

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАМЕНИ В УЗКОЙ ЩЕЛИ В РАСХОДЯЩЕМСЯ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

В. В. Замащиков

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, albor@kinetics.nsc.ru

Исследовались условия стабилизации пламени в узком зазоре между двумя круглыми пластинами при подводе газа через центр одной из них. В качестве горючего газа использовались бедные водородовоздушные смеси. Показано, что пламя при определенных условиях может устанавливаться либо на срезе трубки, в месте ввода горючей смеси в щель, либо на некотором расстоянии от места ввода. Такие пламена устойчиво существуют даже при размере зазора меньше 0.1 мм. При этом стенки горелки значительно прогреваются в обоих случаях. Установлены основные тенденции поведения пламени для второго случая при изменении расхода горючего газа, состава смеси и размера зазора.

Ключевые слова: фильтрационное горение газов, пределы распространения пламени, микрогорелки, горение в узких щелях.

В работе [1] получена стабилизация волны горения в пористых средах (пористая горелка), в работе [2] — в огнеупорных трубах. Этот режим горения назван горением с избытком энтропии. Пористые горелки цилиндрической и сферической геометрии исследовались в [3, 4]. Такие горелки интересны тем, что всегда можно добиться условий для стабилизации пламени вследствие уменьшения скорости фильтрации с увеличением радиуса. Одним из вариантов подобных устройств может быть горелка, состоящая из двух круглых параллельных пластинок с подачей горючего газа в центр одной из них. Такое устройство представляет интерес не только с точки зрения моделирования пористой среды, но и как микроустройство для сжигания горючего газа. Созданию микрогорелок в настоящее время уделяется большое внимание [5] в связи с потребностью в миниатюрных емких источниках питания. Характерной особенностью горения в узких щелях или каналах является достаточно большое отношение контактной поверхности газа с твердой фазой к его объему, из-за чего возрастает влияние твердой поверхности на процесс горения. В работе [6] для метановоздушных смесей экспериментально показано, что при такой геометрии горелок возможна стабилизация пламени. Целью настоящей работы является более детальное изучение условий стабилизации горения. В качестве горючего газа выбраны бедные водородовоздушные смеси. Этот выбор обусловлен тем, что при горении таких смесей проявляет-

ся избирательная диффузия водорода (эффект числа Льюиса), что приводит, например, к образованию ячеек. Кроме того, гасящее (критическое) расстояние для водородовоздушных смесей гораздо меньше, чем для углеводородовоздушных, что позволяет исследовать горение в более узких щелях.

Экспериментальная установка состояла из двух параллельных круглых кварцевых пластинок толщиной 1.5 мм (рис. 1). Диаметр пластинок 50 мм. В центре одной из них приварена кварцевая трубка с внутренним диаметром 2 мм, через которую подавалась горючая смесь. К центру второй пластинки приварен стержень, с помощью которого пластинка крепилась к препаратоводителю (на рисунке не показан). Пластины устанавливались горизонтально, параллельно друг другу. Препаратово-

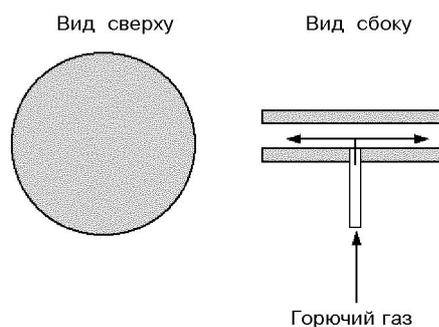


Рис. 1. Схема установки

дитель позволял плавно, с точностью до 0.1 мм менять расстояние между пластинками. Смесь предварительно готовилась в газовом смесителе (состав задавался по парциальным давлениям), а затем подавалась через расходомер в горелку. Пламя регистрировалось видеокамерой Hitachi VM 7380E, процесс горения снимался сверху.

После установления определенного расхода и расстояния между пластинками $h \approx 1.5$ мм производилось инициирование горения на краю дисков открытым пламенем. Пламя устремлялось в пространство между дисками и, в отличие от метановоздушных смесей [6], не гасло, а устанавливалось на срезе трубки, подводящей горючий газ, в центре нижнего диска. Затем расстояние между пластинками уменьшалось. В зависимости от расхода горючего газа и состава смеси зазор между пластинами можно было устанавливать даже меньше 0.1 мм (предельный размер щели для распространения пламени в стехиометрической водородовоздушной смеси, согласно [7], 0.6 мм), при этом факел устойчиво стоял на срезе трубки. С уменьшением зазора кварцевые диски значительно прогревались. Установив определенный зазор, можно было, увеличивая расход смеси, добиться перехода в другой режим — горение с избытком энтальпии или, согласно [8], режим низкой скорости (РНС) фильтрационного горения газа. Переход в этот режим можно было осуществить и другим способом — уменьшая при достаточно большом расходе расстояние между пластинами. Из-за того что в этом режиме диски значительно прогреваются, на пластинах образуются красные светящиеся кольца в месте локализации пламени. РНС возможен только при определенных условиях. Например, для смесей с объемным содержанием водорода меньше 15 % этот режим невозможен (по крайней мере, при $h \leq 0.6$ мм). В этом случае при попытке перехода в РНС светящееся красное кольцо расширяется, бледнеет и на каком-то расстоянии от центра дисков разрывается. Причем совсем не обязательно, что пламя при этом гаснет. Оно может перескочить в центр дисков, к срезу подводящей трубки.

В случае, когда РНС возможен, пламя стабилизируется на каком-то расстоянии от центра дисков (рис. 2). Ширина светящегося кольца при этом зависит от расстояния между пластинами, расхода горючего газа и состава смеси. Чем меньше зазор, тем более четко вы-

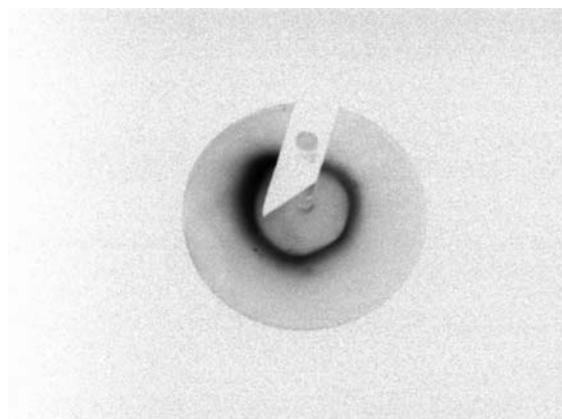


Рис. 2. Светящееся кольцо

глядит внутренняя граница кольца (в области свежей смеси). Ширина кольца, как правило, неодинаковая. В одном месте оно более широкое и более яркое (см. рис. 2). Когда режим РНС невозможен, кольцо разрывается в самом тонком и бледном месте. Скорее всего, неодинаковая толщина кольца обусловлена непараллельностью пластин, хотя нельзя исключить и другие причины. Если после возникновения РНС увеличивать расстояние между дисками, то при определенном зазоре наблюдается быстрый переход пламени в центр пластин к срезу подводящей горючий газ трубки. При этом с увеличением зазора усиливается звук и пламя становится более неустойчивым. Прогрев стенок играет стабилизирующую роль, и чем меньше зазор, тем больше роль стенки и более устойчиво пламя. Если в процессе получения РНС в начальный момент светящееся кольцо сильно деформировано, то в процессе эволюции оно становится более симметричным. Это естественно связать со стабилизирующей ролью стенок.

При исследовании этой системы представляет интерес изучить поведение пламени при изменении состава смеси, расхода горючего газа и расстояния между пластинками. Однако по мере приближения к стехиометрии РНС возможен при все более меньших зазорах и в большем диапазоне расходов. С точки зрения понимания изучаемого явления не столь важно, насколько широкий диапазон параметров будет охвачен. Важнее понять основные тенденции поведения системы при изменении параметров. Поэтому в данной работе не исследовались характеристики РНС во всем диапазоне парамет-

ров, а изучались только основные тенденции в поведении системы при изменении расхода, состава горючей смеси и расстояния между пластинками в ограниченном диапазоне.

Эксперименты проводились со смесями 14, 15, 16, 17 и 18 % водорода с воздухом. В смесях с 14 и 15 % водорода не удалось получить РНС, что говорит о том, что концентрационный предел для этого режима $\approx 15\%$. Необходимо отметить, что при $h < 0.5$ мм можно без особых трудностей определить, возможен ли режим низких скоростей. Однако при больших зазорах возникали трудности. Увеличивая зазор, можно всегда добиться, чтобы пламя не гасло в пространстве между пластинами. Но из-за уменьшения стабилизирующей роли стенки пламя становится более неустойчивым, что приводит к тому, что оно либо с колебаниями стоит в пространстве между дисками, либо, что происходит наиболее часто, проскакивает в центр дисков и устанавливается на срезе подводящей горючий газ трубки. При исследовании более активных смесей, с содержанием водорода больше 18 %, тоже возникли трудности. Они связаны с тем, что в данном варианте горелки невозможно установить пластинки параллельно с точностью больше 0.1 мм. Эксперименты показали, что для смеси с 18 % водорода РНС возможен при $h < 0.1$ мм, т. е. данная установка не позволяет исследовать РНС в тех щелях, в которых этот режим возможен. Кроме того, при приближении к стехиометрии сильно возрастает температура пластинок, что может привести к тому, что они расплавятся.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости внутреннего диаметра светящегося кольца от расхода горючего газа при различной ширине зазора между пластинами. Измерения именно внутреннего диаметра проводились по той причине, что внутренняя граница светящегося кольца наиболее четко различима (см. рис. 2). Ошибка измерения внутреннего диаметра зависела от зазора между пластинами, состава смеси и расхода горючего газа. Внутренняя граница существенно размывалась при увеличении зазора. В худшем случае ошибка могла составлять половину толщины светящегося кольца. Эксперименты проводились следующим образом. Осуществлялся переход в РНС, устанавливались нужный зазор и расход, и фиксировалась зависимость диаметра кольца от времени. Зависимость имела асимптотический вид. Измерения проводились

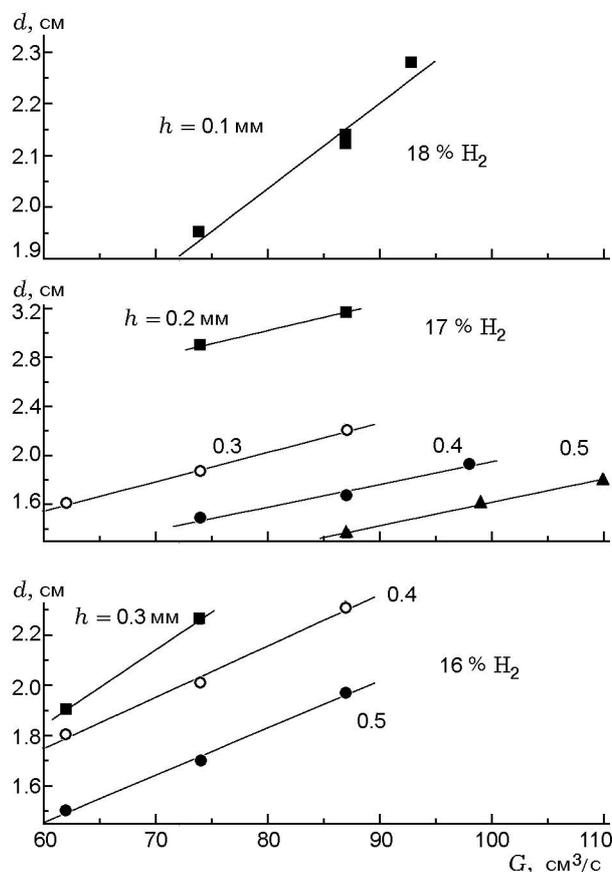


Рис. 3. Зависимости диаметра светящегося кольца от расхода горючего газа при разных расстояниях между пластинами

в тот момент, когда диаметр переставал изменяться со временем. Из рисунка видно, что, как и следовало ожидать, с увеличением расхода радиус, на котором стабилизируется пламя, возрастает. С уменьшением расстояния между пластинами при неизменном расходе горючей смеси, с одной стороны, возрастает линейная скорость газа v ($v = G/2\pi rh$, где G — расход горючего газа, r — радиус, на котором измеряется скорость, h — зазор между пластинами; справедливо, когда отсутствует пламя), с другой стороны, увеличивается температура кварцевых пластинок. Рост температуры приводит к увеличению нормальной скорости пламени и, как следствие, к перемещению пламени ближе к центру (уменьшению диаметра кольца). Возрастание скорости газа между пластинами, наоборот, приводит к перемещению пламени к краю диска. Из рис. 3 видно, что при уменьшении зазора пламя перемещается к краю диска,

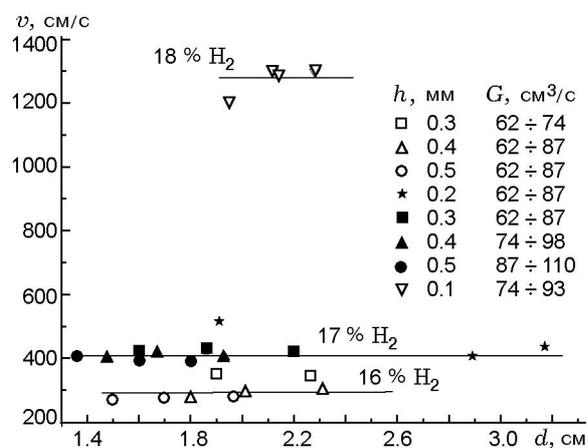


Рис. 4. Зависимости расчетной скорости газа на внутреннем диаметре светящегося кольца от диаметра этого кольца:

температура газа считается равной комнатной

т. е. увеличение нормальной скорости не компенсирует рост линейной скорости газа. Изменение состава смеси в сторону увеличения нормальной скорости, согласно рисункам, приводит к уменьшению диаметра кольца при прочих равных условиях. Аналогичные зависимости получены в пористых средах на образцах цилиндрической геометрии [4] и для фильтрационного нагревателя дискового типа [9]. Диапазон расходов (см. рис. 3), в котором проводились измерения, определялся следующими факторами. При слишком малом расходе пламя приближалось к кварцевому стержню, служащему для фиксации пластинки, и, во-первых, он мог оказывать сильное влияние на горение, во-вторых, возникали трудности с измерением внутреннего диаметра (размывалась граница). Верхний предел по расходу приблизительно определялся моментом достижения светящейся зоной края дисков.

Можно предположить, что фронт пламени симметричен относительно плоскости, делящей пополам зазор между пластинами. Тогда нормальная скорость в центре зазора должна быть равна скорости входящего во фронт пламени свежего газа. В противном случае светящееся кольцо должно перемещаться относительно стенок пластин. Знание диаметра светящегося кольца r и соответствующего ему расхода горючего газа G позволяет оценить среднюю скорость газа v , втекающего во фронт пламени, приведенную к комнатной температуре. По средней скорости можно судить о

нормальной скорости пламени S_u ($v = S_u$). Понятно, что это только оценки, потому что, во-первых, из-за прогрева смеси, входящей во фронт пламени, ее скорость будет выше и, во-вторых, из-за вязкости скорость будет функцией расстояния от поверхности пластин. На рис. 4 приведены зависимости средней скорости v от диаметра кольца d для разных смесей, расходов и ширин щели. Как и следовало ожидать, скорость газа меняется при изменении состава смеси. Сравним полученные скорости с нормальными скоростями для этих пламен при начальной комнатной температуре. Согласно [10] нормальные скорости равны 65, 52 и 45 см/с при содержании водорода в смеси 18, 17 и 16 %. Видно, что нормальные скорости в РНС вследствие нагрева свежего газа существенно возрастают. Особенно сильный рост наблюдается для зазора 0.1 мм. Даже если учесть, что ошибка в определении ширины зазора в этом случае максимальна и может достигать 100 %, отношение скорости v для смеси с 18 % H_2 к ее нормальной скорости при начальной комнатной температуре составляет $\approx 650/65 = 10$.

В работе [11] при исследовании горения бедных водородовоздушных смесей (3 ÷ 9 % H_2) в пористой инертной среде получены отдельные очаги горения. Авторы связывают образование такой структуры с термодиффузионной неустойчивостью (эффект числа Льюиса). В настоящей работе ячеистая структура не наблюдалась. Возможно, это связано с тем, что смесь недостаточно бедная.

Эффекты числа Льюиса в исследуемой системе проявляются, по-видимому, при увеличении зазора между пластинками, когда стабилизирующая роль стенки уменьшается. Необходимо отметить, что числа Рейнольдса при тех расходах, при которых проводились эксперименты, были меньше 550 ($G = 110 \text{ см}^3/\text{с}$, $h = 2 \text{ мм}$, $r = 0.5 \text{ см}$). Так что движение газа между пластинами, скорее всего, ламинарное во всех экспериментах. В этом случае наблюдается неустойчивость, которая проявляется в том, что появляется характерный звук (пламя, скорее всего, пульсирует). Неустойчивость, вероятнее всего, обусловлена тем, что поверхность фронта пламени изменяется во времени. Интенсивность колебания поверхности зависит от чувствительности нормальной скорости к искривлению фронта пламени. Чувствительность скорости к искривлению фронта за-

висит от числа Льюиса [12]. Нельзя исключить, что при увеличении зазора между пластинами при определенных условиях так же, как и для метановоздушных смесей [6], будет наблюдаться спиновое горение. Однако из-за слабого свечения в видимом диапазоне водородовоздушных пламен и из-за малости зазора между пластинами зарегистрировать спиновое горение не удалось.

Итак, эксперименты показали, что водородовоздушные пламена стабилизируются в узких щелях в условиях расходящегося газового потока. При этом стенки горелки значительно прогреваются и играют стабилизирующую роль. С увеличением расхода, уменьшением нормальной скорости пламени и ширины зазора между пластинками радиус, на котором устанавливается пламя, возрастает. При возрастании зазора пламя становится все более неустойчивым и есть вероятность его перескока в центр дисков и установки устойчивого факела на срезе подводящей горючий газ трубки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kotani Y., Takeno T.** An experimental study on stability and combustion characteristics of an excess enthalpy flame // Nineteenth Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1982. P. 1503–1509.
2. **Chen J. L.-P., Churchill S. W.** Stabilization of flames in refractory tubes // Combust. Flame. 1972. V. 18. P. 37–42.
3. **Какуткина Н. А., Бабкин В. С.** Закономерности распространения сферических волн фильтрационного горения газа в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 1. С. 60–66.
4. **Zhdanok S. A., Dobrego K. V., Futko S. I.** Flame localization inside axisymmetric cylindrical and spherical media burners // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1998. V. 41. P. 3647–3655.
5. **Fernandez-Pello A. C.** Micropower generation using combustion: Issues and approaches // 29th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 2002. P. 883–899.
6. **Замашиков В. В.** Спиновое газовое горение в условиях узкой щели // Физика горения и взрыва 2006. Т. 42, № 3. С. 23–26.
7. **Водород:** свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справочник / Под ред. Д. Ю. Гамбурга, Н. Ф. Дубовкина. М.: Химия, 1989. С. 281.
8. **Бабкин В. С., Дробышев В. И., Лаевский Ю. М., Потытняков С. И.** О механизме распространения волн горения в пористой среде при фильтрации газа // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265, № 5. С. 1157–1161.
9. **Футько С. И., Добrego К. В., Жданок С. А., Ханевич Э. И.** Локализация фронта горения в фильтрационном нагревателе дискового типа в условиях интенсивной внешней теплоотдачи // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 3. С. 17–24.
10. **Dowdy D. R., Smith D. B., Taylor S. C.** The use of expanding spherical flames to determine burning velocities and stretch effects in hydrogen/air mixtures // 23rd Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1990. P. 325–332.
11. **Saveliev A. V., Kennedy L. A., Fridman A. A., Puri I. K.** Structure of multiple combustion waves formed under filtration of lean hydrogen-air mixtures in a packed bed // 26rd Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1996. P. 3369–3375.
12. **Peters N.** Turbulent Combustion. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2000.

*Поступила в редакцию 26/VII 2005 г.,
в окончательном варианте — 12/X 2005 г.*