

03;12

## Формирование спинового фронта газоздушного пламени

© М.М. Алексеев, И.В. Смирнова, В.П. Самсонов

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

Поступило в Редакцию 7 октября 2010 г.

Предложен способ формирования спинового фронта пропановоздушного пламени в плоской щели, образованной между двумя пластинами. Показано, что спиновые фронты пламени образуются в газовых смесях с избытком горючей компоненты и порождены распадом первоначально цилиндрического фронта пламени. Обнаружено, что распад цилиндрического фронта обусловлен теплодиффузионной неустойчивостью, сопровождаемой подавлением большинства малых возмущений на поверхности пламени, отбором и быстрым развитием всего двух возмущений на поверхности пламени. Дальнейшее развитие полей температур, концентраций и скоростей в окрестности ведущих точек развивающихся возмущений приводит к формированию спинового фронта пламени в виде серповидно вытягивающихся „усов“. Получены зависимости угловой и тангенциальной скорости распространения спинового фронта пламени.

Научный интерес к спиновому горению связан со сложностью нелинейных волновых явлений во фронте горения, до конца не понятых до настоящего времени. Прикладное значение спинового горения обусловлено изменением кинетики химических реакций и интенсивности теплообмена. До настоящего времени был известен спиновой режим распространения детонационного фронта пламени, наблюдавшийся на пределах существования стационарной детонации в трубах [1,2]. Спиновые волны при горении конденсированных систем обнаружены авторами работы [3]. Их изучение продолжено авторами работы [4]. Авторы работы [4] отмечают, что описание спинового фронта пламени при его дефлаграционном распространении в газоздушной смеси в научной литературе отсутствует. Попытка получить спиновый режим при медленном горении газа в цилиндрически расходящемся потоке вблизи предела гашения ламинарного пламени была предпринята в

работе [5]. Возможное anomальное поведение фронта пламени авторы работ [6–8] связывают с особенностями теплообмена в микроканалах и достижением сверхадиабатической температуры.

Целью данной работы является экспериментальное определение условий формирования спинового фронта пламени в расходящейся волне горения, распространяющейся в смеси горючего газа с воздухом. Из геометрических соображений кинематики фронта следует, что должны быть созданы такие условия распространения пламени, при которых вектор нормали в произвольно выбранном участке его поверхности непрерывно меняет свое направление. Такое геометрическое ограничение определяет наиболее простой объект исследования — расходящуюся цилиндрическую волну горения в узком зазоре между двумя плоскими стенками камеры сгорания. Физико-химическими ограничениями являются условия, определяющие устойчивость и скорость распространения фронта пламени, а также интенсивность теплообмена: состав горючей газовой смеси, способ инициирования волны горения, толщину зазора и другие условия.

Для проведения экспериментов была собрана экспериментальная установка, представляющая собой открытую камеру сгорания, образованную зазором между двумя горизонтальными плоскими пластинами квадратной или круглой формы, расположенными одна над другой на расстоянии  $1 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3}$  м друг от друга. Сторона квадрата (диаметр круга) превышала 0.6 м. Верхняя пластина — стеклянная, через нее производили визуализацию пламени, фото- и киносъемку. Ввод горючего газа осуществляли через сопло, установленное в центре нижней пластины. Объемный расход горючей газовой смеси контролировали расходомером-счетчиком газа: РГС-1 с относительной погрешностью  $\pm 1\%$ . Вводимый объем горючей смеси более чем в 10 раз превышал объем камеры сгорания. Иницирование горения производили высоковольтным разрядом между электродами над соплом, через которое подавали газовую смесь.

Исследовали форму первоначально цилиндрического фронта пламени и измеряли скорость его распространения в открытом зазоре между пластинами. Изменяемыми параметрами эксперимента являлись: концентрация пропана в смеси с воздухом и величина зазора между пластинами. Диапазон изменения величины зазора между пластинами, при котором ожидалось получение спинового фронта пламени, вычисляли

по формуле

$$l = \frac{\delta}{2},$$

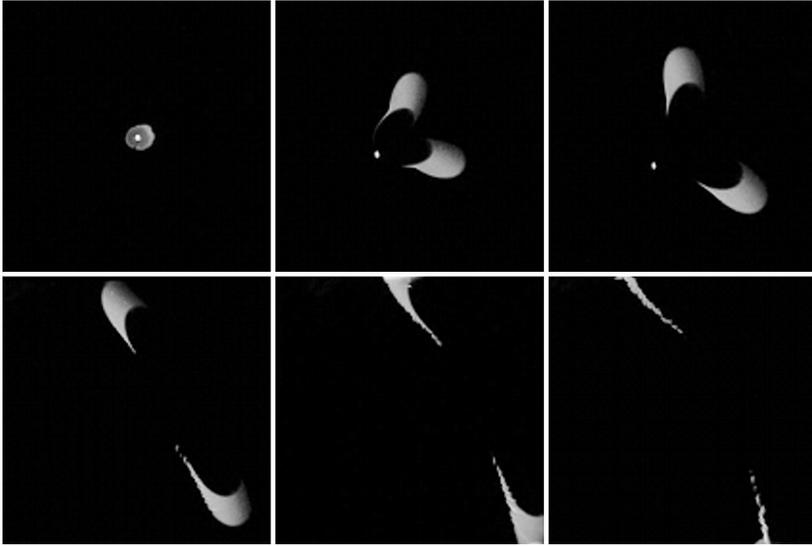
где  $\delta$  — толщина пограничного слоя, возникающего при движении продуктов горения между стенками камеры сгорания. Оценивая порядок толщины пограничного слоя по соотношению

$$\delta = \sqrt{\frac{\nu L}{u}},$$

где  $\nu = 100 \cdot 10^{-6} - 225 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  — коэффициент кинематической вязкости продуктов горения,  $L = 0.6 \text{ m}$  — размер пластины,  $u = 2 - 10 \text{ m/s}$  — скорость вытекания продуктов горения из открытой щели, получим  $l = 3 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

Из проведенных опытов действительно следует, что при величине зазора между пластинами, превышающей  $10^{-2} \text{ m}$ , фронт пламени в смеси с коэффициентом избытка воздуха, большим единицы, представляет собой круг, расширяющийся с постоянной радиальной скоростью, определяемой составом смеси. Увеличение концентрации пропана, как обычно, приводит к развитию теплодиффузионной неустойчивости. В диапазоне значений  $l = 4 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  наблюдали распад цилиндрического фронта пламени на два очага, которые двигались по спиралям. Типичные фрагменты из кинофильма, иллюстрирующие вращательное движение очагов пламени в плоской щели, представлены на рис. 1. Результаты визуализации дают основание по аналогии со спиновой детонацией называть фронт пламени „спиновым“. Форма траектории постоянна для данных условий опыта. Изменяя состав смеси и величину зазора между стенками камеры сгорания, можно формировать серповидные расходящиеся от очага пламени „усы“. Серповидность „усов“ — продолжений разделенных фронтов пламени, также связана с вращением каждого элемента поверхности в плоскости, параллельной стенкам камеры сгорания. Кроме того, спиновые фронты пламени испытывают неустойчивость, проявляющуюся в винтовом скручивании, но уже в плоскости, перпендикулярной плоскости щели. Это хорошо видно на последних трех фотографиях, представленных на рис. 1.

Скручивание спиновых фронтов пламени, вероятно, вызвано повышением давления в центральной части камеры сгорания и развивающимся вследствие этого вихревым движением газа по направлению

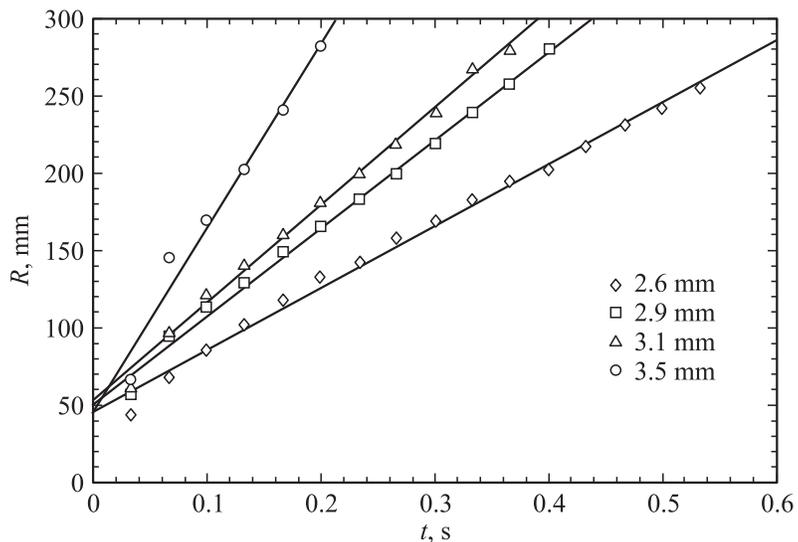


**Рис. 1.** Распространение спинового фронта пламени в плоской щели по пропановоздушной смеси с недостатком воздуха.

вверх в области между расходящимися спиновыми фронтами пламени. Это доказывается равенством по порядку величины линейной скорости газа в вихре и скорости вытеснения газа из щели, примерно равной скорости распространения очага пламени. Действительно, примем радиус спирального вихря равным половине расстояния между стенками камеры сгорания:  $r \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$  м. За время между двумя последовательными кадрами фильма, равное  $\tau = 0.03$  с, число витков спирали становится больше на величину  $n \approx 5-7$ . Следовательно, линейная скорость газа в вихре равна

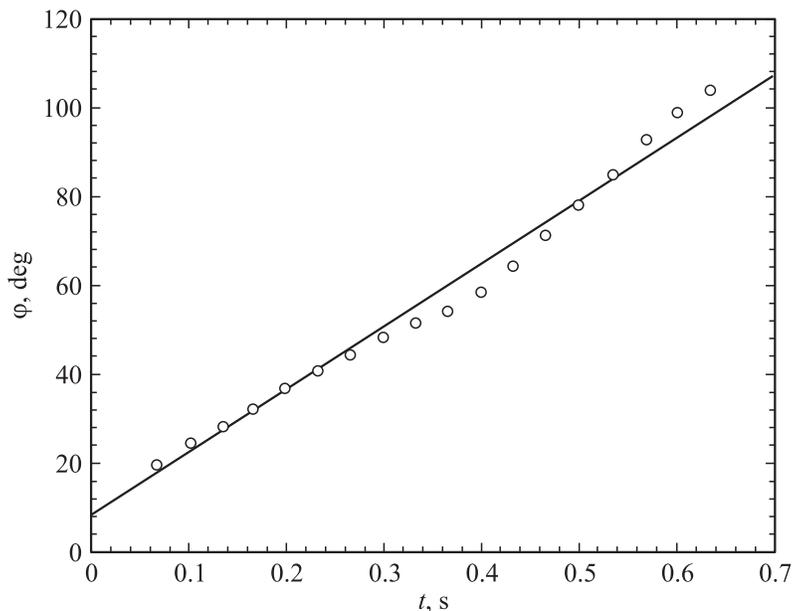
$$v = \frac{2\pi r n}{\tau} \approx 2-3 \text{ м/с.}$$

Вычисляя скорость распространения пламени как расстояние, пройденное очагом пламени за время одного кадра, для скорости вытеснения газа также получим  $\approx 2-3$  м/с.



**Рис. 2.** Зависимость расстояния между точкой зажигания и „ведущей“ точкой фронта от времени при различных расстояниях между стенками камеры сгорания.

Для описания кинематики движения спиновоего фронта пламени использовали принятое в работе [9] определение „ведущей“ точки фронта пламени как наиболее выдвинутой в область свежей горючей смеси. Радиальную и тангенциальную скорости ведущей точки фронта определяли по зависимостям модуля и угла поворота радиуса-вектора, определяющего положение „ведущей“ точки, от времени в полярной системе координат. Начало системы координат выбирали в точке зажигания пламени. Графики зависимостей представлены на рис. 2, 3 для случая распространения пламени по смеси, с объемным содержанием 5% пропана в воздухе при различных расстояниях между стенками камеры сгорания. Из графиков следует, что движение „ведущей“ точки, в наблюдаемом интервале углов ее поворота, происходит с постоянной радиальной и угловой скоростью, зависящей от состава горючей смеси и величины зазора между стенками камеры сгорания. Постоянство угловой и радиальной скоростей однозначно задает спираль Архимеда. Ранее



**Рис. 3.** Зависимость угла поворота радиуса-вектора, определяющего положение „ведущей“ точки, от времени (расстояние между стенками камеры сгорания — 3.8 mm).

в работе [2] показано, что траектория спинового фронта детонации при распространении в смеси с недостатком окислителя описывается уравнением логарифмической спирали. Очевидно, что „выбор“ ведущей точкой спиральной траектории связан с определяющей ролью процессов переноса в формировании спинового фронта пламени.

## Список литературы

- [1] Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 255 с.
- [2] Солоухин Р.И. // УФН. 1963. Т. LXXX. В. 4. С. 525–551.
- [3] Мержанов А.Г., Филоненко А.К., Боровинская И.П. // ДАН СССР. 1973. В. 208. № 4. С. 892–894.

- [4] Коржавин А.А., Бунев В.А., Намятов И.Г., Бабкин В.С. // Физ. химия. 2000. Т. 375. № 3. С. 355–357.
- [5] Замащиков В.В. // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 2. С. 9–10.
- [6] Минаев С.С., Серещенко Е.В., Фурсенко Р.В. и др. // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 2. С. 12–19.
- [7] Фан А., Минаев С.С., Серещенко Е.В. и др. // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 3. С. 12–18.
- [8] Fengshan L., Omer L.G. // Combustion Science and Technology. 2008. V. 180. P. 437–452.
- [9] Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.