

НЕПРЕРЫВНОЕ ДЕТОНАЦИОННОЕ СЖИГАНИЕ КОЛЬЦЕВОГО СЛОЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

УДК 534.222.2:621.45

Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск

Исследованы непрерывные детонационные режимы сжигания ацетилено-кислородных смесей в свободном пространстве в системе сталкивающихся волн.

Непрерывное сжигание кольцевого слоя горючего газа в турбулентном пламени легко реализуется в условиях, создаваемых, например, газовой горелкой бытовой печи. Детонационное горение смесей, способное производить сжигание больших расходов горючих на расстояниях, близких от отверстий, через которые поступает газ, в настоящее время реализовано лишь в пространстве, ограниченном стенками [1, 2], или вблизи препятствий, тормозящих сверхзвуковой поток горючей смеси [3]. Одноразовая детонация свободного газового столба ацетилено-кислородной смеси была осуществлена в работах [4, 5]. В настоящей работе реализована непрерывная детонация кольцевого ацетилено-кислородного слоя в пространстве без боковых стенок и определены условия ее существования.

Кольцевой слой газовой смеси создавался с помощью ряда отверстий, расположенных по окружности цилиндрического тела диаметром $d = 20$ мм (рис. 1). 30 отверстий прямоугольного сечения $0,3 \times 0,25$ мм и 30 отверстий сечением $0,3 \times 0,5$ мм располагали так, что в плоскости оси цилиндрического тела они были направлены навстречу друг другу под углом 60° , как это показано на рис. 1, а также навстречу друг другу под углом 45° к плоскости, перпендикулярной оси цилиндрического тела. Таким образом создавалась система скрещивающихся струй, которая обеспечивала достаточное для существования детонации перемешивание раздельно подаваемых топливных компонентов. Расход ацетилена составлял 10–25 г/с, кислорода — 37–105 г/с. Коэффициент избытка горючего Φ менялся при этом в пределах 0,68–1,16. Истечение газов через отверстия было сверхкритическим: давление подачи менялось в интервале $(5-15) \cdot 10^5$ Па, а давление внешней среды p_a — в интервале $(0,02-1,0) \cdot 10^5$ Па. Истечение компонентов происходило в камеру объемом $0,5$ м³, в которой путем откачки воздуха создавалось любое начальное давление в указанных выше пределах.

Инициирование процесса производилось пережиганием проволоочки электротоком сразу же после истечения смеси. Процесс длился около 0,2 с и за счет самосвечения полностью регистрировался на широкую пленку с помощью фоторегистратора с падающим барабаном [6]. Для регистрации процесса в стенку емкости клеивали два радиальных окна из плексигласа длиной 30 и шириной 8 мм, удаленных на расстояние $L = 50$ мм от отверстий, через которые подавались смесевые компоненты. В ряде экспериментов для устранения экранирования продуктами зоны детонации стекла утолщали и приближали к плоскости отверстий на расстояние 10 мм, что практически не сказывалось на протекании процесса. Пленка двигалась перпендикулярно изображению окон. Поэтому светящиеся объекты (детонационные волны), движущиеся по окружности, фиксировались либо четко, когда

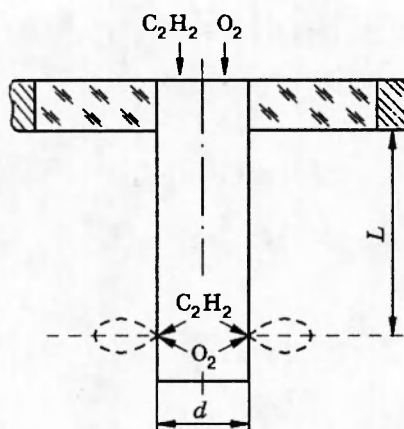


Рис. 1. Схема создания кольцевого слоя смеси

направления движений изображения объекта и пленки совпадали, либо размыто при несовпадении этих направлений. Ряд экспериментов проводили с закрытыми окнами, но с вырезанной перпендикулярно им узкой щелью длиной 8 мм, удаленной от цилиндрического тела на расстояние 7 мм. В этом случае светящиеся объекты, движущиеся по окружности, регистрировались на развертку.

Разовая детонация газовых кольцевых зарядов ранее не исследовалась из-за технической сложности формирования таких зарядов. Детонация оказалась осуществимой в непрерывном режиме, при котором в процессе детонации кольцевого слоя смесь успевает возобновляться. Диапазон давлений, в котором реализовался детонационный режим сжигания, оказался довольно узким: $p_a = (0,3-0,6) \cdot 10^5$ Па. Вне его сжигание смеси происходило в турбулентном пламени. В указанных выше пределах заметного влияния коэффициента Φ на процесс детонации не наблюдалось. Детонация имела многофронтный характер: по окружности кольцевого слоя смеси распространялись, как правило, четыре пары сталкивающихся волн, поперечных направлению потока. При больших расходах наблюдались режимы с пятью парами волн. Фоторегистрограмма этих волн, снятая через одно окно методом компенсации скорости, приведена на рис. 2, а, а развертка через щель, перпендикулярную окнам, — на рис. 2, б, где видны следы взаимных столкновений. На фоторегистрограмме видны только те волны, которые движутся в одном направлении. Встречные волны сильно размыты и почти не прослеживаются. Фоторегистрограмма, снятая через второе окно, отличается от приведенной тем, что на ней четко зафиксированы волны встречного направления. Интерпретация волнового процесса в плоскости кольцевого слоя изображена на рис. 2, в. Во время движения волн навстречу друг другу за ними происходит натекание свежей смеси, по которой они распространяются после отражения. Скорости волн, вычисленные по частоте их появления против щели, составляли ~ 1500 м/с по окружности $d = 20$ мм. В промежутке между столкновениями они изменялись в пределах 600–1740 м/с. В пересчете на средний диаметр кольца газовой смеси верхняя граница скорости близка к скорости идеальной детонации Чепмена — Жуге, а средняя скорость волн ~ 1900 м/с. Частота столкновений волн очень стабильна и для четырех сталкивающихся пар равна ~ 90 кГц.

Наблюдаемое число точек столкновений волн по кольцу устанавливается, по-видимому, не случайно и автоматически регулируется толщиной натекающего сверхкритического слоя смеси, по которому может распространяться детонация. Это предположение подтвер-



Рис. 2. Детонационные волны, снятые через радиальное окно методом компенсации скорости (а), развертка движущихся волн, снятая через щель, перпендикулярную окнам (б) и интерпретация процесса сжигания смеси в плоскости кольцевого слоя (в) (здесь 1 — ударные волны, 2 — детонационные фронты, 3 — контактные разрывы, 4 — направление движения волн)

ждается понижением числа пар сталкивающихся волн с пяти до четырех при уменьшении расхода смеси, влекущем за собой уменьшение давления в смеси и увеличение критического диаметра детонации.

Характерная глубина молекулярной диффузии $x = (D \cdot \Delta t)^{0,5}$ за время между столкновениями волн $\Delta t = 10^{-5}$ с (D — коэффициент диффузии) составляет $\sim 14 \cdot 10^{-6}$ м, что в 20–40 раз меньше начального размера струй. Поскольку критический размер детонации газового слоя все же достигается, можно заключить, что при столкновении струй компонентов происходит их разрушение на фрагменты порядка десятка микрометров и образование достаточного поверхностного контакта для того, чтобы взаимопроникновение компонентов внутри фрагментов происходило на молекулярном уровне. При общем стехиометрическом соотношении компонентов величина Φ в зоне смешения меняется от бесконечности на границе с горючим до нуля на границе с кислородом. Достижение скоростей детонации, близких к скоростям идеальной детонации Чепмена — Жуге, говорит о том, что в кольцевом газовом слое в конце процесса смешения образуется состав, близкий к стехиометрическому.

Средний размер сечения газового слоя, определенный по ширине детонационного фронта (см. рис. 2, а), равен 5–6 мм и для данного диапазона давлений составляет $(14 \pm 4)a$, где a — характерное расстояние между столкновениями поперечных волн при многофронтной детонации газовых смесей (размер ячейки) [7]. Полученная величина в среднем в 5 раз ниже, чем при детонации свободного газового столба стехиометрической ацетиленокислородной смеси при атмосферном давлении [5], а в пересчете на диапазон давлений $(0,3-0,6) \cdot 10^5$ Па — ниже в 10–15 раз. И это несмотря на то, что условия детонации газового кольца существенно неидеальны вследствие кривизны газового слоя и разгрузки волн по периферии, а также процессов перемешивания компонентов смеси, горения и подмешивания продуктов по поверхности. Очевидно, что развитию детонации способствует сверхзвуковой поток смеси, особенностью которого является наличие скачков уплотнения. По-видимому, их взаимодействие с поперечными волнами и поддерживает детонационный режим. В связи с этим непрерывная детонация газового слоя существенно отличается от детонации свободного газового столба и будет отличаться от детонации свободного кольца смеси, если последняя будет реализована. Из имеющихся фоторегистрограмм не удастся выяснить причину срыва детонации и возникновения турбулентного горения вне пределов по p_a . По данным работы [2] известно, что смена режимов происходит при формирова-

нии слоя смеси, толщина которого ниже критической. В результате турбулентное горение смеси, которое всегда сопутствует детонационному, начинает преобладать над последним.

Казалось бы, что помещение одной радиальной стенки вблизи плоскости отверстий для подачи компонентов смеси, в силу симметрии ее относительно газового кольца, не должно влиять на протекание процесса. Опыты показали, что явления в смесевом кольце трехмерны и при внесении стенки процесс существенно изменяется. Вместо встречных детонационных волн реализуются 1–3 регулярные волны, которые вращаются в одном направлении со скоростью 1100–1230 м/с относительно окружности диаметром 20 мм и имеющие структуру, аналогичную структуре волн в кольцевых цилиндрических камерах [2]. Пределы по p_a расширяются от $0,05 \cdot 10^5$ Па до $0,85 \cdot 10^5$ Па. Вне этих пределов существует турбулентное горение. Влияние одной стенки на детонацию столба смеси отмечалось и в работе [5], однако это не приводило к смене многофронтного характера режима, а лишь повышало скорость детонации на 3% и снижало критический диаметр детонации в 2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР. 1959. Т. 129, № 6. С. 1254–1256.
2. Быковский Ф. А., Митрофанов В. В. Детонационное сжигание газовой смеси в цилиндрической камере // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 107–117.
3. Солоухин Р. И. Пульсирующее горение газа за ударной волной в сверхзвуковом потоке // ПМТФ. 1961. № 5. С. 57–60.
4. Васильев А. А. О критическом диаметре детонации газовых смесей // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 3. С. 98–104.
5. Васильев А. А., Зак Д. В. Детонация газовых струй // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 82–88.
6. Быковский Ф. А. Высокоскоростной ждущий фоторегистратор // Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии. 1981. № 2. С. 85–89.
7. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.

*Поступила в редакцию 24/І 1996 г.,
в окончательном варианте — 13/ІІІ 1996 г.*
