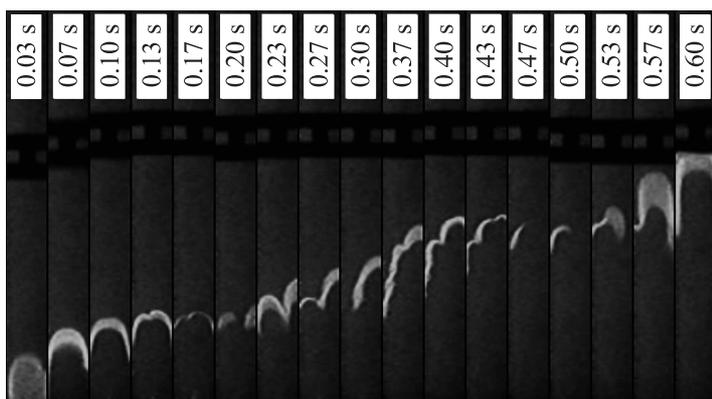


Рис. 1. Фрагменты из видеофильма, иллюстрирующие колебания поршня и фронта пламени при релаксационном горении пропановоздушной смеси в полукрытой трубе.

Действительно, из экспериментов следует, что при $b < 0.05$ и $\delta > 0.10$ совместные колебания поршня и фронта пламени не возникают. К моменту времени, когда фронт пламени достигает торцевой поверхности поршня, он начинает возвращаться в исходное положение равновесия и останавливается. Изменение коэффициентов b и δ до критических значений b_c и δ_c приводит к возникновению колебаний поршня и фронта пламени. Колебания происходят до тех пор, пока не сгорит вся горючая смесь, поэтому число колебаний возрастает при увеличении длины трубы и коэффициента заполнения трубы.

На рис. 1 представлены типичные фрагменты из видеофильма, иллюстрирующие динамику движения поршня и распространения фронта пламени в прямоугольной трубе. Длина трубы равна 400 мм, относительная величина зазора равна 0.04. Труба заполнена смесью пропана с воздухом с объемной концентрацией пропана, равной 5.5%. Указанные условия эксперимента позволили визуализировать совместные колебания фронта и пламени. Видеосъемку производили со скоростью 60 fps. Изображение поршня находится в верхней части фотографий и напоминает темную букву „Н“, повернутую на 90°. Из фрагментов видеофильма видно, что в течение каждого периода колебаний имеется

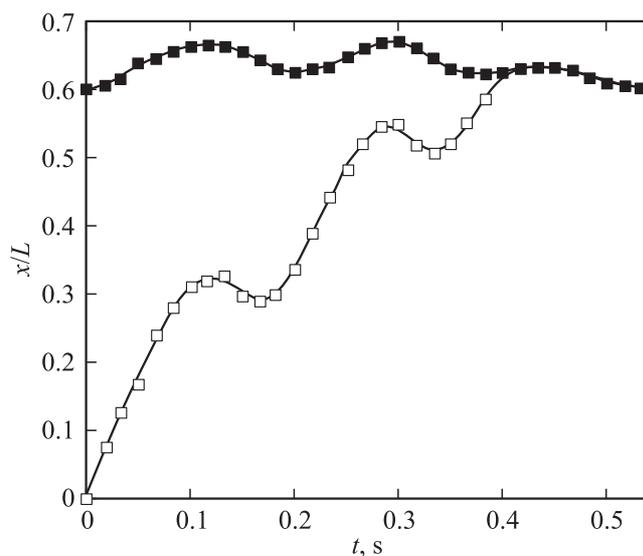


Рис. 2. Зависимость координат фронта пламени и поршня в канале от времени.

промежуток времени, когда поршень движется навстречу фронту пламени. Это сопровождается возмущением фронта пламени, проявляемым в виде плоской „воронки“ на поверхности, своей вершиной, обращенной к закрытому концу трубы. Природа возникновения воронки связана с развитием импульсного ускоренного течения газа и описана в работе [2] и ряде других работ. Глубина воронки равна амплитуде колебаний фронта пламени. В последующие моменты времени „воронка“ порождает ячеистую структуру на поверхности пламени, которая в течение одного периода колебаний сносится к стенкам трубы и погибает. На последних кадрах видеофильма видно, что к концу третьего периода колебаний фронт пламени восстанавливает свою гладкую и выпуклую форму. Те же закономерности наблюдаются и при распространении пламени в цилиндрической трубе.

На рис. 2 представлены графики зависимости координат поршня и фронта пламени от времени. Координаты фронта пламени и задней поверхности поршня обозначены соответственно светлыми и темными точками. Координату фронта пламени вычисляли по положению плоско-

сти, проведенной в поперечном сечении трубы и равноудаленной от его передней и задней точки. Из графиков следует, что скорость колебаний газа может превышать видимую скорость распространения пламени и влиять на его устойчивость. Кроме того, колебания поршня отстают по фазе от колебаний фронта пламени примерно на четверть периода. Это объясняет движение поршня навстречу пламени, кажущееся на первый взгляд парадоксальным.

Сдвиг фаз колебаний объясняется совокупностью влияния нескольких причин. Одна из них обусловлена отставанием колебаний скорости поршня от колебаний силы на половину периода. Другая связана с тем, что кроме нормальных сил давления на поршень действуют касательные силы трения на его боковой поверхности, которые, как известно (см., например, [4]), запаздывают относительно колебаний скорости газа на $\pi/4$. Третья причина порождена конечным временем повышения давления, связанным с величиной скорости распространения пламени.

Таким образом, причиной „парадокса“, заключающегося в движении поршня навстречу фронту пламени, является сдвиг фаз колебаний фронта пламени и поршня. Изменяя конечное время сгорания газовой смеси и силы трения, действующие на боковую поверхность поршня, можно управлять согласованными колебаниями фронта пламени и поршня, добиваясь ситуации, при которой векторы скорости фронта пламени и поршня становятся противоположными.

Список литературы

- [1] Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. М.: Физматгиз, 1961. 500 с.
- [2] Маркштейн Дж.Г. Нестационарное распространение пламени. М.: Мир, 1968. 437 с.
- [3] Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Мир, 1966. 520 с.
- [4] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
- [5] Bates S.C. // Experiment in Fluids. 1989. V. 7. N 5. P. 335–343.
- [6] De Soete G.C. // International Conference on Combustion. Institute of Mechanical Engineers. 1983. V. 1. P. 93–100.
- [7] Lumley J.L. // Annual Reviews of Fluid Mechanics. 2001. V. 33. P. 319–38.
- [8] Clanet C. // Combustion and Flame. 1996. V. 105. P. 225–238.
- [9] Petchenko A. // Physical Review Letters. 2006. V. 97. P. 164 501–164 504.
- [10] Булович С.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 11. С. 40–44.