

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ГОРЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ ПСЕВДОЖИДКОГО ТОПЛИВА

А. Г. Егоров, Д. А. Павлов

Тольяттинский государственный университет, 445667 Тольятти, butch-den@yandex.ru

Предложен газодинамический метод управления процессами горения и стабилизации пламени в потоке псевдожидкого топлива, основанный на подаче в камеру с внезапным расширением дополнительных струй воздуха с варьируемой частотой. Показано, что варьированием частоты подачи периодических струй воздуха можно воздействовать на характеристики горения псевдожидкого топлива.

Ключевые слова: псевдожидкое топливо, камера сгорания, аэровзвесь, периодические струи, частота.

Для создания двигательных и энергетических установок с использованием порошкообразных металлов в качестве горючего необходимы разработка надежных систем топливоподачи и организация устойчивого рабочего процесса в камере сгорания. В литературе рассматриваются два варианта подачи металла в камеру сгорания: 1) впрыск в камеру сгорания расплавленного металла, 2) подача металлического порошка в поток воздуха, поступающего в камеру сгорания [1].

Псевдожидкое топливо — порошкообразный металл — можно флюидизировать газом по методу кипящего слоя и подавать в камеру сгорания ракетного двигателя аналогично жидкому компоненту [2]. Принципиальная возможность создания энергетических установок нового поколения на псевдожидком топливе показана в работах [3–5]. При разработке двигательных и энергетических установок для летательных аппаратов необходимо уделять особое внимание процессу смешения порошкообразного горючего с воздухом для достижения максимальной полноты сгорания при приемлемых размерах камеры сгорания.

С уменьшением размера частиц твердого топлива закономерности горения двухфазной и гомогенной смесей становятся близкими, а по достижении значения  $d_{32} = 5$  мкм — одинаковыми. Однако, в отличие от гомогенных смесей, в аэровзвесьях при низких скоростях горения наблюдается ряд особенностей распространения пламени. Так, в [6] было получено, что после воспламенения первоначальное уско-

рение пламени в аэровзвесьях порошков алюминия и магния сменяется его замедлением. В [7] отмечено, что порошкообразные металлические горючие обладают уникальной способностью — гореть при очень низких значениях коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Тепловыделение реакции металлов с воздухом (на единицу массы продуктов сгорания) при  $\alpha = 1$  в  $2 \div 3$  раза, а при  $\alpha < 0,3$  в  $4 \div 6$  раз выше, чем в реакции углеводородов с воздухом. Повышенное тепловыделение при низких значениях  $\alpha$  (рассчитанных по кислороду) обусловлено специфической для металлов экзотермической реакцией азотирования [8]. В гомогенных смесях горючих газов и аэровзвесьях капле углеводородов тепловыделение, температура и нормальная скорость распространения пламени максимальны при  $\alpha \approx 1$ , тогда как скорость распространения пламени в аэровзвесьях порошков алюминия и магния возрастает по мере уменьшения коэффициента избытка воздуха (вплоть до  $\alpha = 0,1 \div 0,2$ ). Кроме того, с уменьшением  $\alpha$  увеличивается искривление фронта пламени, что приводит к увеличению его поверхности и, следовательно, скорости горения [9].

Известно [7], что эффективность сжигания алюминиево-воздушной смеси возрастает с увеличением давления в камере сгорания, уменьшением размера частиц и ростом скорости подвода вторичного воздуха в воспламенившийся поток аэровзвеси (критический режим соответствует приведенной скорости воздуха  $\lambda = u/a_* = 1$ , где  $a_*$  — критическая скорость звука, докритический режим —  $\lambda \ll$

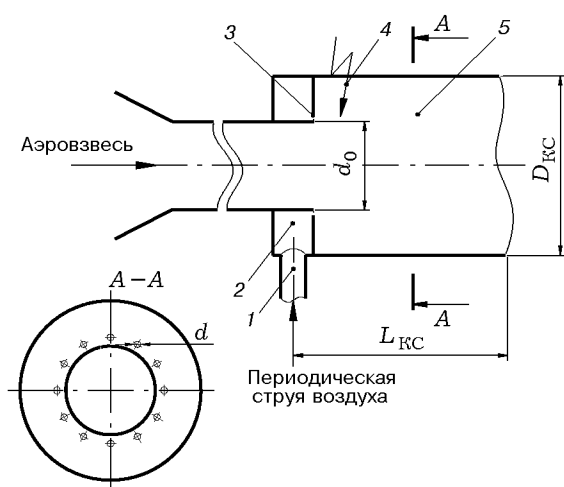


Рис. 1. Схема модели камеры сгорания с внезапным расширением:

1 — штуцер, 2 — кольцевой коллектор, 3 — отверстия для вдува дополнительных струй, 4 — электрическая свеча, 5 — камера сгорания

1). Установлено, что увеличение коэффициента камеры  $\varphi_k$  (соответственно коэффициента полноты сгорания) при критическом подводе вызвано лучшим перемешиванием струй вторичного воздуха с потоком горящей аэрозвеси.

Цель настоящей работы — исследование горения псевдожидкого топлива в камере с внезапным расширением при воздействии на процесс периодической подачи дополнительных струй воздуха с варьируемой частотой вдува.

Эксперименты с горением проводились на установке, описанной в [10]. Модель прямоточной камеры сгорания показана на рис. 1. Диаметр камеры сгорания  $D_{КС} = 0,08$  м, диаметр входного отверстия  $d_0 = 0,04$  м, длина камеры  $L_{КС} = 0,185$  м.

Подача периодических струй воздуха осуществлялась с помощью ротора, в котором было просверлено восемь отверстий диаметром 0,01 м. Ротор был соединен с валом электродвигателя, скорость вращения которого регулировалась автотрансформатором, что позволяло осуществлять периодическую подачу дополнительных струй воздуха с варьируемой частотой вдува 40 ÷ 700 Гц. Скорость вращения ротора измерялась магнитно-

\*  $\varphi_k$  — отношение действительной характеристической скорости в камере к идеальной, вычисленной при тех же соотношениях компонентов и давления в камере [2].

индукционным датчиком, сигнал от которого был выведен на цифровой тахометр ТЦ-5.

Псевдожидкое топливо подавалось в камеру сгорания через входное отверстие. Топливо представляло собой металловоздушную смесь, в которой в качестве порошкообразного металлического горючего использовался алюминий-магний-содержащий сплав марки АД-50 (50 % Al и 50 % Mg), а окислителем служил воздух с температурой 288 К. Периодический воздушный поток с частотой  $f = 0 \div 500$  Гц через штуцер поступал в кольцевой коллектор, давление в котором измерялось с помощью образцового манометра. Периодические струи воздуха вдувались в камеру сгорания через 12 отверстий диаметром 2,5 мм, равномерно расположенных вокруг входного отверстия. Поток псевдожидкого топлива поджигался электрической свечой поверхностного разряда.

Температура продуктов сгорания и наружной поверхности стенки камеры измерялась вольфрам-рениевыми термопарами ИС-629, сила тяги — с помощью силоизмерительного датчика ДСТ-0,01.

Испытания без горения проводились на установках, конструкции и схемы которых представлены в [3].

В экспериментах варьировался параметр спутности в диапазоне  $m = U_{стр}/U_0 = 0 \div 6$ . Здесь  $U_{стр}$  — скорость вдува периодических струй воздуха,  $U_0$  — скорость основного потока воздуха. Число Струхала  $Sh = f d_{отв}/U_{стр}$  изменялось в диапазоне 0,001 ÷ 0,004 ( $d_{отв}$  — диаметр отверстий для вдува периодических струй).

На начальном этапе испытаний задавали некоторую скорость основного потока воздуха  $U_0$  и частоту вдува периодических струй воздуха  $f$ . Затем за счет уменьшения или увеличения давления в коллекторе менялась скорость их вдува ( $\lambda \leq 1$ ) и тем самым варьировался параметр спутности  $m$ . Далее при том же значении  $U_0$  на входе в камеру устанавливалась другая частота вдува периодических струй и аналогично предыдущему варьировался параметр  $m$ . Затем эксперимент продолжался при других значениях  $U_0$ ,  $f$  и  $m$ .

В этих экспериментах скорость основного потока  $U_0$  определялась как отношение объемного расхода воздуха к площади входного отверстия камеры сгорания, а скорость подачи периодических струй  $U_{стр}$  — как отношение объемного расхода воздуха через одно отвер-

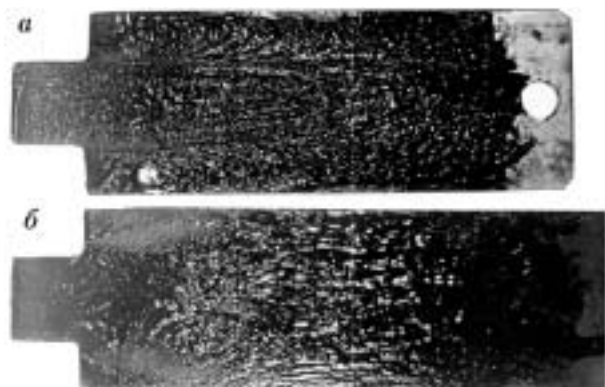


Рис. 2. Структура течения в модели камеры сгорания с внезапным расширением:

*a* — без вдува, *б* — при вдуве периодических струй воздуха,  $f = 150$  Гц

стие к площади этого отверстия.

Возникновение приосевой зоны рециркуляции и ее протяженность устанавливались методом нитей (шелковинок) [11]. В ходе эксперимента с помощью водяных пьезометров регистрировалось распределение давления по длине камеры сгорания.

Для визуализации течений изотермических воздушных потоков в моделях прямооточных камер сгорания с внезапным расширением использовался метод масляной пленки [11]. В испытаниях использовалась тонкая металлическая пластина толщиной  $1,0 \div 1,5$  мм, которую покрывали смесью графитового порошка и трансформаторного масла и устанавливали по оси камеры сгорания. Этот метод визуализации позволял непосредственно наблюдать картину течения в динамике, используя прозрачную модель камеры сгорания, либо фотографировать квазистационарную картину течения, изъев пластину из камеры. Увеличивая скорость подачи периодических струй воздуха или меняя частоту при постоянной скорости вдува, можно было следить за развитием течения в камере сгорания (трансформирование зоны рециркуляции за плоскостью внезапного расширения и возникновение приосевого рециркуляционного течения, влияние частоты периодических струй воздуха на размеры приосевой зоны рециркуляции и т. д.).

На рис. 2 показана квазистационарная картина течения в камере сгорания без вдува и с вдувом периодических струй воздуха с частотой 150 Гц. Видно, что при подаче периодиче-

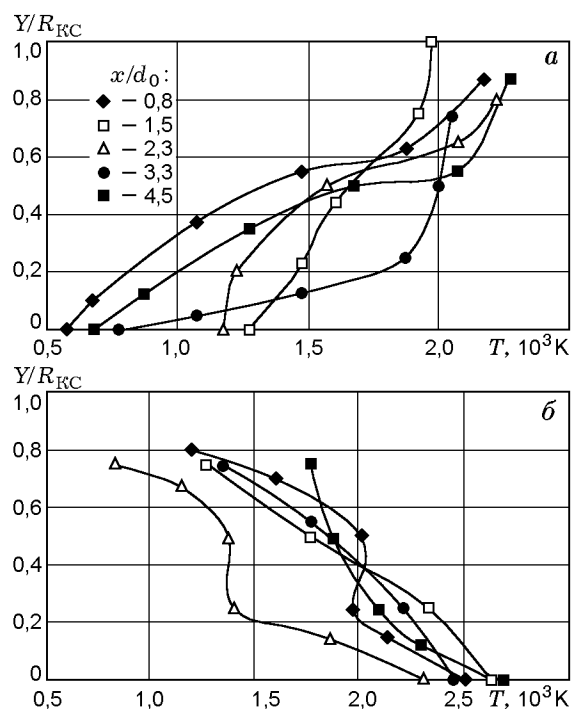


Рис. 3. Профили температуры в камере сгорания с внезапным расширением:

$U_0 = 70$  м/с,  $\alpha = 0,37$ ; *a* — без вдува, *б* — с вдувом периодических струй воздуха,  $f = 150$  Гц

ских струй воздуха зона обратных токов за внезапным расширением практически отсутствует, а вместо нее появилось приосевое рециркуляционное течение. При этом установлено, что приосевое рециркуляционное течение на оси камеры возникает только при критическом вдуве периодических струй воздуха с параметром спутности  $m \geq 4,5$ . С изменением частоты периодических струй в диапазоне  $f = 0 \div 150$  Гц длина приосевой рециркуляционной зоны увеличивалась с 60 до 95 мм, дальнейшее увеличение частоты до 400 Гц приводило к уменьшению ее длины до 65 мм.

В опытах с горением исследовалось влияние вдува периодических струй воздуха на поле температуры в камере, на полноту сгорания и пределы стабилизации. Были проведены измерения профилей температуры продуктов сгорания в нескольких сечениях камеры сгорания (рис. 3). В экспериментах без вдува и с вдувом состав металловоздушной смеси поддерживался одинаковым ( $\alpha = 0,65$ ). Расходы порошка АМД-50 и воздуха составляли соответственно 0,04 и 0,1 кг/с. Видно, что в случае подачи периодических струй воздуха темпера-

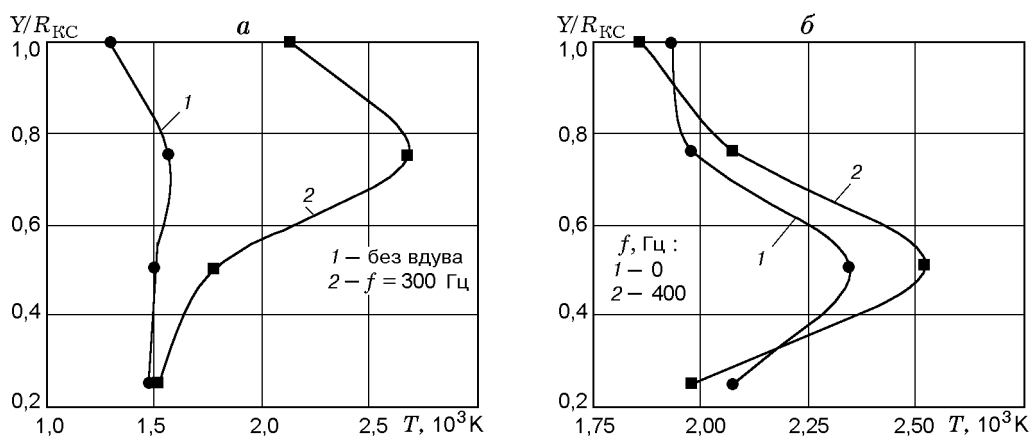


Рис. 4. Профили температуры в выходном сечении камеры сгорания:

$U_0 = 65$  м/с; а —  $\alpha = 0,4$ , б —  $\alpha = 0,68$

тура в камере повышается, область с максимальной температурой перемещается от стенки камеры к оси. При этом зона горения сдвигается к плоскости внезапного расширения, о чем свидетельствуют измерения температуры наружной поверхности стенки камеры. Так, в варианте без вдува максимальная температура стенки камеры (650 К) зафиксирована на расстоянии  $x/d_0 = 2,7 \div 4,0$ , а в варианте с вдувом (850 К) — при  $x/d_0 = 1,5 \div 3,0$ .

Как отмечается в [12], достаточно равномерное поле температур на выходе из камеры сгорания можно получить при оптимальном количестве и глубине проникновения струй вторичного воздуха.

Влияние вдува периодических струй воздуха на профиль температуры в выходном сечении камеры сгорания иллюстрирует рис. 4. Видно, что в области вдува появился более выраженный максимум температуры и увеличился ее общий уровень.

Было обнаружено влияние частоты вдува периодических струй воздуха на поле температуры на выходе из камеры. В экспериментах на частотах 50, 150 и 500 Гц при  $\alpha = 0,6$  было показано, что увеличение частоты вдува до 500 Гц ведет к выравниванию профиля. Можно предположить, что выравнивание профиля при  $f = 500$  Гц обусловлено воздействием только частоты вдува периодических струй воздуха на зону горения. Следовательно, варьированием частоты вдува можно воздействовать на поле температуры на выходе из камеры.

Для определения влияния частоты периодических струй воздуха на полноту сгорания

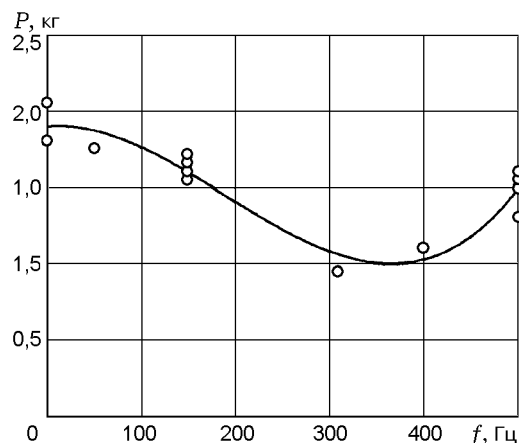


Рис. 5. Зависимость силы тяги от частоты вдува периодических струй воздуха при  $\alpha = 0,63$

одновременно с измерением температуры в выходном сечении камеры проводились измерения силы тяги. Результаты экспериментов показаны на рис. 5. С увеличением частоты до 300 Гц сила тяги уменьшается, а при  $f > 300$  Гц снова увеличивается. Снижение силы тяги при  $f \leq 250 \div 300$  Гц, а соответственно, и полноты сгорания можно объяснить совпадением частот вдува периодических струй воздуха и больших когерентных структур, возникающих за внезапным расширением.

Таким образом, результаты испытаний с измерением силы тяги показали, что, варьируя частоту вдува дополнительных периодических струй воздуха, можно управлять и полнотой сгорания.

Известно [13, 14], что вдув стационарных

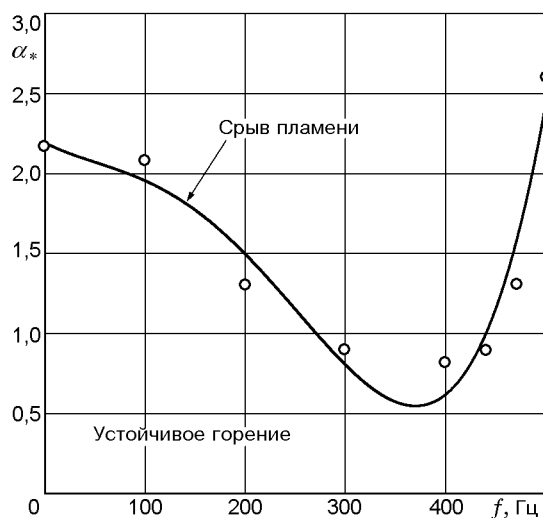


Рис. 6. Влияние частоты периодических струй воздуха на пределы стабилизации

струй воздуха в зону рециркуляции за стабилизатором пламени расширяет границы устойчивого горения по концентрационным пределам как газозвушных, так и бензовоздушных смесей.

В работе [15] исследовалось влияние периодической подачи воздуха на стабилизацию пламени газозвушной смеси за V-образными стабилизаторами. Установлено, что, по сравнению со стационарным потоком, в потоке газозвушной смеси с периодической подачей воздуха скорость срыва возрастает.

Эксперименты по определению влияния частоты вдува периодических струй воздуха на устойчивость горения псевдожидкого топлива проводились при  $U_{стр} = 310$  м/с,  $U_0 = 60$  м/с. При данных начальных условиях на определенной частоте вдува и при произвольном расходе горючего осуществлялся поджиг металловоздушной смеси. Затем при уменьшении подачи порошка АМД-50 в камеру фиксировался срыв горения, после чего по измеренному в момент срыва расходу горючего рассчитывался коэффициент избытка воздуха  $\alpha_*$  металловоздушной смеси. Далее испытания проводились при тех же начальных условиях с разной частотой вдува —  $f = 0 \div 500$  Гц.

Влияние частоты периодических струй воздуха на устойчивость горения псевдожидкого топлива показано на рис. 6 (на оси ординат отложены значения  $\alpha_*$ , при которых происходил срыв пламени). Видно, что с увеличением

частоты значения  $\alpha_*$  уменьшаются, достигая минимума при  $f = 300 \div 450$  Гц, т. е. смещаются в область «богатых» смесей, что означает ухудшение стабилизации пламени. При дальнейшем увеличении частоты вдува до 500 Гц происходит увеличение  $\alpha_*$  и, соответственно, улучшение стабилизации. Ухудшение стабилизации, возможно, связано с совпадением частоты вдува периодических струй воздуха с дискретной частотой больших когерентных структур ( $f = 250 \div 450$  Гц), возникающих в каналах с внезапным расширением [16].

Результаты экспериментов, изложенные в настоящей работе, показали, что вдув в камеру сгорания периодических струй воздуха необходимо осуществлять при критическом режиме, поскольку, как показано в [7], при докритическом подводе «вторичного» воздуха из-за плохого перемешивания компонентов в потоке аэрозвеси в зоне горения образуется среда с высокой температурой, низким содержанием кислорода и высоким содержанием (> 30 % исходной массы алюминия) продуктов испарения (Al, Al<sub>2</sub>O, AlO), которые за время пребывания в камере сгорания не успевают перемешаться с воздухом и вступить в реакцию с кислородом. Вдув периодических струй воздуха с критической скоростью позволяет управлять течением в камере с внезапным расширением, интенсифицировать процесс горения псевдожидкого топлива и воздействовать на границы срыва пламени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Резников М. А. Авиационные и ракетные топлива и смазочные материалы. М.: Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1960.
2. Алемасов В. Е., Дрегаллин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989.
3. Егоров А. Г. Стабилизация пламени псевдожидкого топлива в камере сгорания с внезапным расширением: Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1993.
4. Ягодников Д. А. Организация процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов в камерах сгорания реактивных двигательных установок. Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГТУ, 1998.
5. Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин Н. С. Организация воспламенения и горения металлических порошков в потоке активных газов // Российская межвузовская и межотраслевая науч.-техн. конф. «Ракетно-космические двигательные установки»: Тез.

- выступлений. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. С. 29.
6. **Шевчук В. Г., Кондратьев Е. М., Золотко А. Г., Смирнов В. В.** О режимах распространения пламени в аэровзвесах металлических частиц // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 5. С. 70–76.
  7. **Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин И. С.** Воспламенение и горение аэровзвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 5. С. 41–51.
  8. **Ягодников Д. А., Сухов А. В., Малинин В. И., Кирьяков И. М.** Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащенным металловоздушным смесям // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. 1990. № 1. С. 121–124.
  9. **Ягодников Д. А., Воронецкий А. В., Лапицкий В. И.** Распространение пламени по аэровзвеси алюминия при пониженных давлениях // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 23–31.
  10. **Егоров А. Г., Кальней Е. Д., Шайкин А. П.** Стабилизация пламени порошкообразного металлического горючего в турбулентном потоке воздуха // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 5. С. 28–35.
  11. **Алемасов В. Е., Глебов Г. А., Козлов А. П. и др.** Термоанемометрические методы исследования отрывных течений. Казань: Казан. филиал АН СССР, 1989.
  12. **Мингазов Б. Г., Низамутдинов Р. М.** Влияние конструктивных параметров на температурную неравномерность кольцевой камеры сгорания ГТД // Тезисы докл. IV Всероссийской науч.-техн. конф. «Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей». Самара: Самар. гос. аэрокосмич. ун-т им. акад. С. П. Королева, 2002. С. 109–117.
  13. **Хама Д., Оцука Е.** Стабилизация пламени с помощью стабилизатора с осесимметричной выемкой // Нихон кикай гакай ромбунсю. 1979. Т. В45, № 399. С. 1773–1777.
  14. **Токарев В. В., Шайкин А. П.** О влиянии турбулентности на процесс стабилизации диффузионного пламени // Изв. вузов. Авиационная техника. 1974. № 2. С. 124–125.
  15. **Sriramulu V.** Effect of pulsations on flame stabilization // Gas Warne Intern. 1977. V. 26, N 12. P. 600–602.
  16. **El-Banhawy Y., Sivasegaram S., Whitelaw J. H.** Premixed turbulent combustion of a sudden-expansions flow // Combust. Flame. 1983. Т. 50, N 2. P. 153–165.

*Поступила в редакцию 23/VII 2002 г.,  
в окончательном варианте — 24/XII 2003 г.*