

А. Г. Егоров,
Д. М. Гаглоев,
А. С. Тизиров

Тольяттинский государственный
университет.
445667, Россия, Самарская область,
Тольятти, ул. Белорусская, 14.
eag@tltsu.ru

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГОРЕНИЕ ПСЕВДОЖИДКОГО ТОПЛИВА

Разработан метод управления процессом горения в потоке псевдожидкого топлива, основанный на вдуве нестационарных струй воздуха в слой смешения основного потока с зоной рециркуляции. Показано, что, варьируя частотой пульсирующих струй воздуха, можно управлять характеристиками горения в потоке псевдожидкого топлива.

Ключевые слова: турбулентные пульсации; продольные пульсации струй воздуха; частота пульсаций; температурное поле; управление характеристиками горения

Введение

Одной из важнейших задач, связанных с разработкой двигательных, энергетических установок на псевдожидком топливе, является создание эффективного рабочего процесса в камере сгорания [1].

В условиях, когда область горения ограничена размерами камеры сгорания для повышения эффективности процесса горения, необходимо увеличение интенсивности процесса смешения порошкообразного металлического горючего с воздухом.

С этой целью для интенсификации процесса смешения был выбран канал с внезапным расширением, который является усилителем автоколебаний в струе [2] и благодаря которому можно возбудить колебания скорости до 15% в выходном сечении канала. Данные колебания возникают при взаимодействии двух независимых резонансных механизмов, а именно, характерного тона сдвигового слоя, вызванного нестационарным отрывным течением, и резонанса подводящей трубы.

В турбулентных сдвиговых течениях возникают большие когерентные структуры - крупномасштабные периодические вихревые образования, развивающиеся на фоне мелкомасштабной турбулентности [2]. Известно [3], что в канале с внезапным расширением они появляются как в реагирующих, так и не реагирующих потоках и имеют дискретные частоты 250...450 Гц. Их наличие даёт возможность управлять ими при помощи всякого рода

периодических воздействий, тем самым влияя на процесс горения смеси.

Самым чувствительным участком струи является слой смешения вблизи кромки сопла $x/d_0 = 0...0,5$, так как здесь периодические возбуждения генерируют вихри, которые в конечном счёте определяют ослабление или усиление интенсивности перемешивания в пределах начального участка. За счёт частоты воздействий можно либо усиливать, либо ослаблять интенсивность процесса смешения в струе.

Метод наложения пульсаций продольной составляющей скорости (псевдотурбулентных пульсаций) эффективно интенсифицирует процессы массо- и теплообмена [4]. Данный метод позволяет не только ускорять процесс развития струи, но и также замедлять, уменьшая поперечную диффузию, что делает его более универсальным по сравнению с другими методами нестационарного воздействия и наиболее перспективным для достижения практических целей.

Данная статья посвящена разработке метода управления процессом горения псевдожидкого топлива посредством вдува нестационарных струй воздуха в слой смешения основного потока с зоной рециркуляции.

Экспериментальная модель и методика проведения испытаний

Для достижения поставленной задачи была создана экспериментальная установка, которая описана в работе [5]. Модель прямоточной камеры сгорания (рисунок 1)

представляла собой осесимметричный канал длиной $L_{KC} = 0,245$ м и диаметром $D_{KC} = 0,08$ м с диаметром входного отверстия $d_0 = 0,04$ м и $d_{омб} = 0,0025$ м.

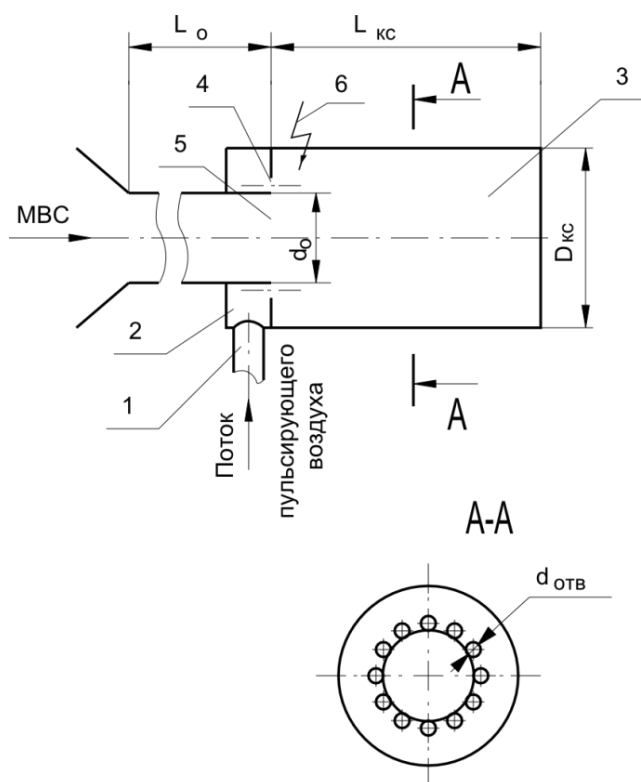


Рисунок 1. Схема модели проточной камеры сгорания: 1- магистраль для подвода потока пульсирующего воздуха; 2- кольцевой коллектор; 3- камера сгорания; 4- отверстия для подвода пульсирующих струй воздуха; 5- входное отверстие; 6- свеча зажигания

Псевдотурбулентные пульсации создавались при помощи ротора, в котором было сделано восемь отверстий диаметром 0,01 м. Он был соединён с валом электродвигателя, скорость вращения которого контролировалась автотрансформатором, что позволяло создавать пульсации с частотой 40...700 Гц. Измерения скорости вращения ротора проводились при помощи магнитно-индукционного датчика, сигнал которого выводился на цифровой тахометр ТЦ-5. Пульсирующая струя воздуха из ротора поступала по магистрали 1 в кольцевой коллектор 2. После чего через двенадцать отверстий 4, равномерно расположенных вокруг входного отверстия 5, пульсирующие струи воздуха вдувались в камеру сгорания 3.

В качестве псевдожидкого топлива использовалась металловоздушная смесь (МВС), в которой порошкообразным металлическим горючим был алюминий-магний-сплав марки АМД-50, содержащий 50% Al и 50% Mg. Топливо подавалось в камеру сгорания через входное отверстие 5. Турбулентный поток псевдожидкого топлива зажигали при помощи электрической свечи 6.

В испытаниях использовались термопары ИС-629 с рабочим диапазоном температур 573...2773 К и толщиной спая 0,2 мм. С их помощью измерялись температуры продуктов сгорания и наружная стенка камеры. Термопары располагались по длине камеры сгорания в сечениях $x/d_0 = 0,8; 1,5; 2,3; 3,3; 4,3$ и на выходе из камеры ($x/d_0 = 6,0$) и при глубине погружения $y/R_{KC} = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$. Относительная погрешность измерения температуры составляла ~5%.

Дискретные пульсирующие струи воздуха вдувались с параметром спутности $m = 0...6$, который определялся отношением $U_{СТР}/U_0$, где U_0 - скорость основного потока воздуха, поступающего через входное отверстие d_0 ; $U_{СТР}$ - скорость пульсирующих струй воздуха. Число Струхала Sh возмущающего воздействия изменялось в диапазоне 0,001...0,004 при уровнях воздействия 0,8...3,1 % от входной скорости струи. Число Sh определялось как отношение $f d_{омб}/U_{СТР}$, где f - частота в Гц; $d_{омб}$ - диаметр отверстий для пульсирующих струй воздуха.

На начальном этапе испытаний устанавливались заданная скорость основного потока U_0 и частота пульсирующих струй воздуха f , затем путём уменьшения или увеличения давления в коллекторе менялась их скорость вдува ($\lambda = 1$ или $\lambda < 1$), варьируя параметр спутности m . После чего при том же значении скорости основного воздуха на входе устанавливалась другая частота пульсирующих струй воздуха, и вновь производилось варьирование параметра m . Затем эксперимент продолжался при других

значения скорости воздуха на входе в камеру сгорания U_0 , частоте вдува пульсирующих струй воздуха f и параметре спутности m .

Результаты исследования

Для визуализации течений изотермических потоков воздуха использовался метод масляной плёнки [6].

На рисунке 2 показана квазистационарная картина течения в камере сгорания без вдува и с вдувом пульсирующих струй воздуха с частотой $f = 150$ Гц.

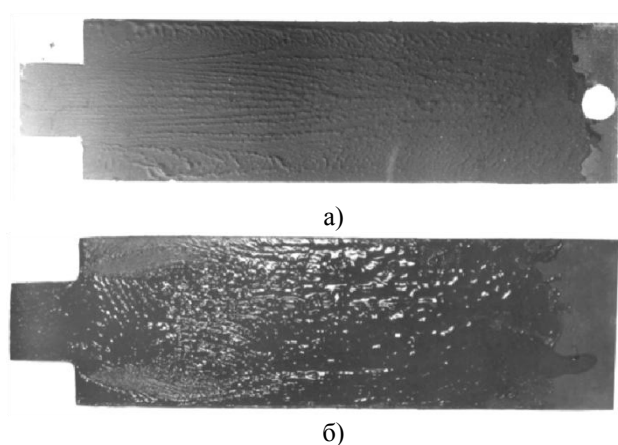


Рисунок 2. Картина течений в камере сгорания: а- без вдува; б- с вдувом пульсирующих струй воздуха с частотой $f=150$ Гц

На рисунке видно, что с вдувом пульсирующих струй воздуха зона обратных токов за внезапным расширением исчезает, а вместо неё появляется центральная тороидальная рециркуляционная зона (ЦТРЗ).

В ходе проведения испытаний выяснилось, что ЦТРЗ появляется только при вдуве пульсирующих струй воздуха с параметром спутности $m \geq 4,5$. Данные по визуализации течения показали, что длина ЦТРЗ увеличивается с 60 до 95 мм при изменении частоты дискретных струй от 0 до 150 Гц, но дальнейшее увеличение частоты до 400 Гц уменьшает длину зоны до 65 мм.

Установлено, что увеличение частоты, начиная с 200 Гц, приводит к уменьшению масштаба вихревой структуры потока. Известно [6], что интенсификацию горения обогащённых смесей и стабилизацию фронта пламени можно достичь за счёт управления мелкомасштабным турбулентным смешением посредством изменения частоты вдуваемых струй воздуха в пограничном слое металловоздушной струи.

В испытаниях с горением исследовалось влияние дискретных струй воздуха, вдуваемых в слой смешения за внезапным расширением, и частоты псевдотурбулентных пульсаций, накладываемых на них, на температуру, пределы стабилизации в потоке металловоздушной смеси, а также удельную тягу.

Состав металловоздушной смеси при определении температурных полей как без вдува, так и с вдувом пульсирующих струй воздуха поддерживался одинаковым ($\alpha = 0,37$). В результате проведённых испытаний были получены поля температур (рисунок 3).

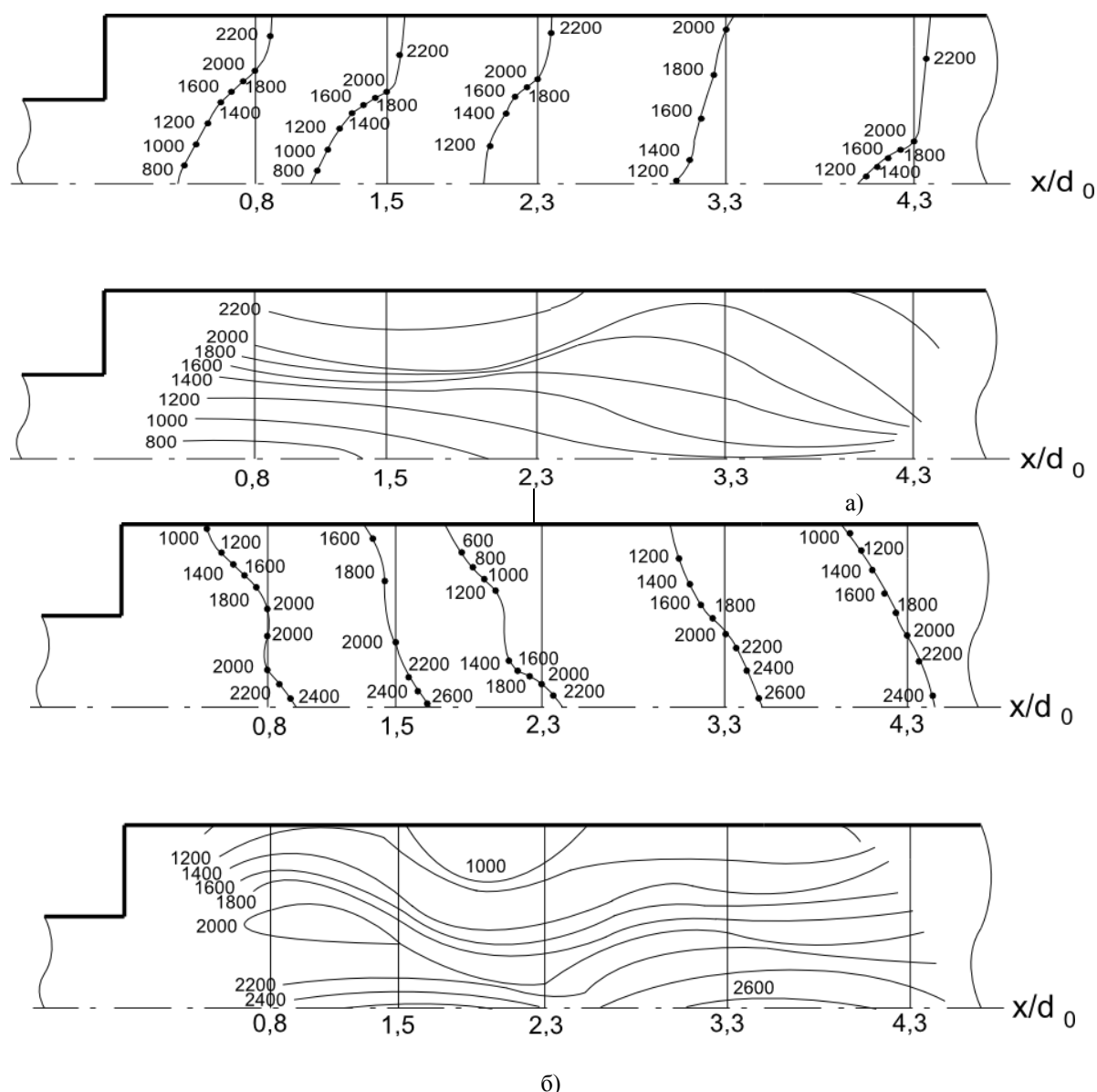


Рисунок 3. Температурные поля и изотермы в камере сгорания: а- без вдува; б- с вдувом струй воздуха с $f=150$ Гц

Как видно из рисунка, при вдуве пульсирующих струй воздуха в слой смешения за внезапным расширением процесс горения интенсифицируется, и температура в камере повышается, причём максимальное значение сместилось от стенки к оси камеры, что уменьшает температурную нагрузку на стенки, увеличивая ресурс камеры сгорания.

По результатам термометрирования наружной поверхности стенки ядро горения сместилось от среза камеры к плоскости внезапного расширения, так как в варианте без вдува участок с максимальным

значением температуры наружной поверхности стенки камеры $T_{ст} = 650$ К располагался на расстоянии $x/d_0 = 2,7...4,0$, а в варианте с вдувом пульсирующих струй воздуха участок с $T_{ст} = 850$ К был зафиксирован при $x/d_0 = 1,5...3,0$.

Для определения влияния вдува стационарных струй воздуха и частоты псевдотурбулентных пульсаций на профиль температур на срезе камеры сгорания были проведены отдельные испытания. В них также как без вдува, так и с вдувом пульсирующих струй воздуха состав смеси

поддерживался одинаковым ($\alpha \approx 0,23$). На рисунке 4 представлены результаты испытаний.

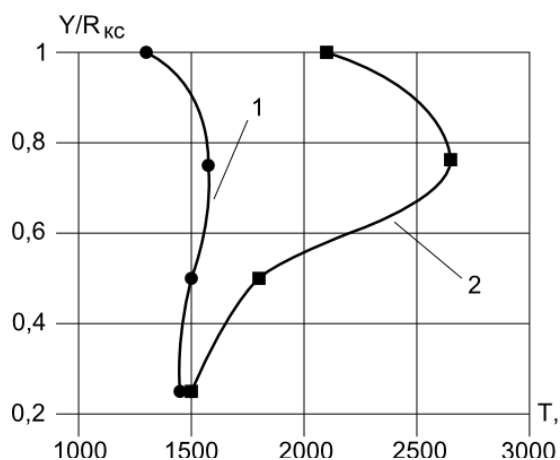


Рисунок 4. Профиль температур на срезе камеры сгорания: 1- без вдува; 2- с вдувом струй воздуха с $f=150$ Гц

Рисунок показывает, что в варианте с вдувом пульсирующих струй воздуха профиль температуры «вытянут» в области вдува, и уровень температуры увеличился. Это явление вызвано увеличением скорости горения псевдожидкого топлива, что в свою очередь связано с изменением гидродинамики течения в камере сгорания и интенсификацией процессов массо- и теплообмена.

Для определения влияния частоты псевдотурбулентных пульсаций на процесс горения были измерены профили температур в выходном сечении камеры сгорания при вдуве пульсирующих струй воздуха в слой смешения с различной частотой.

На рисунке 5 изображены профили температур на срезе камеры сгорания при вдуве стационарных $f=0$ и пульсирующих струй воздуха $f=400$ Гц при одинаковом составе смеси $\alpha = 0,4$.

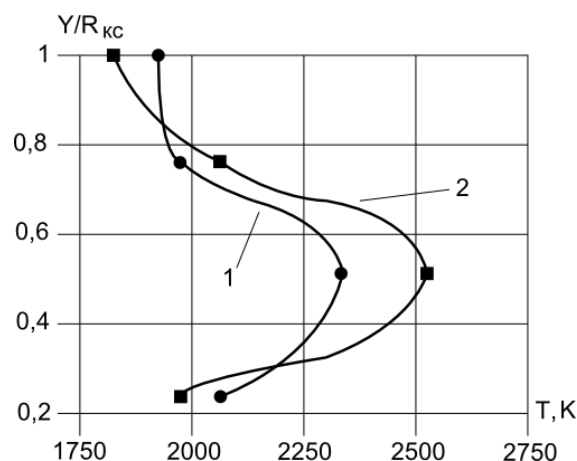


Рисунок 5. Влияние частоты вдуваемых струй воздуха на профиль температур в выходном сечении камеры сгорания: 1- $f=0$ Гц; 2- $f=400$ Гц

Рисунок показывает, что в варианте с вдувом пульсирующих струй воздуха с $f=400$ Гц профиль температур более «вытянут» в месте максимального значения температуры. Это связано с ростом частоты от 0 до 400 Гц, из-за чего число Sh увеличивается с 0 до 0,26. Низкочастотные колебания ($Sh=0,2...0,6$) модулируют естественные высокочастотные колебания в слое смешения у выходного отверстия камеры, что приводит к более раннему образованию когерентных структур и их более интенсивному росту по сравнению с невозбуждённым потоком [1].

Испытания с частотами 50, 150, 500 Гц при постоянном значении $\alpha = 0,35$ показали, что увеличение частоты пульсирующих струй воздуха до 500 Гц приводит к снижению температуры и выравниванию профиля на срезе камеры сгорания. Объясняется это превалированием процесса теплоотвода от зоны горения над процессом интенсификации горения за счёт улучшения массообмена. Вследствие чего пламя «задувается», акустические колебания выравнивают профиль температур в камере, охлаждая ядро горения, а тепловая нагрузка на стенки камеры увеличиваются.

Выравнивание профиля температур при $f=500$ Гц по сравнению с профилями при $f=50$ и 150 Гц объясняется влиянием частоты дискретных струй воздуха, вдуваемых в слой смешения за внезапным расширением. Таким образом, можно управлять профилем

температуры в выходном сечении камеры, не изменяя её конструкцию [7].

Одним из важнейших параметров, который даёт возможность судить о степени совершенства рабочего процесса и эффективности применяемого топлива, является удельная тяга. Проводились её измерения для определения влияния частоты нестационарных воздействий на процесс сгорания псевдожидкого топлива.

На рисунке 6 показана зависимость удельной тяги от частоты пульсирующих струй воздуха.

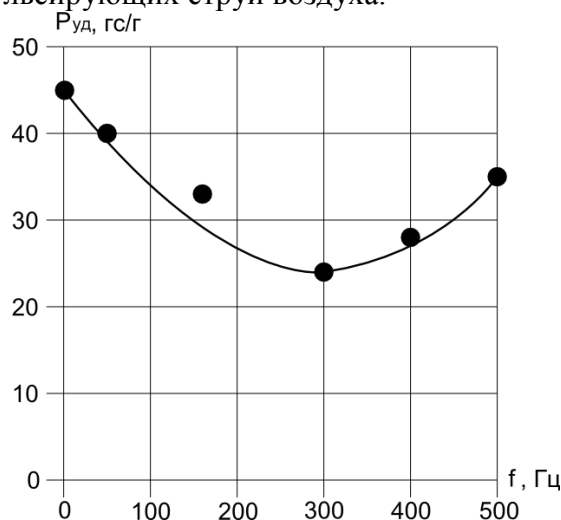


Рисунок 6. Влияние частоты струй воздуха на удельную тягу

С увеличением частоты от 0 до 300 Гц значение удельной тяги падает, а затем, с дальнейшим ростом частоты, растёт. Данное явление можно объяснить совпадением частоты вдува пульсирующих струй воздуха с дискретной частотой больших когерентных структур ($f=250...450$ Гц), которые возникают в каналах с внезапным расширением.

Таким образом получен способ управления удельной тягой, основанный на варьировании частоты пульсирующих струй воздуха, вдуваемых с слой смешения за внезапным расширением.

Результаты испытаний по определению влияния частоты пульсирующих струй воздуха на устойчивость горения алюминиево-воздушной смеси показаны на рисунке 7, где на оси абсцисс отложена частота f , а на оси ординат - значение коэффициента избытка воздуха α , при которых происходил срыв пламени.

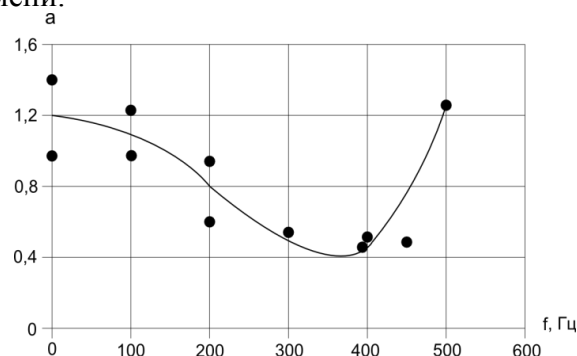


Рисунок 7. Влияние частоты струй воздуха на пределы горения МВС

Из рисунка видно, что с увеличением частоты α уменьшается, достигая своего минимума при $f=250...450$ Гц, т. е. смещается в область «богатых» смесей, что сужает границы срыва пламени. С дальнейшим увеличением частоты до 500 Гц α возрастает, и соответственно расширяются границы устойчивого горения. Ухудшение стабилизации при вдуве пульсирующих струй воздуха с $f=250...450$ Гц происходит, потому что уменьшается ЦТРЗ, и вследствие этого уменьшается и время контакта частиц алюминия с высокотемпературными продуктами горения зоны обратных токов. Также происходит снижение температуры в зоне воспламенения, из-за совпадения частоты вдува пульсирующих струй воздуха с дискретной частотой когерентных структур ($f=250...450$ Гц), возникающих в каналах с внезапным расширением [3].

Заключение

В результате проведённых исследований разработан метод управления процессом горения псевдожидкого топлива, основанный на вдуве нестационарных дискретных струй воздуха в слой смешения основного потока с

зоной рециркуляции. Экспериментально установлено, что варьируя частотой пульсирующих струй воздуха, можно управлять характеристиками горения в потоке псевдожидкого топлива.

Список использованных источников

[1] Алемасов В. Е., Дрегаллин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. Москва: Машиностроение, 1989.

[2] 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.

[3] El-Banhawy, Y., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J. H. (1983), Premixed turbulent Combustion of a Sudden- expansions flow // Combustion and Flame, vol. 50. no 2. pp. 153-165.

[4] Parikh, P. G. and Moffat, P. S. (1982), Resonant Entrainment of a Confined Pulsed Jet. // American Society of Mechanical Engineers Transactions of ASME, vol. 104. no 4. pp. 482-488.

[5] Егоров А. Г. Горение дисперсного алюминия в потоке воздуха: монография. — Самара: Самарский науч. Центр РАН, 2008. 305 с.

[6] Scott, J. N. and Hankey, W. L. (1987), Numerical simulation of excited jet mixing layers. // AIAA Pap., no 16. pp. 1-10.

[7] Мингазов Б. Г., Низамутдинов Р. М. Влияние конструктивных параметров на температурную неравномерность кольцевой камеры сгорания ГТД // Тезисы докладов IV Всероссийской науч.-техн. “Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей”. Самара: Изд-во Самарск. гос. аэрокос. ун-та, 2002. С. 109-117.

**A. G. Egorov, ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
D. M. Gagloev, НА ГОРЕНИЕ ПСЕВДОЖИДКОГО ТОПЛИВА
A. S. Tizilov**

Togliatti State University.
14, Belorusskaya street, Togliatti,
445667, Russian Federation
eag@tltsu.ru

Developed method of controlling the combustion process in the flow of fluidization fuel based on the injection of non-stationary jets of air into the mixing layer of the main flow to the recirculation zone. It is shown that by varying the frequency and the rate of injection of pulsating jets of air, you can control the characteristics of the combustion fuel in a stream of fluidization.

Keywords: *turbulent fluctuations; longitudinal ripple of air jets: the frequency of pulsations; temperature field; management characteristics of combustion*

References

- [1] Alemasov, V. E., Dregalin, A. F. and Tishin, A. P. (1989), *Teoriia raketnykh dvigatelei* [The theory of rocket engines], Mashinostroenie, Moscow, pp. 464. (in Russian).
- [2] Vlasov, E. V. and Ginevsky, A. S. (1986), *Kogerentnye struktury v turbulentnykh struiakh i sledakh* [Coherent structures in turbulent jets and tracks] // *Itogi nauki i tekhniki*. [The results of science and technology]. Ser. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics], vol. 20, pp. 3-84.
- [3] El-Banhawy, Y., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J. H. (1983), Premixed turbulent Combustion of a Sudden-expansions flow // *Combustion and Flame*, vol. 50, № 2, pp. 153-165.
- [4] Parikh, P. G., and Moffat, P. S. (1982), Resonant Entrainment of a Confined Pulsed Jet // *American Society of Mechanical Engineers Transactions of ASME*, vol. 104, № 4, pp. 482-488.
- [5] Egorov, A. G. (2008), Combustion of dispersed aluminum in an air stream [Gorenie dispersnogo aljuminija v potoke vozduha], Samarskij nauchnyj centr RAN, Samara, 305 p.
- [6] Scott, J. N. and Hankey, W. L. (1987), Numerical Simulation of Excited Jet Mixing Layers. // *AIAA Pap*, no. 16, pp. 1-10.
- [7] Mingazov, B. G. and Nizamutdinov, R. M. (2002), Vliianie konstruktivnykh parametrov na temperaturnuiu neravnomernost' kol'tcevoi kamery sgoraniia GTD [Influence of design parameters on the temperature unevenness of annular combustion chamber GTD] // *Abstracts of the IV All-Russian nauch.-tehn. "The processes of combustion, heat transfer and heat engines Ecology"*, Samara, pp. 109-117.