

## СПИНОВОЕ ГАЗОВОЕ ГОРЕНИЕ В УЗКОЙ ЩЕЛИ

В. В. Замашников

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

Экспериментально исследуется горение в зазоре между двумя тонкими круглыми пластинками с центральной точечной подачей газа. Показано существование нескольких режимов. При больших расходах наблюдается неустойчивое пульсирующее горение. С уменьшением расхода при определенных условиях происходит переход в режим спинового горения. При достаточно малом расстоянии между пластинами может реализоваться так называемый режим горения с избытком энтальпии в условиях расходящегося потока газа.

Ключевые слова: фильтрационное горение газов, пределы распространения пламени, спиновое горение.

Большая потребность в миниатюрных источниках питания стимулирует изучение микророгорелочных устройств. Одним из вариантов такого устройства может быть устройство со стабилизацией пламени между двумя плоскими тонкими круглыми пластинками в условиях расходящегося газового потока. При стабилизации пламени в таких условиях возникает вопрос об устойчивости. Любое искривление пламени в одном месте приводит к изменению поля скоростей и, как следствие, к изменению положения фронта пламени в других местах. Прогрев тонких пластин также может оказать влияние на процесс горения. В связи с этим можно ожидать многообразия явлений при горении в таких условиях, например, спиновое горение, подобное наблюдаемому в работах [1–4]. Цель настоящей работы — исследовать горение в узкой щели в условиях расходящегося газового потока.

Экспериментальная установка состояла из двух круглых кварцевых пластинок толщиной 1.5 мм и диаметром 50 мм. К центру 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 эта пластинка крепилась к препаратоводителю. Пластины устанавливались горизонтально, параллельно друг другу. Препаратоводитель позволял плавно, с точностью до 0.05 мм менять расстояние между пластинками. Смесь предварительно готовилась в газовом смесителе (состав задавался по парциальным давлениям), а затем подавалась через поплавковый расходомер в горелку. Поджиг осуществлял-

ся раскаленной нихромовой нитью, расположенной на краю дисков. Пламя регистрировалось двумя видеокамерами: Hitachi VM 7380E и высокоскоростной Fastcam PCI 1000 фирмы Photron. Камера Hitachi VM 7380E регистрировала пламя сверху, а Fastcam PCI 1000 — сбоку. В качестве горючего газа использовались метановоздушные смеси.

В случае, когда нет горения, скорость движения газа между пластинками уменьшается линейно с увеличением расстояния от места его подачи. Перед экспериментом расход горючего газа устанавливался такой, чтобы существовали точки между пластинками, в которых скорость движения газа равнялась бы нормальной скорости пламени. Диски (пластинки) удалялись друг от друга на расстояние больше критического (2.03 мм [5]), и производился поджиг. Пламя устремлялось в пространство между пластинками и, несмотря на то, что зазор между ними был больше критического, гасло. Только при достаточно большом зазоре ( $\approx 5$  мм) оно устанавливалось в пространстве между дисками, причем не сразу. Сначала наблюдалось инициирование горения от спирали, затем его гашение и вновь инициирование и гашение. Пламя устанавливалось только при прогреве пластинок. Спираль убирали. После этого можно было уменьшать расстояние между дисками, не вызывая гашения пламени. На рис. 1 показан вид пламени сверху, полученный с помощью цифровой камеры, которая дает осредненное изображение. Расстояние между пластинками 3 мм. Расход горючего газа  $G = 56 \text{ см}^3/\text{с}$ . Смесь — 10 %  $\text{CH}_4$  + воздух. Пламя представляло собой широ-

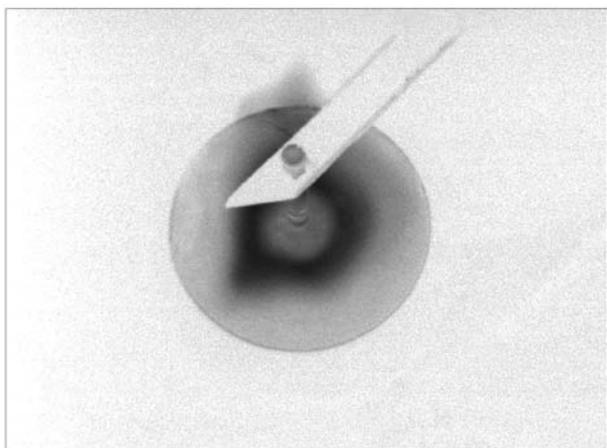


Рис. 1. Цифровое обработанное изображение пламени (время экспозиции 0.5 с)

кое, синее, неправильной формы кольцо. Причем на некоторых участках оно выходило наружу из пластинок, а на других — постоянно перескакивало из одного положения в другое, при этом изменялось расстояние от центра дисков до пламени. Горение сопровождалось характерным звуком. Несимметричность пламени, вероятно всего, связана с несимметричностью газового потока, которая обусловлена наложением двух факторов: несимметричностью установки (невозможно сделать диски идеально параллельными) и тем, что приближение пламени к центру в одном месте приводит к увеличению скорости газа на противоположном участке. Как показала скоростная видеосъемка, пламя не стоит на месте, а перемещается и на каких-то участках гаснет. При уменьшении расхода синее светящееся кольцо становится все более симметричным, и, наконец, при  $G \approx 45 \text{ см}^3/\text{с}$  наблюдается спиновое горение, т. е. по окружности бежит достаточно длинный очаг пламени (это показала видеосъемка сбоку). При расстоянии между дисками 3 мм ширина светящегося кольца примерно  $1/4$  радиуса диска, частота вращения  $\approx 40$  Гц. Кольцо полностью находится в пространстве между пластинками. Необходимо отметить, что не всегда горение сразу переходит в спиновое, иногда наблюдаются переходные процессы: на части окружности пламя стабилизируется, а по другой перемещается очаг; иногда скорость вращения «спина» изменяется, прежде чем установиться. Перемещение очага при спиновом горении, полученное скоростной ви-

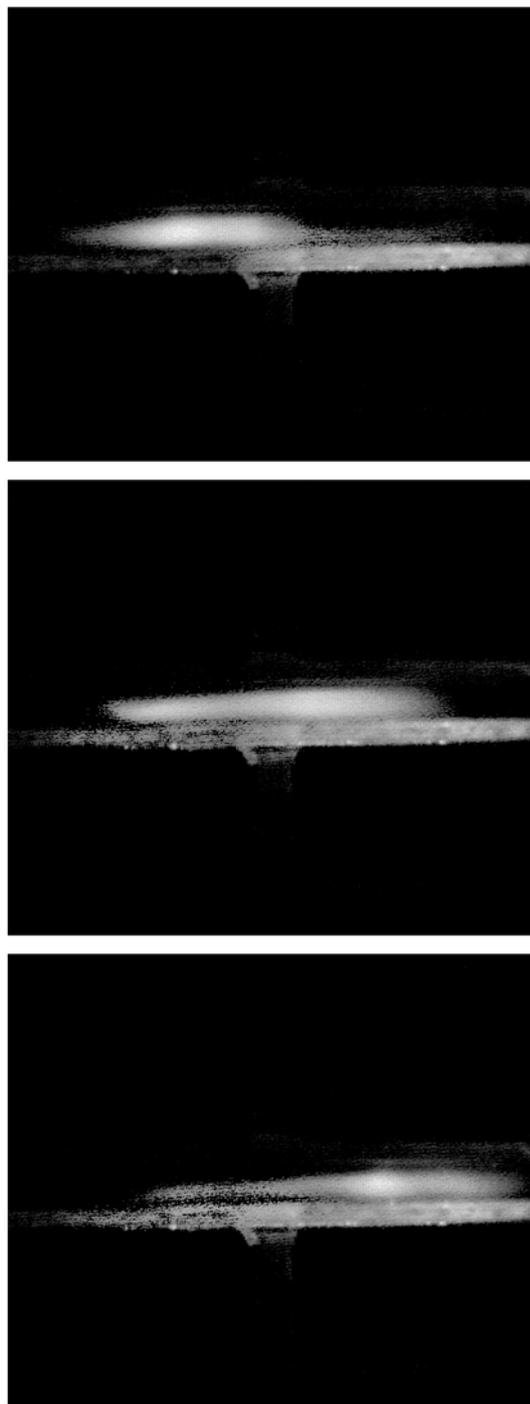


Рис. 2. Три последовательных кадра перемещения очага при спиновом горении (время между кадрами  $1/250$  с)

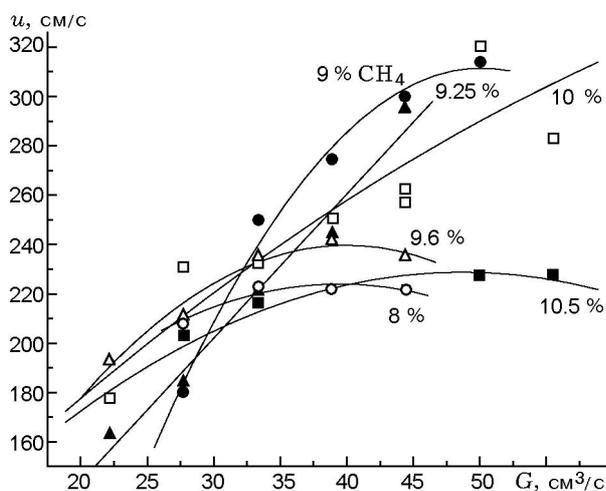


Рис. 3. Зависимость скорости перемещения очага пламени по окружности от расхода горючего газа

деокамерой, показано на рис. 2 (три последовательных кадра, время между кадрами  $1/250$  с; смесь 9 %  $\text{CH}_4$  + воздух;  $G = 44.5$  см<sup>3</sup>/с; расстояние между дисками 3 мм). Камера установлена сбоку так, что ее объектив направлен в зазор между пластинками. Доказательством того, что очаг перемещается по окружности, а не по радиусу, является то, что осредненное изображение этого очага сверху, полученное видеокамерой, которая фиксирует свечение, сопровождающее горение, представляет собой кольцо. С уменьшением ширины зазора до 2 мм при постоянном расходе горючего газа частота вращения возрастает до 82 Гц и кольцо пламени становится еще более широким (имеется в виду светящаяся область). При этом расстояние от места стабилизации пламени до точки подачи горючей смеси если и изменяется, то незначительно. Следует обратить внимание на такую закономерность. После уменьшения зазора между пластинками светящаяся зона становится более широкой (ширина кольца), однако если затем уменьшить расход, то наблюдается скачкообразное, еще более значительное уширение этой зоны. Ширина светящегося кольца становится больше  $1/2$  радиуса диска. Отметим, что при  $G < 45$  см<sup>3</sup>/с и изменении расстояния между дисками от 3 до 1.7 мм пламя вращается. Дальнейшее уменьшение расстояния приводит к резкой смене характера горения. При расстоянии  $\approx 1.5$  мм кольцо пламени становится очень узким, пластинки сильно разогреваются. Характерный звук исчезает.

Скоростная съемка показала, что в этом режиме при больших расходах пламя устойчиво, однако при малых расходах опять возникают перемещающиеся по окружности очаги. Характерной особенностью этого режима является наличие теплового потока от продуктов горения в свежую смесь через кварцевые пластинки. Такой режим называют горением с избытком энтальпии, и он наблюдается, например, в узких трубках [6, 7] и пористых средах [8–10]. При дальнейшем уменьшении расстояния между дисками пламя гаснет. На рис. 3 показана зависимость видимой скорости перемещения очага пламени ( $u$ ) по окружности от расхода горючего газа. Видно, что с увеличением расхода скорость возрастает. Необходимо сказать, что точность определения скорости очага пламени невелика из-за размытости фронта пламени и составляет  $\approx 20$  %.

В работе [1] получен режим горения, когда очаг пламени бежит по окружности, названный авторами «спиновым горением». Причиной такого поведения очага является то, что на испарения горючей жидкости и перемешивание паров с воздухом требуется гораздо больше времени, чем на сгорание полученной смеси. Если организовать процесс так, чтобы за время, необходимое для приготовления горючей смеси, очаг пламени возвращался в это место, то можно получить бегающий по окружности (или по какой-то кривой) фронт пламени. В работе [4] показано, что «спиновое горение» такого типа получить просто. Для этого в пространство между двумя дисками, находящимися на расстоянии меньше критического (чтобы пламя не проникало в зазор между дисками), нужно подавать предварительно приготовленную горючую смесь, подобрав расход таким, чтобы скорость газа на выходе из зазора была меньше скорости сгорания горючей смеси, но при этом смесь успевала бы обновиться за время, в течение которого очаг делает один оборот. В этом случае можно получить спиновое горение (очаг пламени бежит по периметру дисков). В данной работе механизм спинового горения, по-видимому, другой. Так как пламя вращается в зазоре между пластинками по окружности определенного радиуса, то скорость движения горючего газа на этом радиусе должна быть равна, в отличие от [1, 4], радиальной составляющей скорости пламени (имеются в виду скорости в центре зазора). В противном случае фронт пламени пере-

местился бы к месту, где эти скорости равны. Но равенство скоростей есть условие стабилизации пламени, т. е. в этом случае возможно установление, в отличие от [1, 4], непрерывного стационарного горящего кольца. Однако этого не происходит. Очаг пламени, перемещаясь по окружность, поджигает горючую смесь все в новых и новых точках. При этом в тех точках, откуда передний фронт очага ушел, наблюдается гашение. Для понимания механизма спинового горения важно выяснить причину гашения. Одной из них может быть интенсификация теплообмена из-за конвективного движения газа (число Рейнольдса для скорости, равной видимой скорости пламени,  $Re \approx 300$ ).

Необходимо отметить, что в такой системе должны ярко проявиться эффекты, связанные с влиянием числа Льюиса. В самом деле, если предположить, что за головой спина имеет место турбулизация, а скорость турбулентного горения зависит от числа Льюиса, то формирование спина также будет зависеть от этого числа.

Остается невыясненным вопрос о том, насколько велико влияние прогрева стенок на процесс горения. Понятно, что поступающая горючая смесь прогревается от стенок и поэтому изменяется нормальная скорость, но непонятно, является ли это определяющим для образования спинового горения.

Итак, в работе показано, что в условиях расходящегося потока горючего газа в зазоре между тонкими пластинками наблюдается несколько режимов горения. При больших расходах имеет место неустойчивое пульсирующее горение. С уменьшением расхода горение переходит в спиновое. При достаточно малом расстоянии между пластинками пламя становится тонким и реализуется режим горения с избытком энтальпии в условиях расходящегося

потока газа. В случае спинового горения происходит гашение пламени после сгорания очередной порции газа, несмотря на то, что свежей смеси должно быть достаточно для поддержания горения. Возможно, этот механизм гашения присущ любому турбулентному горению.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коржавин А. А., Бунев В. А., Намятов И. Г., Бабкин В. С. Спиновый режим газофазного горения конденсированного топлива // Докл. АН. 2000. Т. 375, № 3. С. 355–357.
2. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР. 1959. Т. 129, № 6. С. 1254–1256.
3. Быковский Ф. А., Васильев А. А., Ведерников Е. Ф., Митрофанов В. В. Детонационное горение газовой смеси в радиальных кольцевых камерах // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 4. С. 111–119.
4. Замащиков В. В. Газовые вращающиеся пламена // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 2. С. 9–10.
5. Основы горения углеводородных топлив. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
6. Zamashchikov V. V. An investigation of gas combustion in a narrow tube // Combust. Sci. Technol. 2001. V. 166. P. 1–14.
7. Chen J. L.-P., Churchill S. W. Stabilization of flames in refractory tubes // Combust. Flame. 1972. V. 18. P. 37–42.
8. Takeno T., Sato K., Hase K. A theoretical study on an excess enthalpy flame // Eighteenth Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1981. P. 465–472.
9. Weinberg F. J. Heat-recirculating burners: Principles and some recent developments // Combust. Sci. Technol. 1996. V. 121. P. 3–22.
10. Бабкин В. С., Дробышев В. И., Лаевский Ю. М., Потытняков С. И. Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 2. С. 17–26.

Поступила в редакцию 4/V 2005 г.