

ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИ ГОРЕНИИ ВОДОРОДА В СВЕРХЗВУКОВОЙ СПУТНОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУЕ

С. С. Воронцов, В. А. Забайкин, А. А. Смоголев, П. К. Третьяков

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск, lab2@itam.nsc.ru

Подтверждено существование вихревых зон на внешней границе водородного факела в спутной сверхзвуковой струе воздуха. Анализ результатов экспериментов и сопоставление с известными расчетами показывают, что образование таких зон может быть связано с волновой структурой, возникающей при нерасчетном истечении воздушной струи. Размер вихревых зон горения увеличивается вдоль факела, а сами они могут способствовать улучшению смешения топливной и воздушной струй.

Ключевые слова: сверхзвуковая нерасчетная струя, горение водорода, вихревые структуры.

ВВЕДЕНИЕ

При выборе способов управления горением в сверхзвуковых потоках необходимо учитывать воздействие скачков уплотнения и волн разрежения на структуру течения. Используя неоднородность газодинамической структуры струи, можно дискретно изменять место воспламенения топлива [1], создавать локальные зоны отрыва для стабилизации пламени [2]. В этой связи необходимо отметить, что хотя первые работы, где скачки уплотнения использовались для воспламенения топливной струи, появились достаточно давно (см., например, [3]), экспериментальных работ по изучению взаимодействия волновой структуры и пламени известно немного. Волновая структура струй проявляется в виде «бочек» и характеризуется значительными градиентами плотности, давления и температуры. Несмотря на то, что структура нерасчетных струй достаточно хорошо исследована (см. библиографию в [4]), здесь могут обнаруживаться совершенно новые явления. Сравнительно недавно установлено существование когерентных вихревых структур, создаваемых стационарными возмущениями Тейлора — Гёртлера, на начальном участке сверхзвуковых неизобарических струй, хотя следы их и ранее наблюдались на теневых снимках в виде чередующихся продольных полос [5]. В экспериментах [6–8] и расчетах [9] принималось во внимание влияние степени нерасчетности, например, на задержку воспламенения, но механизм взаимодействия скачков уплотнения с пламенем не рассматривался.

При исследовании горения обычно используют осредненные параметры струи и, как пра-

вило, учитывают только воздействие скачков уплотнения на факел либо изучают расчетные режимы истечения [10]. Такой подход связан с объективными трудностями измерения параметров в сверхзвуковых высокотемпературных реагирующих потоках, необходимостью применения сложной и дорогостоящей аппаратуры. В экспериментах достаточно легко можно зафиксировать внешнюю границу пламени. Факел обычно характеризуют параметрами, соответствующими осредненному стационарному течению. Изучение структуры внутренних областей с применением обычных методов исследований вызывает затруднения. Здесь наиболее информативным является метод регистрации изображения на длинах волн излучения промежуточных продуктов реакции [11]. В водородно-воздушных пламенах используется собственное излучение возбужденного радикала ОН, являющегося промежуточным продуктом окисления водорода и имеющего малое время высвечивания ($\approx 10^{-8}$ с по данным [12]).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на стенде сверхзвукового горения с электродуговым подогревом воздуха. Изучалась структура пламени водорода в спутной сверхзвуковой нерасчетной воздушной струе, подогретой до температуры самовоспламенения водорода и истекшей в затопленное пространство. Инжектор диаметром 10 мм для подачи водорода располагался по оси профилированного воздушного сопла с выходным диаметром 50 мм [13]. Типичные параметры экспериментов были следу-

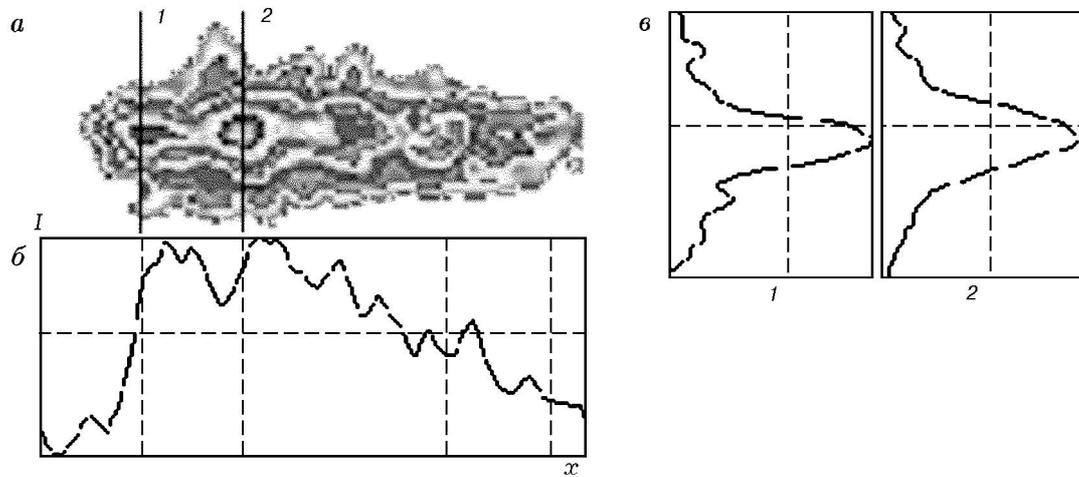


Рис. 1. Двумерное интегральное распределение интенсивности излучения факела H_2 в ультрафиолетовой области спектра (а), вдоль оси (б) и в двух (1, 2) поперечных сечениях (в): $G_1 = 2,7$ г/с, $M_1 = 1$, $T_2 = 2000$ К, развертка горизонтальная

ющими: температура торможения воздушного потока $T_2 = 2000$ К, число Маха $M_2 = 2,2$, расход воздуха до 1 кг/с, степень нерасчетности $n = 0,6 \div 0,7$. Число Маха центральной водородной струи M_1 в большинстве экспериментов равнялось единице, в части опытов $M_1 = 2,7$; расход водорода составлял $G_1 = 1,5 \div 4$ г/с; водород не подогревался. В экспериментах наблюдались устойчивое воспламенение и последующее горение на различных расстояниях от среза сопла, что определялось расходом подаваемого водорода [1].

Собственное излучение пламени водорода регистрировалось оптико-механическим сканером ЭФА-360УФ, в качестве приемника был использован фотоэлектронный умножитель ФЭУ-71. Излучение перехода $2\Sigma^+ \rightarrow 2\Pi$ радикала ОН в диапазоне длин волн $\lambda = 280 \div 320$ нм выделялось ультрафиолетовым светофильтром. Размерность получаемых двумерных изображений составляла 128×128 точек; время сканирования кадра 0,3 с; время сканирования одной строки $3 \cdot 10^{-3}$ с.

В последующих экспериментах регистрация пламени проводилась также камерами технического зрения с матричными кремниевыми приемными элементами и трансфокальным объективом. Область чувствительности этих камер лежит в видимой и ближней инфракрасной области спектра ($\lambda = 380 \div 1100$ нм). Водородно-воздушные пламена не имеют собственного излучения в этой обла-

сти спектра, излучение обусловлено неконтролируемыми примесями, предположительно S_2 [11]. Минимальное время экспозиции при регистрации «почти мгновенных» изображений равнялось 20 и 10 мкс. При скоростях потока $\approx 10^3$ м/с за время экспозиции газ «пробежал» расстояние ≈ 1 см. Этот масштаб принимался за пространственное разрешение структуры потока в экспериментах. Для получения «осредненных» по времени изображений регистрация велась при экспозициях $10^{-2} \div 10^{-3}$ с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1,а представлено зарегистрированное оптико-механическим сканером двумерное интегральное по лучу зрения изображение факела водорода в ультрафиолетовой области спектра. Поток воздуха направлен слева направо. На рис. 1,б показано распределение относительной интенсивности I излучения ОН вдоль оси, а на рис. 1,в — поперек факела в нескольких сечениях. Распределение интенсивности вдоль оси свидетельствует о значительной неоднородности ее по длине факела, которая была обнаружена ранее и связана с периодическим повышением и снижением скорости тепловыделения за скачками уплотнения в системе волновых структур сверхзвуковой воздушной струи [14]. Двумерная регистрация излучения факела и приведенное в [15, 16] восстановленное трехмерное изображение факела

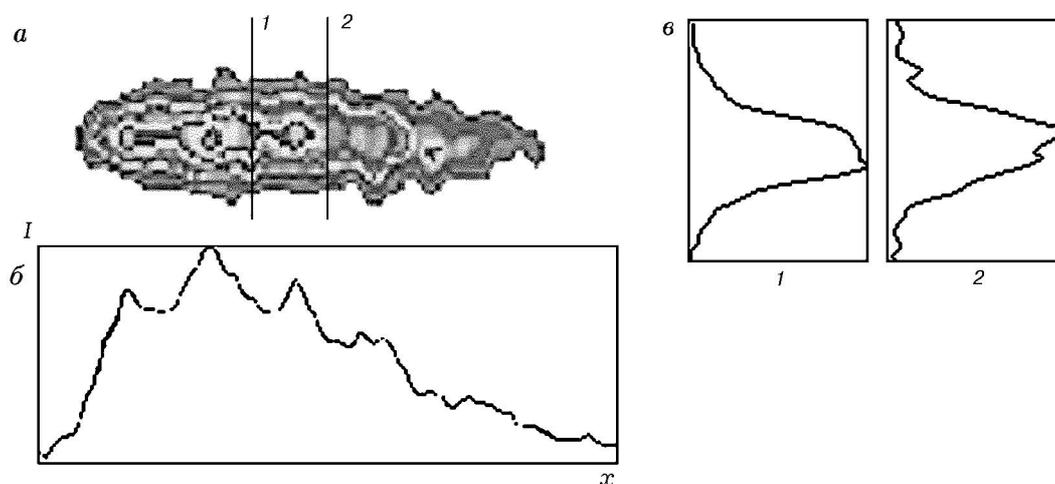


Рис. 2. Двумерное поле интенсивности излучения H_2 (а), осевой (б) и поперечные (в) срезы при вертикальной развертке изображения в ультрафиолетовой области спектра:

$M_1 = 1$, $G_1 = 2,7$ г/с, $T_2 = 2000$ К

подтвердили эти особенности. Для трехмерной томографической реконструкции использовалось преобразование Абеля, применение которого требует симметричных входных проекций. При восстановлении изображения в рамках исходных допущений обнаружено также наличие кольцеобразных (вихревых) зон горения на периферии основного факела. В исходных регистрациях двумерного изображения распределения интенсивности излучения радикала OH (см. рис. 1, а и особенно 1, в) при перемещении вдоль факела также периодически наблюдается небольшое увеличение интенсивности горения ближе к границам водородного факела. Это хорошо заметно в сечении 1. В сечении 2 подобное увеличение интенсивности практически отсутствует.

В связи с достаточно большим временем сканирования факела при горизонтальной развертке полученное изображение границ верхней и нижней частей факела не в полной мере соответствует реальной динамической картине. Поэтому была выполнена серия экспериментов, в которой развертка проводилась вертикально. Из рис. 2 видно, что в этом случае также просматриваются с некоторой периодичностью отдельные небольшие зоны горения на периферии факела. Распределения интенсивности излучения в поперечных сечениях (рис. 2, в) подтверждают наличие таких зон.

Прямые фотографии пламени не дают убедительной информации о тонкой структуре факела. В отдельных случаях заметны внутрен-

ние зоны с повышенной интенсивностью горения за скачками уплотнения (см. рис. 3, а). Внешних зон (на периферии факела) обнаружить не удалось, что обусловлено длительной экспозицией при фотографировании. Тем не менее в результате восстановления трехмерной структуры [15, 16] отмечена возможность существования кольцевых зон горения на периферии. Для повышения достоверности результатов в дальнейших исследованиях применяли высокоскоростные камеры технического зрения, которые позволили зарегистрировать

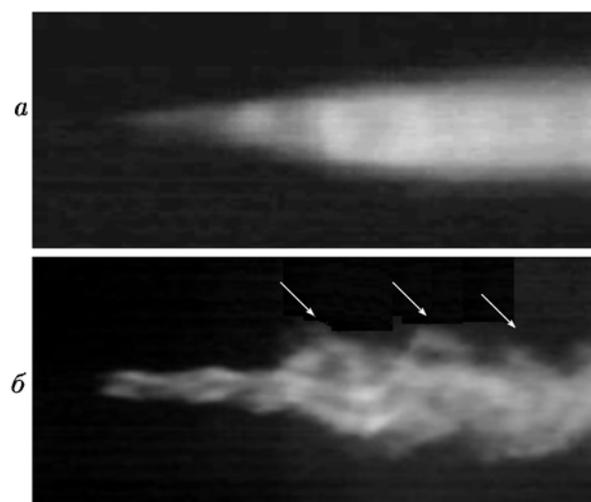


Рис. 3. Фоторегистрация горения звуковой струи водорода:

а — $\tau = 10^{-2}$ с; б — $\tau = 2 \cdot 10^{-5}$ с; $G_1 = 2,4$ г/с

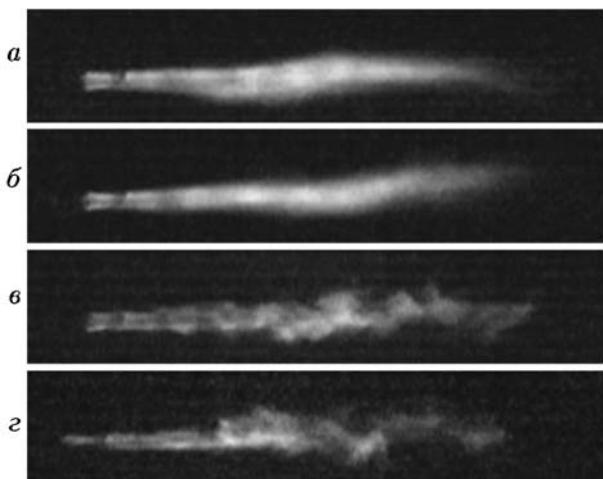


Рис. 4. Горение сверхзвуковой струи воздуха:
a, б — $\tau = 2 \cdot 10^{-4}$ с, *в, з* — $\tau = 10^{-5}$ с; *a-в* —
 конический инжектор, *з* — эллиптический инжектор;
 $G_1 = 2,4$ г/с

пламя с различными экспозициями. На рис. 3 представлены «осредненная» ($\tau = 10^{-2}$ с) и «мгновенная» ($\tau = 2 \cdot 10^{-5}$ с) фотографии факела водорода в условиях эксперимента, аналогичных предыдущим. Сравнение фотографий показывает, что вид факела значительно различается. При экспозициях 20 мкс заметно, что периферия факела фактически состоит из отдельных перемежающихся структур, имеющих определенную регулярность (на рис. 3, б показано стрелками). Это подтверждается анализом последовательно регистрируемых «мгновенных» изображений факела при покадровом просмотре.

На рис. 4 представлены «осредненные» и несколько «мгновенных» фотографий, полученных при сверхзвуковой подаче водорода ($M = 2,7$) из осевого инжектора. Здесь использована камера технического зрения с минимальной экспозицией 10 мкс. Фотографии *a-в* получены в экспериментах с коническим водородным инжектором, а *з* — с инжектором, выходное сечение которого имеет форму эллипса [17], а его большая ось расположена горизонтально. Для эллиптического инжектора струя в начальной части сужена в вертикальном направлении и (по расчетам [17]) должна расширяться, в первую очередь, в горизонтальной плоскости. Однако по фотографии заметно, что за счет вихревых структур значительное расширение происходит и по вертикали. Примерно на половине длины факела размер периферий-

ных зон горения, а затем и размеры всего факела почти сравниваются со случаем истечения из конического инжектора. Такой факт может свидетельствовать об улучшении смешения горючего (водорода) с воздухом под воздействием вихревых зон.

Надо отметить, что при анализе последовательных кадров пламени, выполненных с экспозицией $2 \cdot 10^{-4}$ с (см. рис. 4, *a, б*), заметны вертикальные перемещения хвостовой части факела. При более длительной экспозиции ($\geq 10^{-3}$ с) происходит осреднение изображения и таких колебаний не наблюдается.

Периодические вихревые зоны горения наблюдаются в области взаимодействия (смешения) внутренней и внешней струй, причем как при $M_1 \leq 1$ (см. рис. 3, *б*), так и при сверхзвуковом ($M = 2,7$) истечении топливной струи (см. рис. 4, *в, з*). Это свидетельствует о возможном влиянии волновой структуры внешнего сверхзвукового потока. В работах [18, 19] отмечалось, что неоднородность параметров течения при наличии скачков уплотнения, волн разрежения и тепловыделения от горения может приводить даже к возникновению местных отрывных зон. Поэтому наблюдаемые в экспериментах вихревые зоны не противоречат физическим представлениям о структуре течения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТАМИ

С полученными экспериментальными данными качественно хорошо согласуются результаты расчетно-теоретических исследований сверхзвукового диффузионного горения [20]. На модели системы плоских водородных струй в сверхзвуковом потоке воздуха ($M_1 = 1,15$; $M_2 = 2,63$; $T_1 = 454$ К; $T_2 = 1270$ К) было показано, что в области смешения центральной струи с потоком возникают периодически расположенные ячеистые структуры. Их появление обусловлено волновой структурой и различием состава газов струи и потока. Воздействие системы косых скачков уплотнения на поле скорости вызывает перетоки газа в поперечном направлении, к увеличению интенсивности которых в зоне смешения приводит различие плотностей центральной струи и внешнего потока, что является следствием как различия состава газа, так и увеличения температуры за счет химических реакций. Расчеты [20] показывают, что вихри находятся на внешней грани-

це пламени в зоне интенсивного смешения и их размер возрастает в направлении потока.

Подобная картина наблюдается на фотографиях пламени при выдержках $\leq 2 \cdot 10^{-5}$ с (см. рис. 3, б; 4, в, г). При скоростной фотосъемке периодическая структура вихревых зон горения более четко проявляется с середины факела. На отдельных фотографиях можно различить до 4 ÷ 5 внешних зон горения, располагающихся на приблизительно одинаковом расстоянии друг от друга, причем размер их возрастает с удалением от сопла. Интенсивность горения в периферийных зонах горения при температуре торможения воздуха менее 2000 К значительно меньше интенсивности горения в центральной части струи за скачками уплотнения, но возрастает при удалении от сопла. Эксперименты с измерением интенсивности тепловыделения (путем регистрации излучения радикала OH) показывают, что основное тепловыделение в первых 4 ÷ 5 «бочках» сверхзвуковой воздушной струи происходит в центральной части факела. Однако ближе к концу факела интенсивность горения в вихрях может приближаться к приосевой. Положение хвостовой части факела при этом неустойчиво (см. рис. 4, а, б).

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментов получены изображения водородного пламени в сверхзвуковой нерасчетной высокотемпературной воздушной струе. Зарегистрированные двумерные распределения интенсивности излучения в ультрафиолетовой области спектра и проведенная скоростная фоторегистрация в видимой области подтвердили существование на периферии водородного факела периодических кольцеобразных вихревых структур как при звуковом, так и при сверхзвуковом истечении водородной струи. Интенсивность горения в периферийных зонах при $T \leq 2000$ К значительно уступает интенсивности горения в центральной части струи за скачками уплотнения, но возрастает при удалении от сопла. В сверхзвуковом потоке такие вихри могут способствовать улучшению смешения топлива с окислителем и повышению интенсивности горения. Сравнение с расчетными данными позволяет предположить, что одной из причин порождения вихревых зон на периферии факела может быть волновая структура, которая формируется при нерасчетном истечении струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Забайкин В. А., Лазарев А. М., Третьяков П. К.** Использование газодинамической структуры свободной воздушной струи для управления горением водородного факела // *Материалы Междунар. семинара по структуре газофазных пламен.* Новосибирск, 1988. Ч. 1. С. 145–148.
2. **Иванькин М. А.** Использование локальных зон дозвукового течения для стабилизации горения в сверхзвуковом потоке // *Материалы Междунар. науч. конф. «Двигатели XXI века».* М.: ЦИАМ, 2000. Ч. 2. С. 60–62.
3. **Рубинс, Роудес мл.** Горение, вызванное косыми скачками уплотнения: сравнение экспериментальных результатов с кинетическими расчетами // *Ракет. техника и космонавтика.* 1963. Т. 1, № 12. С. 76–84. (См. также: Rubins P. M., Rhodes R. P., Jr. Shock-induced combustion with oblique shocks: comparison of experiment and kinetic calculations // *AIAA J.* 1963. V. 1, N 12.)
4. **Анцупов А. В., Благосклонов В. И.** О структуре сверхзвуковой струи, истекающей в затопленное пространство // *Тр. ЦАГИ.* М., 1976. Вып. 1781.
5. **Желтухин Н. А., Запрыгаев В. И., Солотчин А. В., Терехова Н. М.** Спектральный состав и структура стационарных вихревых возмущений Тейлора — Гёртлера сверхзвуковой неизобарической струи // *Докл. АН.* 1992. Т. 325, № 6. С. 1133–1137.
6. **Аннушкин Ю. М., Свердлов Е. Д.** Исследование устойчивости диффузионных затопленных пламен при дозвуковом и нерасчетном сверхзвуковом истечении газообразного топлива // *Физика горения и взрыва.* 1978. Т. 14, № 5. С. 53–63.
7. **Зимонт В. Л., Левин В. М., Мещеряков Е. А.** К вопросу о стабилизации горения в сверхзвуковом потоке // *Физика горения и взрыва.* 1982. Т. 18, № 3. С. 40–43.
8. **Бир, Кэплер, Вильгельми.** Влияние условий инъекции на воспламенение метана и водорода в потоке горячего воздуха при $M = 2$ // *Ракет. техника и космонавтика.* 1971. Т. 9, № 9. С. 256–257. (См. также: Bier K., Kappler G., Wilhelm H. Influence of the injection conditions on the ignition of methane and hydrogen in a hot mach 2 air stream // *AIAA J.* 1971. V. 9, N 9. P. 1865–1866.)
9. **Колесников О. М.** Влияние нерасчетности на задержку воспламенения пристенной струи водорода в сверхзвуковом потоке // *Физика горения и взрыва.* 1990. Т. 26, № 5. С. 15–19.
10. **Барановский С. И., Левин В. М., Надворский А. С., Турищев А. И.** Экспериментально-теоретическое исследование спутных сверхзвуковых реагирующих струй //

- Материалы Междунар. школы-семинара «Турбулентные течения в реагирующих потоках». Минск: ИТМО АН БССР, 1986. С. 84–98.
11. **Воронцов С. С., Константиновский В. А., Третьяков П. К.** Определение полноты сгорания водорода в сверхзвуковом потоке оптическим методом // Физическая газодинамика. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1976. Вып. 6. С. 69–72.
 12. **Радиационные свойства газов при высоких температурах** / В. А. Каменщиков, Ю. А. Пластилин, В. М. Николаев, Л. А. Новицкий. М.: Машиностроение, 1971.
 13. **Забайкин В. А.** Эффективность горения водорода в высокотемпературном сверхзвуковом потоке воздуха при различных способах инжекции // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 3–8.
 14. **Забайкин В. А., Лазарев А. М.** Влияние различных способов подачи водорода на его выгорание в сверхзвуковом потоке воздуха // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1986. Вып. 1. № 4. С. 44–49.
 15. **Воронцов С. С., Забайкин В. А., Пикалов В. В. и др.** Исследование структуры диффузионного факела водорода в сверхзвуковой высокоэнтальпийной струе воздуха // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 5. С. 3–5.
 16. **Vorontsov S. S., Zabaikin V. A., Tret'yakov P. K., et al.** Use of modern optical methods for supersonic diffusion flame structure research // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Novosibirsk, 2000. Pt 1. P. 202–206.
 17. **Kopchenov V. I., Lomkov K. E., Mnat-sakanyan Yu. S., et al.** Computational estimation of influence of injector nozzle shape on mixing in supersonic flow and comparison with experimental data // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Novosibirsk, 2000. Pt 3. P. 69–74.
 18. **Ferri A.** Mixing-controlled supersonic combustion // Annual Rev. Fluid Mech. 1973. V. 5.
 19. **Ferri A.** Review of problem in application of supersonic combustion // J. Roy. Aeronaut. Soc. 1964. V. 68. P. 645.
 20. **Жапбасбаев У. К., Макашев Е. П.** Газодинамические структуры при сверхзвуковом горении водорода в системе плоских струй в сверхзвуковом потоке // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 1. С. 25–32.

Поступила в редакцию 23/V 2002 г.
