

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПРОПАНО- И ВОДОРОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В УЗКОЙ ТРУБКЕ

УДК 536.46

В. В. Замашиков

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально исследованы закономерности распространения волны горения по узкой трубке в режиме низких скоростей для пропано- и водородовоздушных смесей. В пропановых смесях увеличение кривизны поверхности пламени коррелирует со смещением максимума в область богатых смесей на зависимости скорости горения от состава смеси. Горение бедных водородовоздушных смесей сопровождается акустическими колебаниями, приводящими к сужению диапазона существования пламени по расходу горючего газа. Для богатых смесей пламена устойчивы и существуют при концентрации водорода, близкой к значению верхнего концентрационного предела распространения пламени.

В последнее время появилось много работ, посвященных исследованию горения газов в пористых средах. Так, условия стабилизации газовых пламен внутри инертной пористой среды исследованы в работах [1, 2]; установлено, что существует два устойчивых положения пламени, которые находятся вблизи границ пористой среды. В [3–5] показано, что пламя может стабилизироваться вблизи торцов трубки, причем у каждого торца возможно не одно, а множество устойчивых положений. В [6–9] получен и исследован режим распространения волны горения по инертной пористой среде со средним размером пор меньше критического при фильтрации горючего газа. Такой режим распространения волны горения назван в [8] режимом низких скоростей (РНС). Характерной особенностью РНС является участие твердого каркаса пористой среды в формировании волны горения. В [10, 11] показано, что режим, подобный РНС, может реализовываться в отдельной трубке с внутренним диаметром больше или меньше критического, определяемым из условия гашения обычных ламинарных пламен, распространяющихся в узких трубках. Если внутренний диаметр трубки больше критического, то существует два режима распространения волны горения: обычный и подобный РНС. В [10, 11] исследовалось горение только метановоздушных смесей. Однако известно, что при горении пропано- и водородовоздушных смесей наблюдается ряд особенностей. В частности, их пламена имеют ярко выраженную ячеистую структуру. Цель настоящей работы — экспериментальное изучение особенностей горения пропано- и водородовоздушных смесей в режиме низких скоростей в узкой трубке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводили в горизонтальной кварцевой трубке с внешним диаметром 4,9 мм и внутренним 2,7 мм. Измеряли скорость перемещения волны горения относительно

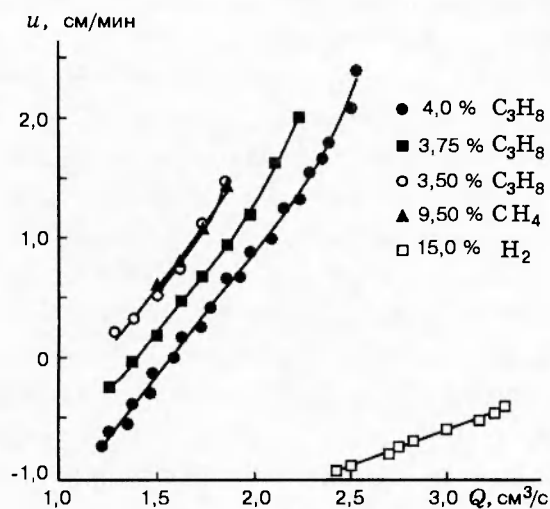


Рис. 1

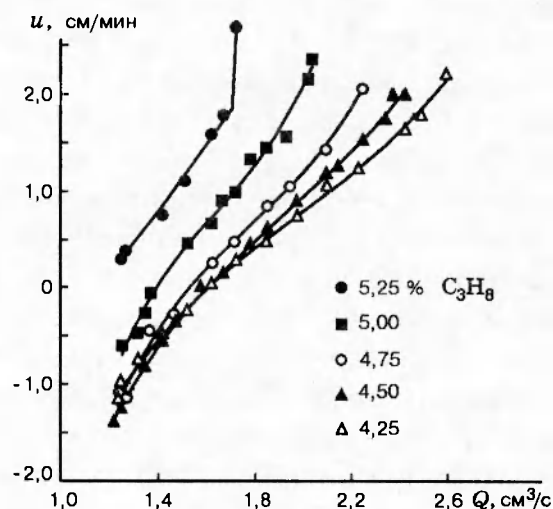


Рис. 2

Рис. 1. Зависимости скорости распространения пламени от расхода горючего газа

Рис. 2. Зависимости скорости распространения пламени от расхода горючего газа при разном содержании пропана в смеси

стенки трубки u и температуру стенки трубки T_w . Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента описаны в [10, 11]. Температура стенки трубки измерялась вольфрамово-рениевой термопарой, изготовленной из проволоки диаметром 50 мкм. Термопара прикреплялась в углубление ($\sim 0,2$ мм), сделанное на внешней поверхности трубки. Температура, измеренная термопарой, конечно же, отличалась от температуры внешней поверхности стенки. Она зависела от размера углубления и клея (смесь силикатного клея и измельченной керамики), с помощью которого термопара прикреплялась к трубке. Поэтому температурные измерения проводили с целью получить оценочные значения температуры и изучить ее отклик на изменения расхода и состава смеси. В качестве горючего газа использовали пропано- и водородовоздушные смеси. Точность приготовления смеси 0,1% (по объему). Систематическая ошибка измерения расхода горючего газа, связанная с ошибкой получения градуированной кривой расхода, составляла $\pm 15\%$, случайная погрешность измерения расхода газа $\pm 3\%$. Эксперименты проводили при температуре $14 \div 23$ °С и атмосферном давлении.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Пропановоздушные смеси. Зависимости скорости перемещения волны горения u от расхода горючего газа Q при разном содержании пропана в смеси показаны на рис. 1, 2. Положительные значения u соответствуют движению пламени вниз по потоку. Скорость перемещения волны горения u однозначно связана со скоростью горения и скоростью движения свежего газа относительно стенки трубки. При данном Q большим значениям u соответствует меньшая скорость горения. Экспериментальные точки, приведенные на этих

и других рисунках, перекрывают весь диапазон изменения расхода газа, в котором существует РНС. Для сравнения на рис. 1 приведены данные для метана, взятые из работы [11], и для водорода. Как видно из рисунков, нижний предел распространения пламени по расходу газа Q_{btm} для пропана $\sim 1,24 \text{ см}^3/\text{с}$ и, как и у метана [11], почти не зависит от состава смеси. Верхний предел по расходу горючего газа Q_{top} , напротив, зависит от состава смеси и при обеднении или обогащении ее относительно смеси, имеющей максимальную скорость горения (минимальное значение u), уменьшается. Так как внутренний диаметр трубки для пропановоздушных смесей меньше критического, то на нижнем и верхнем пределах по расходу газа наблюдается гашение пламени, а не переход в обычный режим. Если содержание пропана больше 5,5 или меньше 3,5 %, то пламя не существует при любых расходах. Наблюдения увеличенного изображения светящейся зоны пламени показали, что она представляет собой хорошо очерченную светло-зеленую полосу толщиной $\sim 70 \text{ мкм}$ (в центре трубки), за которой наблюдается область синего свечения.

Зависимости $u(Q)$ (см. рис. 1, 2) для смесей с содержанием пропана 5,25 и $4 \div 3,5 \%$ почти линейны. Только при больших расходах наблюдается их отклонение от прямой. Иное поведение $u(Q)$ для смесей с содержанием пропана $4,25 \div 5 \%$ связано, по-видимому, с изменением кривизны пламени. Фронт пропанового пламени имеет форму, близкую к параболоиду вращения, вершина которого направлена в свежую смесь. При увеличении расхода газа отношение высоты к радиусу основания параболоида уменьшается, т. е. фронт пламени становится более плоским.

На рис. 3 построены зависимости скорости u от концентрации пропана в смеси C для двух расходов. Измерения показали, что при $Q = 1,24 \text{ см}^3/\text{с}$ отношение высоты к радиусу основания параболоида вращения $\sim 0,6$, а при $Q = 2 \text{ см}^3/\text{с}$ — примерно 0,34. Из рисунка видно, что максимум скорости горения с уменьшением расхода смещается

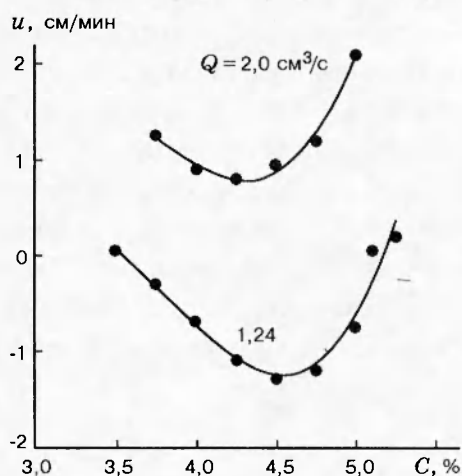


Рис. 3

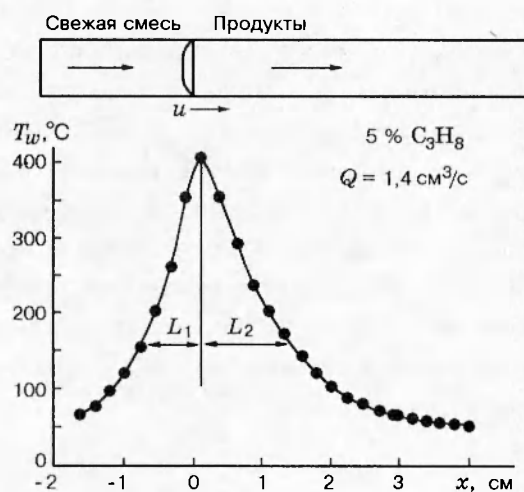


Рис. 4

Рис. 3. Зависимости скорости распространения пламени от содержания пропана в смеси при двух расходах горючего газа

Рис. 4. Зависимость температуры стенки трубки от координаты, связанной с фронтом пламени

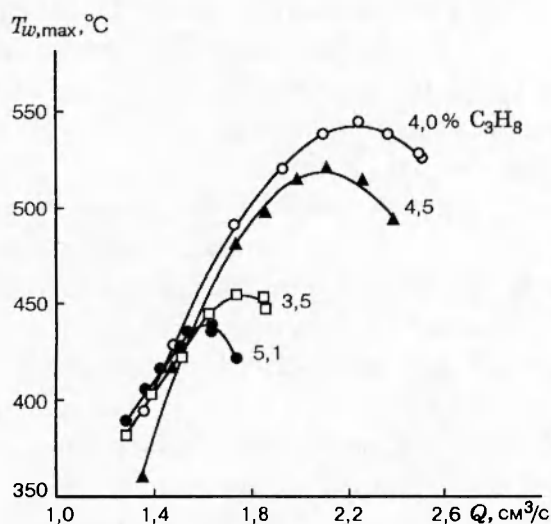


Рис. 5

Рис. 5. Зависимости максимальной температуры стенки трубки от расхода горючего газа при разном содержании пропана в смеси

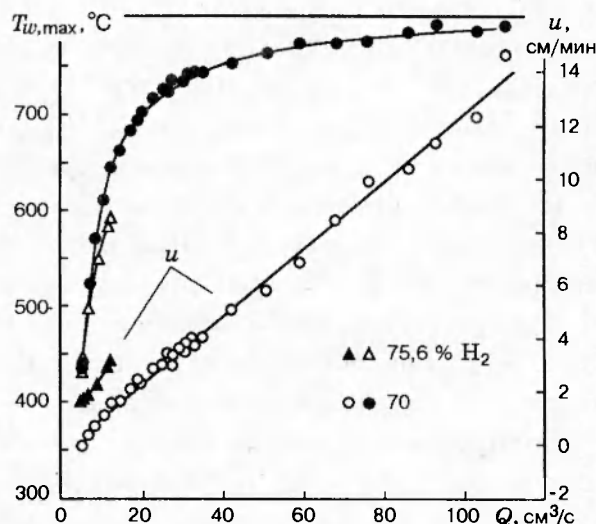


Рис. 6

Рис. 6. Зависимости скорости распространения пламени и максимальной температуры стенки от расхода горючего газа для водородовоздушных смесей

в область богатых смесей, т. е. наблюдается корреляция между смещением максимума скорости и изменением кривизны фронта пламени. Согласно экспериментальным данным, полученным в [12] и обработанным в [13], скорость распространения пламени при его растяжении увеличивается для богатых и уменьшается для бедных пропановоздушных смесей. Если предположить, что увеличение кривизны приводит к большему растяжению пламени, то полученные в этой работе данные согласуются с данными из [12].

В настоящей работе получены зависимости температуры стенки от времени при распространении волны горения вдоль трубки. Все они имеют одинаковый вид: температура стенки трубки повышается перед фронтом пламени в свежей смеси, достигает своего максимума в продуктах и затем падает (рис. 4). Расстояние между расположением максимума температуры стенки и расположением фронта пламени уменьшается, а величина максимальной температуры стенки $T_{w,max}$ растет (рис. 5, 6) по мере увеличения расхода газа, что должно сопровождаться возрастанием температуры свежего газа, входящего в зону горения. Рост температуры свежего газа приводит к увеличению скорости горения. Это происходит до того момента, пока расположения максимума температуры и фронта пламени не совместятся, после чего $T_{w,max}$ перестает расти и даже падает (см. рис. 5). Наблюдается переход в обычный режим (верхний предел по расходу газа), а если диаметр трубки меньше критического, то происходит гашение пламени. Однако при больших значениях температуры стенки, когда свежий газ может прогреться вплоть до температуры самовоспламенения, величина скорости горения может расти в гораздо больших пределах, что должно привести к существенному возрастанию верхнего предела. Это, возможно, и наблюдается при горении водородной смеси (см. рис. 6).

Для пропановоздушных смесей длина L_1 (на которой значение температуры T_w падает

в ϵ раз слева от $T_{w,\max}$, см. рис. 4) при приближении к верхнему пределу по расходу газа возрастает, а длина L_2 (на которой значение температуры T_w падает в ϵ раз справа от $T_{w,\max}$, см. рис. 4) уменьшается. Их значения при этом меняются в диапазоне $0,6 \div 2,5$ см. Закономерно, что снижение $T_{w,\max}$ на верхнем пределе приводит к более резкому увеличению u , т. е. к уменьшению скорости горения (см. рис. 1, 5).

На нижнем пределе для пропановых смесей, имеющих меньшее значение u , температура стенки ниже (см. рис. 3, 5). При достаточном удалении от нижнего предела картина меняется: для смесей, имеющих меньшее значение u , температура стенки выше. Так, из смесей, для которых на рис. 5 приведены значения $T_{w,\max}$, при расходе газа $2 \text{ см}^3/\text{с}$ значения u_{\min} и $T_{w,\max}$ наблюдаются для смеси, содержащей 4 % пропана, а при $Q = 1,24 \text{ см}^3/\text{с}$ — для смеси, содержащей 4,5 % пропана.

Водородовоздушные смеси. Зависимости $u(Q)$ для водородовоздушных пламен показаны на рис. 1, 6. Для визуализации этих плохо видимых пламен использовался электронно-оптический преобразователь. Опыты показали, что внутренний диаметр трубки, в которой проводили исследования, для смеси, содержащей 15 % водорода, больше критического. Поэтому на нижнем пределе по расходу горючего газа наблюдался переход в обычный режим (на рис. 1 он не показан). Характерной особенностью горения этой смеси является возбуждение в трубке акустических колебаний. Именно с ними связан наблюдаемый для этой смеси верхний предел по расходу горючего газа. При удалении волны горения от торца трубки колебания возникают при все более меньших расходах газа, и значение верхнего предела по расходу уменьшается. Экспериментальные точки, приведенные на рис. 1, получены на расстоянии ~ 15 см от торца трубки. Фронт горения бедной водородом смеси наклонен так, что его верхняя часть выдвинута вперед против потока.

Внутренний диаметр трубки для смесей с содержанием водорода 70 и 75,6 % меньше критического, поэтому на нижнем пределе по расходу горючего газа пламя гасло. Зависимость $u(Q)$ для этих смесей во всем диапазоне изменения Q почти линейна. При малых расходах фронт пламени располагался вертикально и имел почти плоскую форму; при больших расходах из-за сильного прогрева стенки трубки фронт пламени не виден. Диапазон значений Q , при которых существует волна горения для смеси, содержащей 70 % водорода, очень большой. Средняя скорость движения несгоревшего газа по трубке в этом диапазоне Q изменяется от 0,8 до ~ 19 м/с; при этом число Рейнольдса Re достигает значения ~ 1500 . Таким образом, движение несгоревшего газа вдали от фронта можно считать ламинарным ($Re < 2000$). Однако при приближении к фронту пламени свежая смесь прогревается от стенки трубки, поэтому ее скорость может возрасти и движение газа может стать турбулентным.

Нижний предел по расходу горючего газа для водородных пламен, в отличие от метановых и пропановых, существенно зависит от состава смеси. Это, по-видимому, связано со значительным изменением теплофизических свойств богатых и бедных водородовоздушных смесей.

Известно, что при горении бедных водородовоздушных смесей наблюдаются ячеистые пламена. Возможно, именно этим обусловлено различие в результатах, полученных для бедных и богатых водородом смесей. В [13] показано, что для горючих газов, пламена которых имеют ячеистую структуру, растяжение пламени приводит к возрастанию скорости горения. На основании этого факта можно предположить, что акустические колебания с большей вероятностью будут возникать именно при горении таких газов. Эксперименты, описанные в [14], подтверждают это предположение. По всей видимости, в настоящей

работе имеет место тот же самый механизм возникновения акустических колебаний; по крайней мере, при горении богатых водородом смесей акустические колебания не возникают при гораздо больших расходах газа.

Известно, что концентрационные пределы распространения пламени определяются теплотерями из фронта пламени и поэтому зависят от внутреннего диаметра трубки. В РНС происходит расширение концентрационных пределов распространения пламени по сравнению с пределами обычных ламинарных пламен. Это расширение, по-видимому, связано с передачей тепла от продуктов сгорания в свежую смесь через стенку трубки. В [16, 17] показано, что расширение пределов распространения пламени за счет возврата тепла в свежую смесь возможно. Обращает на себя внимание тот факт, что в данном случае для водородовоздушных смесей концентрация водорода, соответствующая верхнему пределу, близка к значению верхнего концентрационного предела распространения пламени, который равен 75 % [15] и получен при минимизации теплотерей из фронта пламени (в отсутствие кондуктивных теплотерей).

Максимальная температура, достигаемая при горении смеси, содержащей 70 % водорода, с увеличением расхода сначала резко возрастает, а затем в большей части диапазона изменения Q ее рост незначителен (см. рис. 6). Возможно, что такое поведение зависимости $T_{w, \max}(Q)$ связано с изменением поверхности фронта пламени: с увеличением расхода смеси площадь фронта пламени сначала почти не меняется и температура возрастает, как и при горении пропана, затем фронт все сильнее вытягивается в сторону продуктов, температура при этом почти не растет. При больших расходах газа $T_{w, \max}$ достигает значения ~ 800 °С, что заметно выше значения температуры самовоспламенения 510 °С [15], и поэтому становится возможным воспламенение горючей смеси от стенки трубки. Ширина температурного профиля L_1 с ростом Q увеличивается от 0,5 до 2,5 см, а L_2 — от 1 до 10 см.

Если считать, что фронт пламени не имеет разрыва в центре трубки, то для цилиндрических симметричных пламен в центре трубки выполняется равенство $u = v - u_n(T)$, где v — скорость движения свежего газа, $u_n(T)$ — скорость горения, направленная по нормали к поверхности пламени, при температуре T . Так как $v \gg u$, то $v = u_n(T)$. Для 70 %-й водородной смеси при больших расходах в случае пуазейлевского течения из-за прогрева смеси от стенки трубки скорость движения газа оказалась больше 2,19 м/с, т. е. $u_n(T) > 38$ м/с. Возрастание нормальной скорости происходит за счет повышения температуры. Для водородовоздушной смеси $u_n(T)/u_n(T_0) \sim (T/T_0)^2$ [18], где T_0 — комнатная температура, получается $T/T_0 > 6$ при $u_n(T_0) \approx 1$ м/с, что невозможно. Таким образом, либо в центре трубки фронт пламени имеет разрыв и свежая смесь догорает в продуктах, либо при значительном увеличении температуры (вплоть до температуры самовоспламенения) нормальная скорость начинает зависеть от нее сильнее, чем $(T/T_0)^2$.

Представляет интерес сравнить между собой данные по скоростям u , полученные для разных смесей и приведенные на рис. 1. Наклоны прямых, построенных по экспериментальным точкам для метановых и пропановых смесей, почти совпадают. Пропановые смеси имеют более широкие концентрационные пределы в этой трубке в РНС, чем метановые. Это так и должно быть, если исходить из того факта, что критический диаметр для обычного режима у пропановых смесей меньше. Наклон прямой, построенной для бедной водородной смеси, существенно отличается от наклонов прямых для метановой и пропановых смесей. С чем это связано, пока не ясно. Интересен так же тот факт, что Q_{btm} для разных смесей различен. Кроме того, обращает на себя внимание наблюдаемая закономерность:

если для горючей смеси внутренний диаметр трубки меньше критического, то фронт пламени цилиндрически симметричный, если же больше критического — то наклонный (это отмечалось и в [11]). Так, для 15 %-й водородовоздушной смеси диаметр использовавшейся трубки больше критического и фронт пламени имеет наклон, а для 70 %-й водородовоздушной смеси — меньше критического и пламя цилиндрически симметричное.

ВЫВОДЫ

Таким образом, основные характеристики волны горения, распространяющейся в РНС по трубке, сильно зависят от вида горючего. Так, для пропановоздушных смесей уменьшение расхода горючего газа приводит к увеличению кривизны поверхности фронта пламени и смещению максимума скорости в область более богатых смесей. При горении бедных водородом смесей возникают акустические колебания, из-за чего существенно сужается область существования пламени по расходу горючего газа. Богатые водородом смеси горят устойчиво. Верхний концентрационный предел для водородовоздушной смеси в РНС близок к значению верхнего концентрационного предела распространения пламени, полученного при минимизации теплотерь из зоны горения. Не выясненным остается вопрос о роли химического фактора при взаимодействии пламени со стенкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Takeo T., Kenji S.** An excess enthalpy flame theory // *Combust. Sci. Technol.* 1979. V. 20. P. 73–84.
2. **Kotani Y., Takeo 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.
3. **Chen J. L.-P., Churchill S. W.** Stabilization of flames in refractory tubes // *Combust. Flame.* 1972. V. 18. P. 37–42.
4. **Chen J. L.-P., Churchill S. W.** A theoretical model for stable combustion inside a refractory tube // *Ibid.* P. 27–36.
5. **Bernstein M. H., Churchill S. W.** Multiple stationary states and NO_x production for turbulent flames in refractory tubes // *Sixteenth Symp. (Intern.) on Combustion.* Pittsburgh: The Combustion Inst., 1976. P. 1737–1745.
6. **De Soete G.** Stability and propagation of combustion waves in inert porous media // *Eleventh Symp. (Intern.) on Combustion.* Pittsburgh: The Combustion Inst., 1966. P. 959–966.
7. **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.
8. **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.
9. **Лаевский Ю. М., Бабкин В. С., Дробышев В. И., Потытняков С. И.** К теории фильтрационного горения газов // *Физика горения и взрыва.* 1984. Т. 20, № 6. С. 3–13.
10. **Замашиков В. В.** Горение газа в трубке малого диаметра // *Физика горения и взрыва.* 1995. Т. 31, № 1. С. 23–25.

11. **Замашников В. В.** Экспериментальное исследование закономерностей газового горения в узких трубках // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 1. С. 42–47.
12. **Palm-Leis A., Strehlow R. A.** On the propagation of turbulent flames // Combust. Flame. 1969. V. 13. P. 111–129.
13. **Mishra D. P., Paul P. J., Mukunda H. S.** Stretch effects extracted from inwardly and outwardly propagating spherical premixed flames // Combust. Flame. 1994. V. 97. P. 35–47.
14. **Карпов В. П.** Ячеистая структура пламени в условиях бомбы постоянного объема и связь ее с вибрационным горением // Физика горения и взрыва. 1965. Т. 1, № 3. С. 68–74.
15. **Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения** / Под ред. А. Н. Баратова, А. Я. Корольченко. М.: Химия, 1990.
16. **Lloyd S. A., Weinberg F. J.** A burner for mixtures of very low heat content // Nature. 1974. V. 251. P. 47.
17. **Jones A. R., Lloyd S. A., Weinberg F. J.** Combustion in heat exchangers // Proc. Roy. Soc. London. A. 1978. V. 360. P. 97–115.
18. **Водород.** Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение / Под ред. Д. Ю. Гамбурга, Н. Ф. Дубовкина. М.: Химия, 1989.

Поступила в редакцию 10/VII 1996 г.
