

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ ПСЕВДОЖИДКОГО ТОПЛИВА

© 2002 А. Г. Егоров, Э. Э. Маркаров, Д. А. Павлов, А. И. Сафронов

Тольяттинский государственный университет

Разработан газодинамический метод управления процессами горения и стабилизации пламени в потоке псевдожидкого топлива, основанный на наложении псевдотурбулентных пульсаций на дискретные струи воздуха, вдуваемые в слой смешения основного топливовоздушного потока. Показано, что, варьируя скоростью и частотой пульсирующих струй воздуха, можно изменять гидродинамику и масштаб структуры течения в камере сгорания и, следовательно, воздействовать на характеристики горения псевдожидкого топлива.

Создание принципиально нового класса двигательных и энергетических установок, в которых порошкообразные металлы являются самостоятельными источниками энергии, связано, прежде всего, с разработкой надежных систем топливоподачи и организацией устойчивого рабочего процесса в камере сгорания. На сегодняшний день рассматриваются два принципиально разных варианта подачи металла в камеру сгорания. Первый – это впрыск в камеру сгорания расплавленного металла, второй – подача металлического порошка в поток воздуха, поступающий в камеру сгорания [1].

Псевдожидкое топливо или его компонент – 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 перспективных двигательных и энергетических установок для летательных аппаратов, в которых предусматривается использование псевдожидкого топлива, необходимо уделять особое внимание процессу смешения порошкообразного горючего с воздухом для достижения максимальной полноты сгорания при ограниченных геометрических параметрах камеры.

В [6] отмечено, что понимание природы турбулентности в слоях смешения, струях, следах и в пристеночных течениях обусловлено обнаружением в указанных течениях так называемых когерентных структур – крупномасштабных периодических вихре-

вых образований, развивающихся на фоне мелкомасштабной турбулентности. Наличие в турбулентных сдвиговых течениях периодических крупномасштабных структур породило надежды на возможность управлять этими структурами путем различного рода периодических воздействий. Периодическое возбуждение струи со сравнительно небольшими амплитудами является эффективным средством направленного изменения аэродинамических характеристик турбулентных струй. Существенно также, что за счет выбора частоты облучения можно либо усиливать, либо ослаблять интенсивность смешения в струях. Самым чувствительным участком струи является слой смешения вблизи кромки сопла при $x/d = 0 \dots 0,5$, поскольку именно здесь периодическое возбуждение генерирует вихри, которые, в конечном счете, определяют ослабление или усиление интенсивности перемешивания в пределах начального участка.

Исследования [7] показали, что метод наложения пульсаций продольной составляющей скорости (псевдотурбулентных пульсаций) является наиболее эффективным для интенсификации процессов массо- и теплообмена.

Отметим публикации [8÷11] теоретического и экспериментального плана по исследованию влияния нестационарных воздействий на слой смешения за внезапным расширением с целью управления процессом горения.

В целом характер и эффективность воздействия колебаний на процесс горения определяется как акустическими факторами,

так и физико-химическими свойствами топлива. Определить эффективность импульсного режима горения можно, лишь учитывая конкретные особенности процесса горения, т. е. вид топлива (газообразное, жидкое, твердое), режим горения (кинетический, диффузионный) и уровень интенсивности колебаний.

Настоящая статья посвящена разработке способа управления характеристиками горения в потоке псевдожидкого топлива посредством вдува в слой смешения нестационарных струй воздуха.

С целью определения влияния дискретных пульсирующих струй воздуха, вдуваемых в слой смешения основного потока, на гидродинамику течения в камере сгорания были проведены испытания.

В результате изотермических испытаний проведено исследование структуры течения в модели камеры сгорания при вдуве в нее стационарных и нестационарных турбулентных струй воздуха.

Пульсирующие струи воздуха вдувались с параметром спутности $m = 0 \dots 6$, который определялся отношением U_{cmp}/U_0 , где U_{cmp} – скорость дискретных пульсирующих струй воздуха, U_0 – скорость основного стационарного потока воздуха, поступающего в камеру через входное отверстие d_0 . Число Струхали (Sh) возмущающего воздействия изменялось в диапазоне $0,001 \dots 0,004$ при уровнях воздействия $0,8 \dots 3,1$ % от выходной скорости струи. Число Sh определялось как отношение

$$f \cdot d_{oms} / U_{cmp},$$

где f – частота в Гц; d_{oms} – диаметр отверстий; U_{cmp} – скорость дискретных струй воздуха, вдуваемых в слой смешения основного потока.

В [12] была получена эмпирическая формула для определения частот чистого тона f , при которых канал с внезапным расширением может создавать регулируемое возбуждение круглой струи:

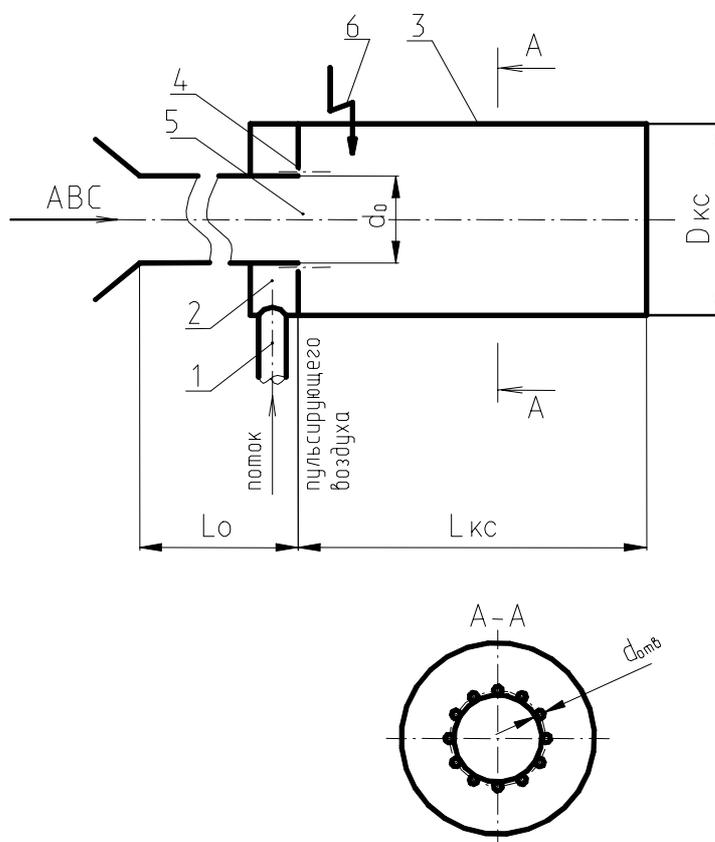


Рис. 1. Схема модели прямоточной камеры сгорания:

1 – магистраль подвода пульсирующего потока воздуха; 2 – кольцевой коллектор; 3 – камера сгорания; 4 – отверстия для подвода пульсирующих струй воздуха; 5 – входное отверстие; 6 – свеча зажигания

$$\frac{f}{a_0 \cdot n} \cdot \left(L_0 + 1,65 \cdot \frac{L_{kc}}{j} + 0,7 \cdot d_0 \right) = 1,$$

где $j = 1, 2, 3, \dots$; $n = 1/2, 1, 3/2, \dots$; a_0 – скорость звука.

Амплитуда возбуждаемых колебаний зависит от геометрических параметров L_0 , L_{kc} , D_{kc} – d_0 скорости истечения U_0 и состояния начального пограничного слоя.

С помощью этой формулы при имеющихся геометрических параметрах модели камеры сгорания была определена частота чистого тона f . Основная частота, при которой возможно было осуществить регулируемое возбуждение струи, составила ~ 200 Гц.

Методом масляной пленки была исследована гидродинамика течения в камере сгорания при вдуве в слой смешения основного потока воздуха дискретных пульсирующих струй с частотой 150 и 400 Гц. Результаты исследования показали, что зона обратных токов за внезапным расширением отсутствует, и вместо нее появилось приосевое рециркуляционное течение.

Было установлено, что приосевое рециркуляционное течение возникает только при $m = 5$. Выявлено, что с изменением частоты пульсирующих струй от 0 до 150 Гц длина приосевой рециркуляционной зоны увеличивается на 20 %, дальнейшее увеличение частоты приводит к уменьшению длины зоны. Увеличение частоты, начиная с 200 Гц, приводит к уменьшению масштаба вихревой структуры потока, а, как известно, мелкомасштабная турбулентность является основным фактором, влияющим на скорость турбулентного распространения пламени.

Испытания с горением производились на экспериментальной установке, которая подробно описана в [13]. Модель прямооточной камеры сгорания (рис. 1) представляла собой осесимметричный канал диаметром $D_{kc} = 0,08$ м с диаметром входного отверстия $d_0 = 0,04$ м и длиной $L_{kc} = 0,185$ м.

В качестве псевдожидкого топлива использовалась алюминиево-воздушная смесь (АВС), в которой горючим являлся алюминиево-магниевый сплав марки АД-50, содержащий 50 % Al и 50 % Mg , а окислителем служил воздух с температурой 288 К.

Локальные температурные условия в ряде случаев, например в зонах воспламенения, догорания топлива и др., являются определяющими. Поэтому измерения температуры по всему объему камеры сгорания производились наиболее полно. В результате обширного цикла испытаний были получены профили температур в поперечных сечениях камеры сгорания, по которым в дальнейшем были построены температурные поля.

Профили температур в поперечных сечениях камеры сгорания без вдува и с вдувом дискретных пульсирующих струй воздуха в слой смешения основного топливовоздушного потока с $f = 150$ Гц представлены на рис. 2. На рис. 3 показано распределение изотерм в камере сгорания для двух вышеуказанных вариантов. Из представленных рисунков видно, что в случае вдува пульсирующих струй воздуха в слой смешения основного топливовоздушного потока процесс горения интенсифицируется, поскольку температура повышается, линии изотерм с максимальной температурой перемещаются от стенки камеры к оси. Существенно уменьшается неравномерность температурного поля.

Для определения влияния частоты нестационарных воздействий на процесс горения псевдожидкого топлива были измерены профили температур в выходном сечении камеры сгорания при вдуве в слой смешения топливовоздушного потока пульсирующих струй воздуха с разной частотой.

На рис. 4 представлены профили температур в выходном сечении камеры сгорания ($x/d_0 = 4,3$). С увеличением частоты нестационарных воздействий, накладываемых на дискретные струи воздуха, с 0 до 300 Гц происходит интенсификация процесса горения и наблюдается рост максимального значения температуры. Этот факт объясняется тем, что с ростом частоты от 0 до 300 Гц число Струхала увеличивается с 0 до 0,24. Низкочастотные возмущения ($Sh = 0,2 \dots 0,6$) модулируют исходные (естественные) высокочастотные возмущения в слое смешения вблизи сопла, что, в конечном счете, приводит к более раннему образованию когерентных структур и их последующему более ин-

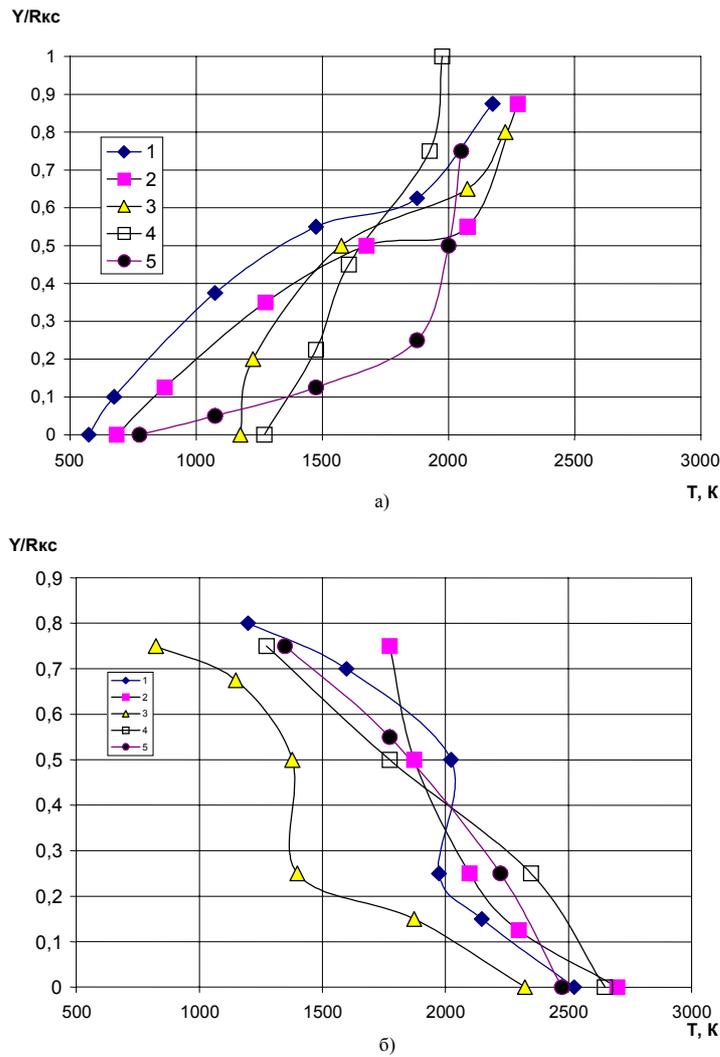


Рис. 2. Профили температур в поперечных сечениях камеры сгорания (горючее АД-50, $\alpha = 0,65$):
 1 – $x/d_0 = 0,8$; 2 – $x/d_0 = 1,5$; 3 – $x/d_0 = 2,3$; 4 – $x/d_0 = 3,3$; 5 – $x/d_0 = 4,5$;
 а) без вдува; б) с вдувом дискретных пульсирующих струй воздуха с $f = 150 Гц$

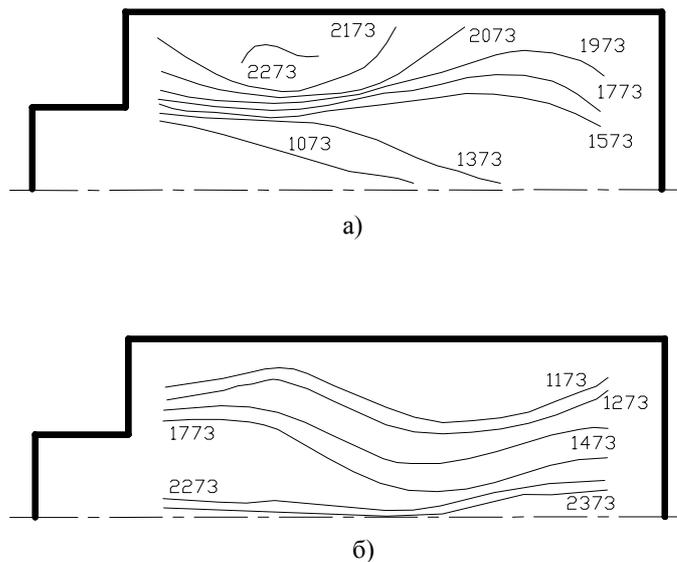


Рис. 3. Температурные поля в прямоточной камере сгорания
 а) без вдува дискретных пульсирующих струй воздуха;
 б) с вдувом дискретных пульсирующих струй воздуха с $f = 150 Гц$

тенсивному по сравнению с невозбужденной струей роста [14].

Из рисунка также видно, что дальнейшее увеличение частоты до 500 Гц ведет к снижению температуры и выравниванию профиля. Это обусловлено тем, что процесс теплоотвода от зоны горения начинает превалировать над процессом интенсификации горения за счет улучшения массообмена. Пламя «задувается», акустические колебания выравнивают температурное поле в камере, вследствие чего ядро горения охлаждается, а теплоотдача на стенки камеры увеличивается.

С целью определения влияния частоты пульсирующих струй воздуха, вдуваемых в слой смешения, на устойчивость горения псевдожидкого топлива были проведены испытания в области «бедного» срыва.

Влияние частоты пульсирующих струй воздуха на горение псевдожидкого топлива на границе «бедного» срыва показано на рис. 5.

Из рисунка видно, что с увеличением частоты α уменьшается, достигая своего минимума при $f = 250 \dots 450$ Гц, а при дальнейшем увеличении частоты происходит рост α . Следовательно, при вдуве пульсирующих

струй воздуха в зону рециркуляции с $f = 250 \dots 450$ Гц значения α смещаются в область «богатых» смесей. Это обогащение сопровождается увеличением скорости горения, о чем говорят данные, представленные на рис. 4. Из них видно, что профили с максимальными значениями температур в слое смешения соответствуют указанному диапазону частот. Дальнейшее увеличение частоты до 500 Гц сдвигает значения α в область «бедных» смесей, что ведет к снижению скорости горения, о чем свидетельствуют выравнивание профиля и уменьшение температуры в слое смешения.

Полученные данные по устойчивости горения псевдожидкого топлива на границе «бедного» срыва показали, что с помощью частоты нестационарных воздействий можно управлять составом алюминиево-воздушной смеси.

Актуальной задачей для любого типа стабилизатора является расширение за ним зоны горения и снижение гидравлических потерь в камере сгорания. Поэтому результаты испытаний по устойчивости горения, полученные в настоящей работе, можно использовать для разработки систем стабилизации пламени псевдожидкого топлива на спутных

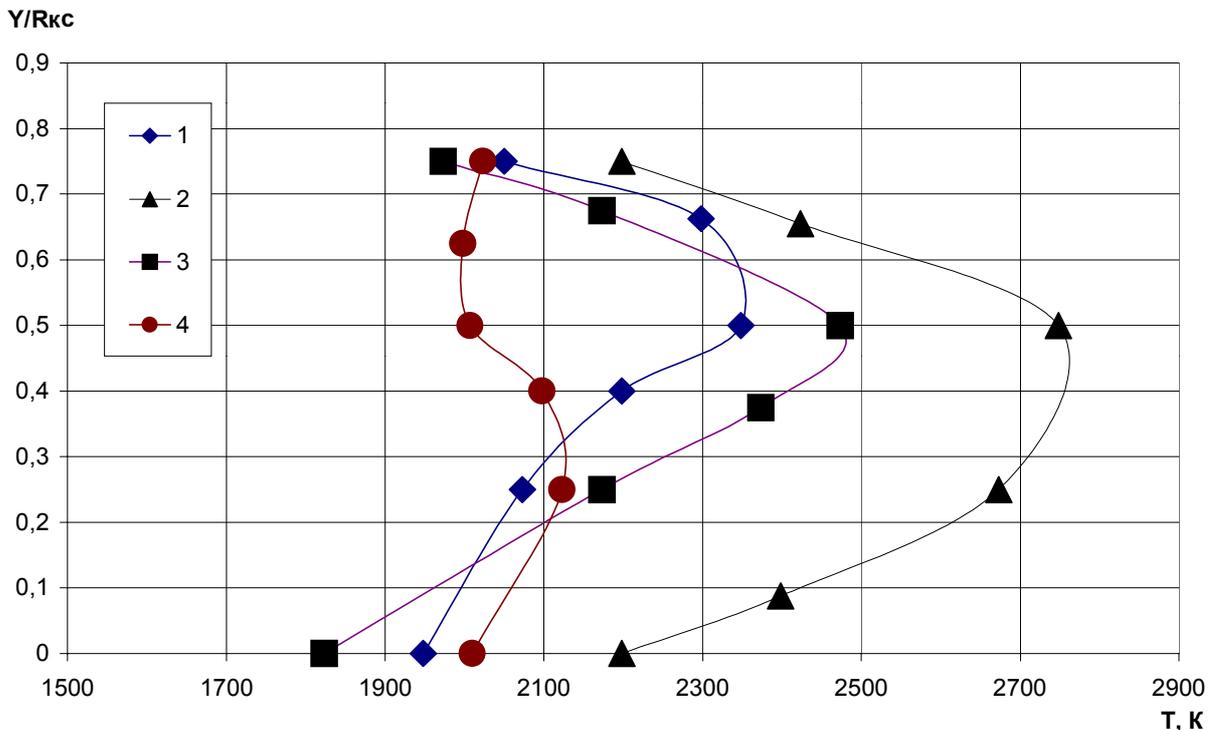


Рис. 4. Профили температур в выходном сечении камеры сгорания при $x/d_0 = 4,3$
 1 – $f = 0$ Гц; 2 – $f = 300$ Гц; 3 – $f = 400$ Гц; 4 – $f = 500$ Гц

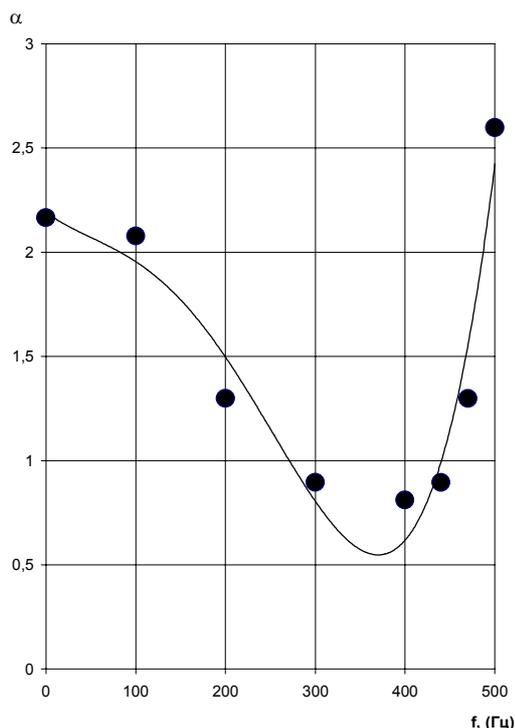


Рис. 5. Влияние частоты дискретных пульсирующих струй воздуха на «бедный» срыв

струях с целью снижения гидравлических потерь в прямооточной камере сгорания. Таким образом, полученные в настоящей работе экспериментальные данные показали, что посредством вдува дискретных пульсирующих струй воздуха в слой смешения основного топливоздушного потока можно управлять гидродинамикой течения в камере и интенсифицировать процесс горения псевдожидкого топлива. Полученное приосевое рециркуляционное течение позволяет сместить ядро горения к оси камеры и, следовательно, уменьшить теплоотвод в стенки. Наряду с увеличением поверхности фронта пламени второй характеристикой, влияющей на процесс интенсификации горения псевдожидкого топлива, является частота нестационарных воздействий, накладываемых на дискретные струи воздуха. Варьируя частотой псевдотурбулентных пульсаций, можно воздействовать не только на масштаб структуры течения в камере и геометрические параметры приосевого рециркуляционного течения, но также и на состав АВС. На разработанный способ управления процессом горения псевдожидкого топлива и устройство для его осуществления получено авторское свидетельство (А.С. № 1626779).

Список литературы

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: 05.07.05. Казань, 1993. - 150 с.
4. Ягодников Д. А. Организация процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов в камерах сгорания реактивных двигательных установок. Дис. д-ра. техн. наук: 05.07.05. Москва, МГТУ, 1998. - 236 с.
5. Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин Н. С. // Российская межвузовская и межотраслевая научно-техническая конференция «Ракетно-космические двигательные установки». // Тезисы докл. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. С. 29.
6. Власов Е. В., Гиневский А. С. Когерентные структуры в турбулентных струях и следах. // Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа. 1986. Т. 20. С. 3-84.

7. Parikh P. G., and Moffat P. S. Resonant Entrainment of a Confined Pulsed Jet.// American Society of Mechanical Engineers Transactions of ASME. 1982. 104. № 4. P. 482-488.
8. Schadow R. C., Gutmark E., Parr T. P., Parr D. M., Wilson K. J., Ferrel G. B. Enhancement of Fine-scale Mixing for Fuel-rich Plume Combustion. // AIAA Pap. 1987. № 376. P. 1-6.
9. Scott J. N., Hankey W. L. Numerical Simulation of Excited Jet Mixing Layers. // AIAA Pap. 1987. № 16. P. 1-10.
10. Yu K., Lee S., Trounev A., Stewart H., Daily J. Vortex-nozzle Interactions in Ramjet Combustors. // AIAA Pap. 1987. № 1871. P. 1-199.
11. Schadow K., Wilson K., Parr D., Gutmark E. Mixing Characteristics of a Deflected, Elliptical Jet with Dump.// AIAA Pap. 1986. № 1399. P. 7.
12. Hasan M. A. Z., Hussain A. K. M. A Formula for Resonance Frequencies of Whistler Nozzle. // J. Acoust. Soc. Amer. 1979. 65. № 5. P. 1140-1142.
13. 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.
14. Власов Е. В., Гиневский А. С. Когерентные структуры в турбулентных струях и следах.// Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа. 1986. Т. 20. С. 3-84.

METHOD OF CONTROLLING BURNING PROCESSES IN A PSEUDO-LIQUID FUEL FLOW

© 2002 A. G. Yegorov, E. E. Markarov, D. A. Pavlov, A. I. Safronov

Togliatti State University

Method of controlling burning and flame stabilization processes in a pseudo-liquid fuel flow has been developed. The method is based on imposing pseudoturbulent pulsations on discrete air jets injected into the mixing layer of the main fuel-air flow. By varying speed and frequency of pulsating jets it is possible to change the hydrodynamics and scale of flow structure in the chamber and, consequently, to influence the pseudo-liquid fuel burning characteristics.