

6. Горев В.А., Федотов В.М. Экспериментальное изучение влияния загроможденности пространства на скорость горения газов // *ФГВ*. — 1986. — 22, № 6. — С. 79—83.
7. Taylor P.H. On the role of Partial confinement in the generation of fast flames // *Combust. Sci and Techn.* — 1985. — 44, N 3/4. — P. 161—178.
8. Трунев А.В., Цариченко С.Г., Шебеко Ю.Н. и др. Влияние распыла воды на горение бедных околопредельных водородовоздушных смесей в большом объеме / *Пожарная безопасность промышленных объектов: Сб. научн. тр.* — М.: ВНИИПО МВД СССР, 1991. — С. 92—101.
9. Корольченко А.Я., Шебеко Ю.Н., Цариченко С.Г. и др. Влияние распыленной воды на горение бедных водородовоздушных смесей в замкнутом объеме // *Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях*. — ВИНТИ. — 1992. — № 4. — С. 76—86.
10. Баратов А.Н., Руднев А.В. Интенсификация пламени медленногорящих газовых смесей // *Проблемы пожарной безопасности зданий и сооружений: Материалы 10 Всесоюз. науч.-практич. конф.* — М.: ВНИИПО МВД СССР, 1990. — С. 66—67.
11. Цариченко С.Г., Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я. др. Влияние турбулизаторов на горение бедных водородовоздушных смесей в замкнутом сосуде большого объема // *ФГВ*. — 1990. — 26, № 5. — С. 76—79.
12. Корольченко А.Я., Трунев А.В., Шебеко Ю.Н. и др. Горение водородовоздушных смесей в загроможденном пространстве в замкнутом сосуде большого объема // *Хим. пром.* — 1994. — № 6.
13. Bartknecht W. The course of gas and dust explosions and their control. // *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. — Amsterdam: Eisevier, 1974. — P. 159—174.
14. Мольков В.В., Некрасов В.П. Динамика сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения // *ФГВ*. — 1981. — 17, № 4. — С. 17—24.
15. Мольков В.В., Некрасов В.П., Баратов А.Н. и др. Турбулентное горение газа в разгерметизированном сосуде // Там же, 1984. — 20, № 2. — С. 28—33.
16. Шебеко Ю.Н., Келлер В.Д., Ерёмченко О.Я. и др. Закономерности образования и горения локальных водородовоздушных смесей в большом объеме // *Хим. пром.* — 1988. — № 12. — С. 728—731.

143900, г. Балашиха-6,  
ВНИИПО

Поступила в редакцию 12/V 1993,  
после доработки  
22/IV 1994

УДК 536.46

*В.В. Замашников*

## ГОРЕНИЕ ГАЗА В ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБКЕ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Экспериментально изучена возможность существования волны горения в трубке с внутренним диаметром меньше критического. Показано, что в определенном диапазоне расхода горючего газа внутри тонкостенной трубки существует стационарная волна горения. Стабилизация конуса пламени происходит за счет прогрева стенки трубки.

Известно, что в трубках, диаметр которых меньше критического, пламя не распространяется [1]. Предел по диаметру связан с кондуктивными теплопотерями из фронта пламени в стенки трубки [1]. Однако в работе [2] было показано, что в инертных пористых средах с размерами каналов меньше критического при фильтрации газа через пористую среду может существовать тепловая волна. Одно из основных отличий этой волны от волны, распространяющейся по газу, согласно моделям [2—4], состоит в том, что тепло на прогрев и воспламенение свежего газа передается в основном через пористую среду, т.е. наличие пористой среды — необходимое условие существования фильтрационной волны горения. Цель настоящей работы — поиск условий, при которых в трубке с внутренним диаметром меньше критического может существовать волна горения.

Эксперименты проводились в горизонтальной стальной трубке с внешним диаметром 3 и внутренним 2,5 мм. В качестве горючего газа использовалась стехиометрическая метановоздушная смесь. Расход газа, протекающего по трубке, задавался с помощью редукторов давления и натекателя, и измерялся масляным манометром по перепаду давления.

© В.В. Замашников, 1995

Критический диаметр для стехиометрической метановоздушной смеси 3,5 мм [5], поэтому пламя по трубке с внутренним диаметром 2,5 мм не должно распространиться. Действительно, после установления факела на срезе трубки уменьшения расхода газа приводит не к проскакиванию пламени в нее, а к гашению. Однако, если после установления факела на срезе прогревать торец трубки внешним источником тепла (в данной работе в качестве внешнего источника тепла использовалось пламя спиртовки), то факел входит внутрь трубки. Постепенно перемещая внешний источник тепла вдоль трубки, можно сдвигать факел от края трубки вглубь. При этом, если внешний источник тепла убирается, факел способен существовать самостоятельно, причем он всегда перемещается по потоку газа. На наличие волны горения указывает узкая прогретая докрасна полоска на трубке. Однако факел существует ограниченное время. Установлено, что причина гашения факела — перекрытие трубки сконденсированной водой, образующейся в результате химической реакции.

Необходимо указать на основное отличие данного процесса от фильтрационного горения газа в пористой среде. В пористой среде, согласно моделям [2—4], горючая смесь воспламеняется за счет передачи тепла газу от твердого каркаса. В данном же случае прогрев свежего газа до воспламенения происходит не от стенки трубки, а за счет передачи тепла по газу. Доказательством этого могут служить следующие наблюдения. Цвет трубки в месте, где находится волна горения, изменяется в зависимости от расхода газа от темно красного (видно только в темноте) до светло красного, т.е. волна горения существует при температурах стенки ниже температуры воспламенения. К тому же, волну горения удается создать внутри трубки, только постепенно перемещая факел от торца. Попытка же создания волны горения вдали от края трубки, не перемещая факел от торца, а разогревая небольшой участок трубки открытым пламенем так, чтобы ширина этого участка была шире, а температура существенно выше, чем в случае, когда волна горения находится в трубке, не увенчались успехом. По-видимому, в данном случае волна горения представляет собой факел, который, прогревая стенку трубки, понижает критический диаметр, тем самым создавая условия для своего существования.

Для того, чтобы исследовать динамические характеристики факела, стабилизированного на нагретом этим факелом участке трубки, необходимо было предотвратить его гашение. С этой целью часть трубки, где должна была происходить конденсация паров воды, нагревалась путем пропускания

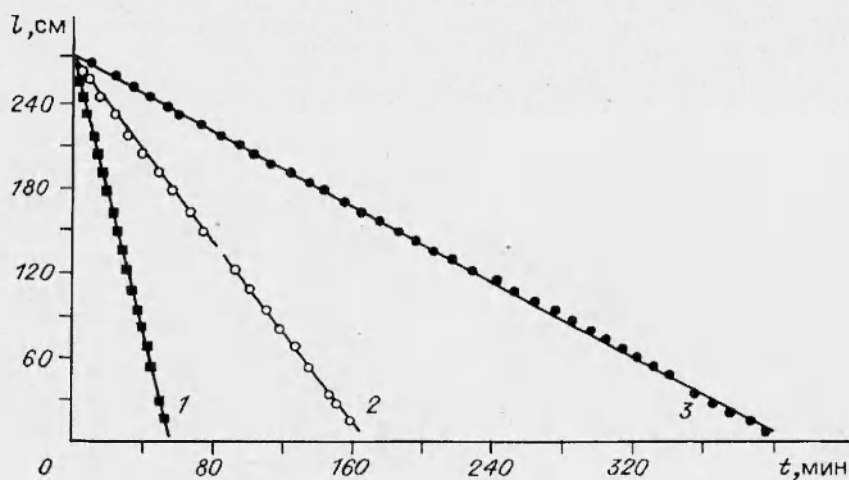
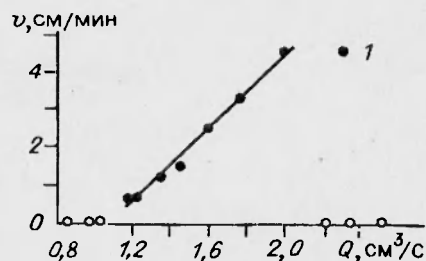


Рис. 1. Типичные зависимости координаты светящейся зоны от времени при разных расходах горючего газа  $Q$ , см<sup>3</sup>/с.  
1 — 2,0; 2 — 1,45; 3 — 1,18.

Рис. 2. Зависимость скорости перемещения светящейся зоны от расхода горючего газа.  
1 — факел гаснет.



через нее электрического тока. При этом температура прогретой током части трубки была существенно ниже температуры трубки в месте, где находился факел. Были измерены зависимости координаты факела от времени при разных расходах газа. Эксперименты проводились следующим образом. Устанавливался необходимый расход горючей смеси. Включался прогрев трубки. При этом один электрод был закреплен у торца трубки, а второй подвижный электрод — на том расстоянии от торца, на которое планировалось ввести факел. Затем с помощью спиртовки факел перемещался от торца трубки до подвижного электрода. После этого подвижный электрод переносился за факел вниз по потоку (в сторону продуктов горения). И начиная с этого момента производились измерения координаты светящейся зоны. По мере приближения факела к электроду электрод перемещался вниз по потоку (ток нагрева поддерживался постоянным).

Характерные зависимости координаты светящейся зоны от времени приведены на рис. 1. Видно, что факел распространяется почти стационарно. По наклону прямых, построенных по экспериментальным точкам, определялись скорости перемещения светящейся зоны. На рис. 2 показана зависимость скорости перемещения факела от расхода газа ( $Q$ ). Как и следовало ожидать, с увеличением расхода газа скорость перемещения факела растет. При расходах газа больше 2 и меньше 1,1 см<sup>3</sup>/с, факел гаснет. Необходимо отметить, что яркость свечения трубки в том месте, где горит факел, возрастает с увеличением  $Q$ . Помимо этого есть тенденция к уширению светящейся зоны с возрастанием расхода газа.

Таким образом, в настоящей работе показано, что внутри тонкостенной трубки с диаметром меньше критического в определенном диапазоне средних скоростей потока горючего газа может существовать волна горения, которая представляет собой стабилизированный внутри трубки факел. Стабилизация осуществляется за счет прогрева факелом стенки трубки. Факел перемещается по потоку газа с постоянной скоростью, которая зависит от средней скорости газового потока.

Автор выражает благодарность В.А. Буневу и В.С. Бабкину за критические замечания, высказанные при обсуждении работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Код проекта 93-03-18508.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980. — 478 с.
2. Бабкин В.С., Дробышев В.И., Лаевский Ю.М., Потытняков С.И. О механизме распространения волн горения в пористой среде при фильтрации газа // ДАН. — 1982. — 265, № 5. — С. 1157—1161.
3. Бабкин В.С., Дробышев В.И., Лаевский Ю.М., Потытняков С.И. Фильтрационное горение газов // ФГВ. — 1983. — 19, № 2. — С. 17—26.
4. Лаевский Ю.М., Бабкин В.С., Дробышев В.И., Потытняков С.И. К теории фильтрационного горения газов // ФГВ. — 1984. — 20, № 6. — С. 3—13.
5. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. — М.: Химия, 1974. — 262 с.

630090, г. Новосибирск,  
ИХКИГ СО РАН

Поступила в редакцию  
22/VII 1994