

УДК 536.46

ТРАНСФОРМАЦИИ ПЛАМЕН ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ РАСХОДА ГОРЮЧЕГО В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Валаев А.А.

Энергетический институт им. Г.М.Кржижановского, г. Москва

Klavioke@yandex.ru

Аннотация

Кольцевое пламя в кольцевой камере сгорания при уменьшении расхода горючего трансформировалось в многочисленные вращающиеся пламена. Дальнейшее уменьшение расхода приводило к одновременному угасанию части образовавшихся пламен. При увеличении расхода наблюдались случаи удвоения количества вращающихся пламен.

TRANSFORMATIONS OF FLAMES DURING CHANGES OF FUEL CONSUMPTION IN AN ANNULAR COMBUSTION CHAMBER

Annular flame inside the annular combustion chamber was transformed in many rotating flames during reduction of fuel consumption. A further decrease in consumption leads to a simultaneous extinction of a part of the formed flames. Increase in consumption sometimes led to a doubling of the number of rotating flames.

В работе [1] была заявлена схема сжигания газа за фронтами горения, вращающимися в кольцевой камере сгорания с околодетонационными скоростями. В работе [2] наблюдались пламена, вращающиеся со скоростью ~ 1 м/сек. по периметру кольцевой щелевой горелки при истечении из нее пропано-воздушной смеси в атмосферу.

В работе [3] названы условия, при которых в кольцевой камере сгорания возможно существование вращающихся фронтов горения. Это подача горючего либо с большими скоростями, лежащими в промежутке между детонационными и дефлаграционными, либо с предельно малыми, при которых самоподдерживающееся стационарное горение становится невозможным. При несоблюдении этих условий, т.е. при подаче горючего с дефлаграционными скоростями за исключением предельно малых, фронт горения, обтекающий кольцевую камеру, после первого же оборота должен привести к формированию дефлаграционного кольцевого фронта горения, заполняющего канал камеры продуктами сгорания, в то время как горючая смесь в канале для обеспечения непрерывного вращения должна обновляться.

Инициирование вращающихся в одном направлении фронтов горения может быть осуществлено с использованием различных средств организации течения на отдельных участках кольцевой камеры. Целью данной работы являлась проверка предположения о возможности самопроизвольной трансформации дефлаграционного кольцевого фронта горения во вращающиеся фронты при уменьшении скоростей подачи горючего до предельных для самоподдерживающегося горения. Такое предположение было связано с существованием вращающегося пламени в виде детонационного спина, возникающего при приближении условий существования “нормальной” детонации к предельным.

Проверка предположения проводилась на радиальных кольцевых камерах сгорания, схематически показанных на рис.1.

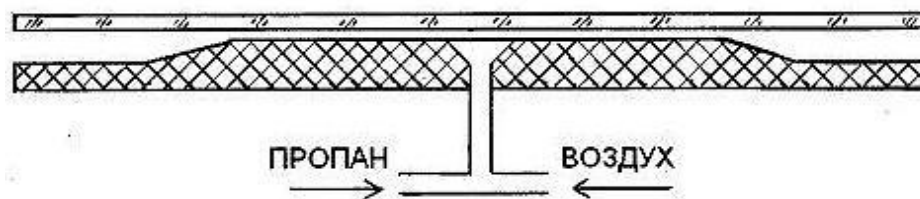


Рис.1. Схема радиальных кольцевых камер сгорания

Верхняя часть экспериментальной установки представляла собой прямоугольную стеклянную пластину, через которую производилось наблюдение и фотографирование пламен. Нижняя часть выполнялась круглой. Размеры пластин незначительно превышали диаметр нижней части.

Между верхней и нижней частями в центральной части камер сгорания помещались 3 одинаковых миниатюрных прокладки обтекаемой формы. Высота образовавшейся щели определялась толщиной прокладок и выбиралась меньшей 0.5 мм для предотвращения проскока пламени в щель.

Пропан и воздух отдельно подавались в центральную трубку, откуда их смесь поступала в центральное отверстие установки и через щель растекалась в радиальных направлениях в кольцевую камеру сгорания. Изменения скоростей подачи горючего осуществлялись путем изменения расходов компонент горючей смеси, для чего использовались регулировочные вентили. Расходы компонент измерялись поплавковыми ротаметрами. Инициирование горения производилось электрическим разрядником, установленным на периферии камеры сгорания. Продукты сгорания истекали в атмосферу.

Основная часть экспериментов выполнялась с использованием камеры с внутренним диаметром камеры сгорания 20 см. Расстояние между параллельными участками стенок камеры составляло 5 мм, наружный диаметр нижней части камеры - 30 см.

Эта камера сгорания представляла собой модификацию радиальной кольцевой камеры Войцеховского [1]. Основным отличием от нее являлся плавный переход щели в камеру сгорания вместо ступенчатого. Плавный переход был выбран для предупреждения образования вихревой зоны в местах подачи горючей смеси, что могло затруднить замещение продуктов сгорания свежим горючим. Другим отличием являлось отсутствие конфузора на выходе камеры.

В начале экспериментов подбирались расходы горючего, при которых инициирование горения в камере приводило к формированию равномерного кольцевого фронта горения. Эти расходы в данной камере сгорания были равны 0.3-0.4 л/сек.

Затем расходы горючей смеси уменьшались одновременно или поочередно по каждой компоненте. Расходы уменьшались либо ступенчато на величины, равные ~3-10% от текущего значения расходов с остановками на 1-3 сек., либо непрерывно с такими же изменениями за указанное время. Составы смесей в процессе уменьшения расхода в одних экспериментах приближались к концентрационным пределам, в других поддерживались близкими стехиометрическому.

И ступенчатое и непрерывное уменьшение расхода при подаче и богатых и бедных смесей приводило сначала к равномерному уменьшению внешнего диаметра кольцевого пламени, а затем к разрыву на одном из его участков.

Разрыв кольцевого фронта по мере уменьшения расхода увеличивался, превращая кольцо горения в дугу. На краях дуги периодически с частотой 14-26 гц., зависящей от концентрации топлива, возникали пламена, бегущие по кольцевому каналу камеры сгорания. Они образовывали два ряда пламен, передние из которых уничтожали друг друга при встрече. Дуга, по мере уменьшения расходов, уменьшалась на разных краях

неодинаково, в результате чего количество пламен, бегущих в одном из направлений, оказывалось большим, чем в противоположном. После исчезновения остатков кольцевого пламени и прекращения возникновения новых пламен в камерах сгорания оставались более многочисленные пламена, бегущие/вращающиеся в одном направлении.

Наблюдение за процессом возникновения и вращением пламен осуществлялось с помощью механического стробоскопа.

Изменения расходов горючего, приводящие к превращению кольцевого пламени во вращающиеся пламена, были много меньше значений расходов при появлении разрыва кольцевого пламени.

Количество сформировавшихся вращающихся пламен зависело от темпа уменьшения расхода. При меньшем темпе количество было больше, при большем – меньше. Скорости вращения пламен составляли 0.35 - 1.5 м/сек. Примеры образовавшихся вращающихся пламен показаны на фотографиях рис.2.



Рис.2. Фотографии пламен, вращающихся в радиальной кольцевой камере сгорания. Направление вращения – против часовой стрелки. Фотографии получены при горении богатой пропано-воздушной смеси с расходом ~ 0.1 л/сек.

После формирования вращающихся пламен дальнейшее уменьшение расходов горючего приводило к одновременному затуханию части пламен. Например, при четном количестве пламен наблюдалось постепенное уменьшение размеров каждого второго пламени вплоть до исчезновения, в результате чего количество пламен в камере сгорания уменьшалось вдвое (Рис.3).

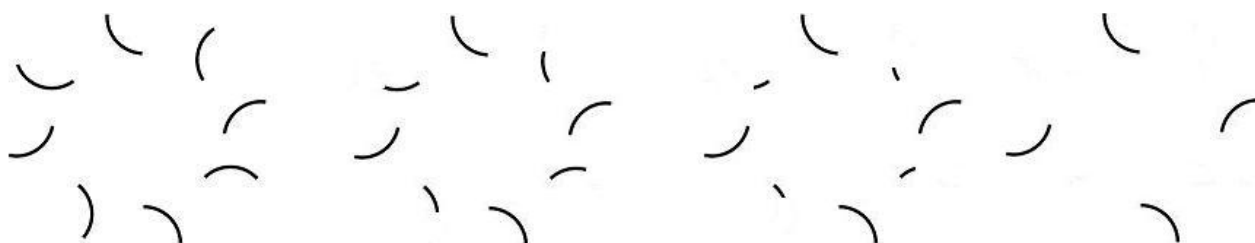


Рис.3. Схема затухания части пламен в процессе уменьшения расхода горючего при четном начальном количестве пламен.

В экспериментах с постепенным увеличением расходов горючего, проводившихся при 1-2-м начальном количестве вращающихся пламен, наблюдались случаи удвоения их количества. Удвоение происходило при трансформации формы пламен по схеме, представленной на рис. 4.



Рис.4. Схема раздвоения вращающегося пламени при увеличении расхода горючего

На крайней левой фигуре на рис.4 показан начальный вид фронта пламени, движение фронта направлено влево, нижняя часть фронта примыкает к месту подачи горючего. При увеличении расхода горючего происходит увеличение части фронта, примыкающей к месту подачи горючего, показанное на 2-й слева фигуре. Дальнейшее увеличение расхода приводит к образованию выпуклости фронта в этой части (3-я слева фигура) и затем к разрыву в этом месте (две крайние справа фигуры). Последующее увеличение скорости подачи горючего приводит к не показанному на рисунке удалению нового фронта от первичного и увеличению его размера.

Прекращение изменения расходов на любом этапе описанных выше трансформаций пламен приводило к остановке трансформации на достигнутом этапе.

Трансформация кольцевого пламени во вращающиеся пламена наблюдалась также на кольцевых камерах сгорания с внутренними диаметрами от 40 мм до 300 мм. и при сжигании смесей природного газа и воздуха.

Трансформация во вращающееся “одноголовое” пламя наблюдалась также при уменьшении расхода горючего в камере плоского пламени. Такая камера была выполнена в виде вертикально установленной трубы с внутренним диаметром 6 см. В нижний закрытый конец поступала смесь пропана с воздухом. В средней части смесь проходила через сетку и насыпанный на сетку слой металлических шариков и горела в верхней части трубы над слоем шариков.

Литература

1. Войцеховский Б.В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР, 1959, Т.129, №3, с.1254-1256.
2. Замашиков В.В. Газовые вращающиеся пламена // Физика горения и взрыва, 2003, Т.39, №2, с.9-10, <http://www.kinetics.nsc.ru/comp/comp2005/kor9.pdf>.
3. Валаев А.А., Миронов Э.А., Попов В.А. Способ сжигания топлива // Авторское свидетельство №595594, заявлено 24.11.1972, опубликовано 28.02.1978, бюллетень №8.

Статья поступила в редакцию 18 января 2013 г.