

УДК 536.46

## ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ГАЗОВЫХ ПЛАМЕН

А. А. Валаев

Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского, 117091 Москва, Klavioke@yandex.ru

В кольцевой камере сгорания исследовались трансформация кольцевого пламени во вращающиеся пламена и их затухание при изменении расхода и концентрации топлива.

Ключевые слова: вращающееся пламя, кольцевая камера сгорания, концентрация топлива.

DOI 10.15372/FGV20150306

В экспериментах в кольцевой горелке [1] при инициировании открытым пламенем возникали вращающиеся пламена при расходе газового горючего меньше необходимого для существования кольцевого пламени. В [2] в кольцевых камерах сгорания наблюдалась трансформация кольцевого пламени во вращающиеся при уменьшении расхода горючего или его компонентов.

В данной работе исследовались границы существования вращающихся пламен при изменении расхода и концентрации топлива.

Для этого использовалась радиально-кольцевая камера сгорания (рис. 1). Ее внутренний диаметр 200 мм, внешний — 350 мм, расстояние между параллельными стенками кольцевого канала составляло 5 мм. Верхняя часть канала была выполнена из силикатного стекла, через которое велось наблюдение за горением, нижняя — из асбоцемента. Сжигалась смесь природного газа с воздухом. Расходы воздуха  $Q_{air}$  и природного газа  $Q_{gas}$  контролировались поплавковыми ротаметрами РС-3 и РС-3а, погрешности измерения составляли  $\pm 1.5 \cdot 10^{-6}$  и  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с соответственно.

Горение инициировалось при экспериментально подобранных расходах природного газа и воздуха, приводящих к возникновению кольцевого пламени. Затем расходы изменялись, и это приводило к разрыву кольцевого фронта, возникновению вращающихся пламен, последующему уменьшению их количества и затуханию. Скорость пламен составляла  $0.5 \div 1.5$  м/с [2].

На рис. 2 точками показаны расходы горючей смеси  $Q = Q_{gas} + Q_{air}$  и концентрации природного газа  $C = Q_{gas}/(Q_{gas} + Q_{air})$ , наблюдавшиеся при разрывах кольцевого пламе-

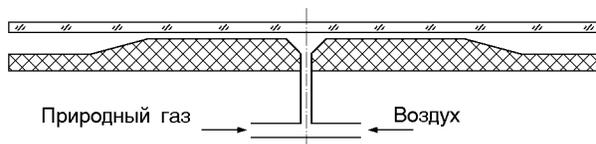


Рис. 1. Схема радиально-кольцевой камеры сгорания

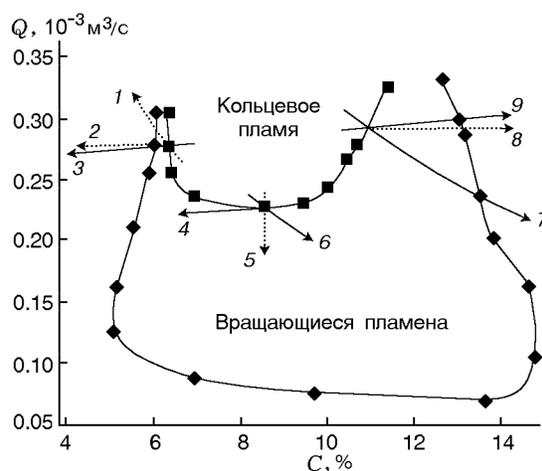


Рис. 2. Область существования кольцевого пламени. Переход стационарного горения в область вращающихся пламен

ни и затухании вращающихся пламен. К границе области существования кольцевого пламени примыкает узкая переходная область. Граница существования вращающихся пламен соответствует затуханию одиночного фронта.

Фронт кольцевого пламени при увеличении расходов сверх значений, показанных на рис. 2, начинал перемещаться к периферии камеры сгорания и выходил за ее пределы.

Использовались две схемы проведения экспериментов: изменение расхода газа  $Q_{gas}$  при фиксированном расходе воздуха  $Q_{air}$  и измене-

ние расхода воздуха  $Q_{air}$  при фиксированном расходе газа  $Q_{gas}$ .

Линии 3, 4, 6, 7, пересекающие границу области существования двух форм стационарного горения на рис. 2, иллюстрируют изменение концентрации  $C$  и расхода  $Q$  при уменьшении расхода одного из компонентов горючего. Линия 9 соответствует возникновению вращающихся пламен при пересечении «богатого» участка границы путем увеличения расхода газа  $Q_{gas}$ . Линия 1 показывает переход в область бедных вращающихся пламен при увеличении расхода воздуха  $Q_{air}$ . Линия 5 указывает на возможный переход в область вращающихся пламен при уменьшении расхода горючего  $Q$  и неизменной концентрации  $C$ . Такая схема может быть реализована при пропорциональном уменьшении расходов компонентов горючего. Линии 2 и 8 показывают переход в область бедных и богатых вращающихся пламен при постоянном расходе горючего  $Q$  за счет изменения концентрации  $C$  путем увеличения расхода одного из компонентов горючего и соответствующего уменьшения расхода другого компонента.

Как видно из рис. 2, вращающиеся пламена расширяют область концентрации топлива и расхода смеси в режиме стационарного самоподдерживающегося горения. Концентрации достигают экстремумов при малом расходе смеси.

В соответствии с [3] существование минимальной скорости пламени связано с тепловыми потерями из зоны горения. Эти потери находятся в обратной зависимости от скорости распространения пламени по неподвижному газу.

В камере сгорания массовая скорость кольцевого пламени определяется расходом горючего. Массовая скорость вращающегося пламени помимо радиальной составляющей, определяемой расходом горючего, имеет также тангенциальную составляющую. При одинаковых расходах и отличающихся концентрациях (прямые 2, 8 на рис. 2) массовая скорость вращающегося пламени превышает массовую скорость кольцевого пламени за счет тангенциальной составляющей. Поэтому сжигание горючего во вращающихся пламенах обеспечивает меньшие потери тепла и возможность самоподдерживающегося горения при меньшей теплотворной способности, чем при сжигании горючего в концентрации, запредельной для одномерного горения.

Таким же образом можно объяснить существование вращающихся пламен при расходах, меньших минимальных значений, характерных для кольцевого пламени при заданной концентрации топлива (линия 5 на рис. 2). Массовая скорость вращающихся пламен, несмотря на уменьшенную составляющую, обусловленную расходом, превышает минимально необходимую для самоподдерживающегося горения за счет тангенциальной составляющей.

На положение границ концентраций и расходов вращающихся пламен, очевидно, влияет также рекуперативный нагрев горючего стенками камеры сгорания и тепло- и массообмен с горячими продуктами сгорания. Воздействие на горючее, сжигаемое во вращающихся пламенах, происходит при вытеснении горючих продуктов сгорания из кольцевого канала после очередного прохождения вращающегося пламени.

Таким образом, в работе установлено, что вращающиеся пламена расширяют концентрационные границы стационарного горения в кольцевой камере горения. Показана возможность трансформации кольцевого пламени во вращающиеся пламена путем изменения концентрации топлива в горючем. Расширение концентрационных границ объяснено большей массовой скоростью горения во вращающихся пламенах, а также рекуперативным нагревом горючего стенками кольцевого канала и тепло- и массообменом при контакте горючего с продуктами сгорания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Замашиков В. В.** Газовые вращающиеся пламена // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 2. — С. 9–10.
2. **Валаев А. А.** Трансформации пламен при изменении расхода в кольцевой камере сгорания // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2013. — Т. 14, вып. 1. — Электронный журн.: <http://chemphys.edu.ru/media/files/2013-02-21-001.pdf>.
3. **Зельдович Я. Б.** Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. Теория предела распространения тихого пламени. — М: Наука, 1984. — С. 233–246.

*Поступила в редакцию 2/IV 2014 г.*