

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ЗОЛОТНИКОВОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПОСТОЯННОГО ОБЪЁМА

© 2011 В. И. Богданов, С. П. Кузнецов

РГАТА им. П. А. Соловьёва, ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск

Создана золотниковая камера сгорания постоянного объёма с высоким уровнем характеристик для перспективных энергодвигательных установок с пульсирующим рабочим процессом. Дан обзор опубликованных основных результатов и новых с рекомендациями для дальнейшего совершенствования камеры. Камера может найти применение в пульсирующих воздушно-реактивных двигателях, в качестве инициатора детонации в детонационных двигателях, в газодинамических лазерах и МГД-генераторах.

Камера сгорания постоянного объёма, инициатор детонации, пульсирующий реактивный двигатель, газодинамический лазер, МГД-генератор.

В настоящее время проявляется повышенный интерес к использованию термодинамически высокоэффективного пульсирующего рабочего процесса в энергодвигательных установках. Для реализации таких процессов может быть использована предлагаемая камера сгорания (КС) постоянного объёма ($V = \text{const}$) с самоприводящимся золотником нового типа [1].

Схема КС $V = \text{const}$ показана на рис. 1.

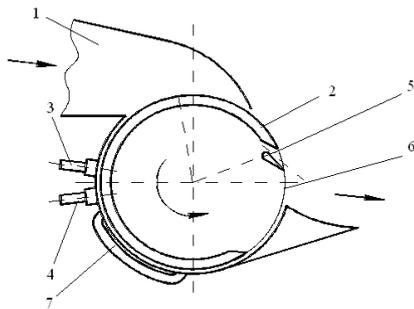


Рис. 1. Схема камеры сгорания $V = \text{const}$ с самоприводящимся золотником

- 1 – входное устройство;
- 2 – золотник;
- 3 – топливная форсунка;
- 4 – воспламенитель;
- 5 – сопло;
- 6 – выходное устройство (сопло с центральным телом);
- 7 – пламеперебрасывающий канал-рессивер

При работе камеры при вращении золотника 2 последовательно происходят следующие процессы:

- наполнение воздухом золотника,
- впрыск топлива,
- воспламенение и сгорание в закрытом объёме ($V = \text{const}$),
- истечение газов и продувка. Часть газов истекает через сопло 5 в золотнике, создавая на нём вращающий момент.

Повышение частоты рабочих пульсаций может быть получено увеличением числа рабочих полостей в золотнике. Для повышения скорости и полноты сгорания возможно применение в корпусе канала для переброса пламени между рабочими полостями золотника.

Расчётно-теоретические исследования [2, 3] показали:

- для объёмов камеры сгорания более 200 см^3 (частота пульсаций – 200 Гц, зазор менее 0,1 % от диаметра) потери давления из-за утечек в лабиринтных уплотнениях между корпусом и золотником составляют менее 5 %;
- максимальная частота рабочих пульсаций f может достигать высокого значения (≈ 200 Гц), что должно значительно улучшить габаритно-массовые характеристики;
- скорость падения температуры вытекающих газов T_g может составлять 106 К/с

(вдвое выше, чем в сопле со стационарным течением);

– благодаря продувке и кратковременному воздействию высокой температуры конструкция может быть работоспособной при максимальной температуре сгорания $T_Z = 2900$ К. При этом потери тепла в воздушную систему охлаждения составят $\approx 5\%$, а температура теплозащитного покрытия – 1400°C ;

– средняя энергетическая скорость истечения газов может достигать значения более 1200 м/с;

– возможность полного расширения высоконапорной нестационарной газовой струи в сопле с центральным телом с приемлемым уровнем потери тяги, вызванной нерасчётностью режима его работы ($\approx 5\%$) [3].

Созданная экспериментальная золотниковая камера сгорания $V = \text{const}$ с объёмом 310 см³ и стенд для её отработки показаны на рис. 2 и 3.

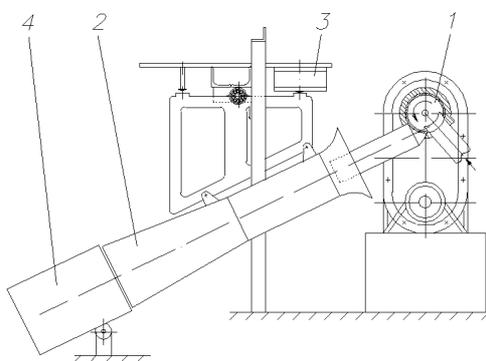


Рис. 2. ПуВРД с эжекторным усилителем тяги

1 – ПуВРД с золотниковой камерой сгорания; 2 – эжекторный канал; 3 – силоизмерительный датчик; 4 – цилиндрический экран

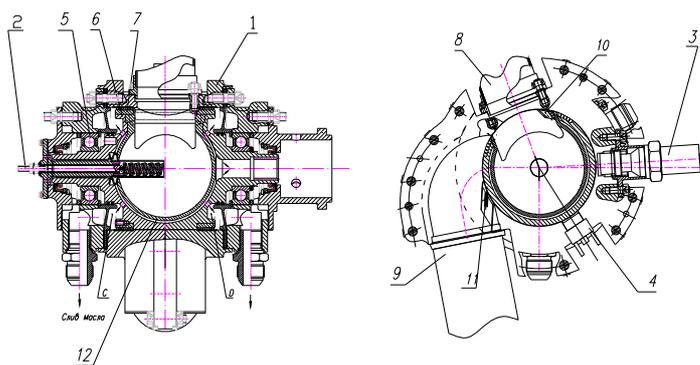


Рис. 3. Экспериментальная камера сгорания $V = \text{const}$

1 – корпус; 2 – свеча зажигания; 3 – топливная форсунка; 4 – датчик давления; 5 – подшипник качения; 6 – ротор-золотник; 7 – лабиринтное уплотнение; 8 – входной патрубок; 9 – выходной патрубок; 10 – сопло в золотнике; 11 – решётка НА; 12 – сферическая жаровая труба

Максимальная рабочая частота пульсаций 100 Гц при экспериментах определялась первоначально возможностями дизельной топливной аппаратуры. Для создания вращающего момента на золотнике в нём устанавливалось сопло 10, а в выходном устройстве – съёмная решётка направляющих аппаратов (НА) 11, обеспечивающих истечение газов в заданном направлении. Воспламенение топливной смеси производилось свечой. В процессе испытаний отрабатывались разные типы свечей зажигания. Система измерения обеспечила замер максимального давления сгорания P_z , расхода воздуха на входе в камеру, частоты вращения золотника.

При испытаниях с дизельной системой подачи топлива [4] была обеспечена работоспособность камеры до уровня рабочих пульсаций в 100 Гц. Получен запуск при малом перепаде давлений на камере $DP = 0,001$ МПа. После проведения конструктивных мероприятий по повышению температуры внутренней поверхности камеры (теплозащитное покрытие ZrO_2 , стабилизаторы пламени) получено самовоспламенение топливовоздушной смеси (при отключённом зажигании) на основных режимах работы. Замеренные максимальные давления сгорания P_z были близки к расчётным для коэффициентов избытка воздуха $\alpha > 1,7$. Получено значение степени повышения давления при сгорании, равное 7.

Проверка герметичности лабиринтных уплотнений между золотником и корпусом показала, что при частотах рабочих пульсаций более 60 Гц падение давления в камере находится в пределах расчётных значений ($\approx 5\%$).

Экспериментальная оценка вращающего момента на золотнике показала, что этот момент может создаваться одной решёткой (НА) в выходном устройстве. Это позволяет сделать вывод о

возможности управления частотой вращения золотника поворотом НА.

Проведены испытания КС $V = \text{const}$ в качестве ПуВРД как с эжекторным усилителем тяги пускового устройства (ЭУТ), так и без него [5]. В варианте без эжекторного усилителя результаты измерений тяги и расчётов её (по внутривыкательным параметрам) при допущении квазистационарности процесса истечения показали, что измеренные значения тяги более чем вдвое (в зависимости от режима работы) превысили расчётные (рис. 4).

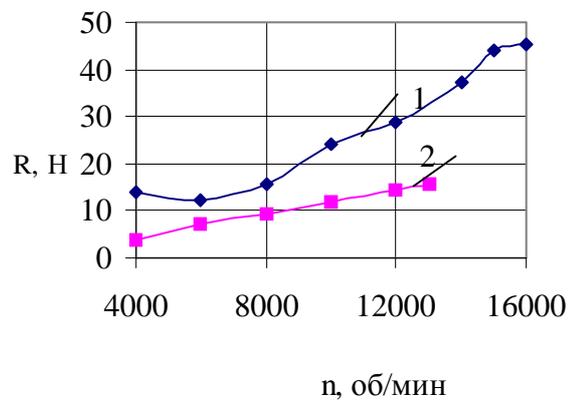


Рис. 4. Зависимость тяги ПуВРД от частоты вращения золотника
1 – эксперимент; 2 – расчёт

Это объясняется тем, что в перерывах между подачами струй пространство за соплом заполняется воздухом из окружающей среды (атмосферы), который при истечении газа становится присоединённой массой, повышающей тягу двигателя.

С эжекторным усилителем тяги получен коэффициент усиления, равный 2,6 [5]. Это позволяет приблизить экономичность ПуВРД к уровню, соответствующему турбореактивному двигателю (ТРД).

Представляет особый интерес изменение параметров в диапазоне частот вращения золотника n от 12000 до 13000 об/мин (рис. 5).

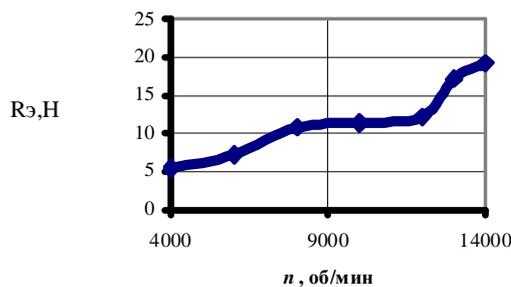


Рис. 5. Зависимость измеренных усилий на эжекторном усилителе тяги от частоты вращения золотника

При изменении n на 8,3 % усилие на эжекторном усилителе тяги ($R_{э,эксп}$) увеличивается на 41 %. При этом резко изменяется поле скоростей на выходе из

ЭУТ (динамического напора $P_э$) (рис. 6) – произошло уменьшение скорости потока в пристеночной области канала.

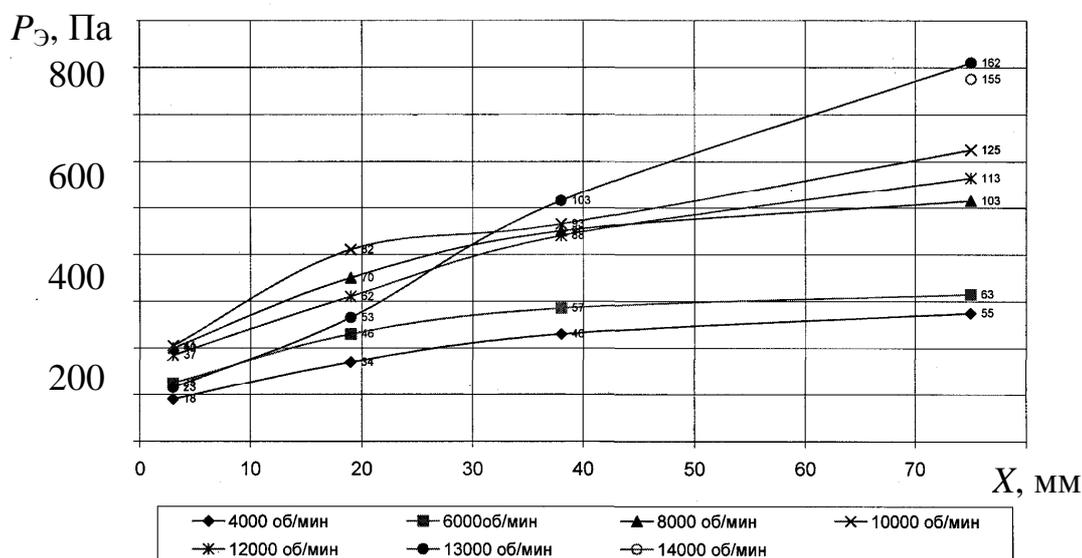


Рис. 6. Распределение измеренного динамического напора по радиусу на выходе из эжекторного канала

Для объяснения этого явления была выполнена расчётная оценка изменения тяги на ЭУТ $R_{э,расч}$ по параметрам потока на его выходе и выполнен анализ экспериментальных и расчётных результатов.

При расчёте тяги приняты следующие условия и допущения:

– статическое давление в потоке на выходе из ЭУТ равнялось атмосферному;

– $R_{э,расч}$ определялась разностью между суммарной тягой R_{Σ} , создаваемой ПуВРД и ЭУТ, и тягой ПуВРД $R_{ПуВРД}$;

– R_{Σ} рассчитывалась по параметрам потока на выходе из эжекторного канала:

$$R_{\Sigma} = \rho \cdot \int F_э \cdot V^2 \cdot dV,$$

где

ρ – плотность потока на выходе из ЭУТ;

$F_э$ – площадь проходного сечения на выходе из ЭУТ;

V – скорость потока на выходе из ЭУТ – рассчитывалась путем аппроксимации экспериментальных данных (распределения скорости по радиусу X выхода эжекторного канала) с помощью полинома второго порядка;

– тяга ПуВРД рассчитывалась при допущении квазистационарности процесса истечения.

Результаты расчёта скорости V представлены на рис. 7, а усилий R_{Σ} , $R_{\text{ПуВРД}}$, $R_{\text{э.расч}}$, $R_{\text{э.эксп}}$ – в табл. 1.

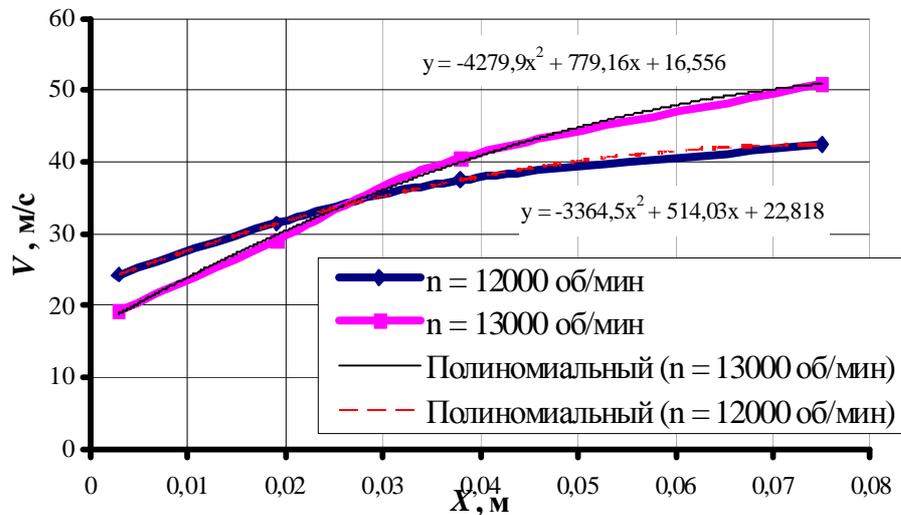


Рис. 7. Распределение скорости истечения V по радиусу X на выходе из эжекторного канала.

Таблица 1. Расчёт усилий

Тяга, Н	n , об/мин	
	12 000	13 000
R_{Σ}	22,95	24,06
$R_{\text{ПуВРД}}$	12,77	13,83
$R_{\text{э.расч}}$	10,18	10,23
$R_{\text{э.эксп}}$	12,14	17,15

Таким образом, по расчётной оценке усилие на эжекторном канале значительно меньше измеренного. Согласно расчётам, при увеличении числа оборотов (n) с 12000 до 13000 об/мин тяга должна возрасти всего на 0,5 %. Однако экспериментальные данные показали, что она возросла на 41 %. Противоречие между расчётными и экспериментальными значениями тяги, особенно при переходе с $n = 12000$ об/мин на $n = 13000$ об/мин, можно объяснить резким изменением поля скоростей в этом диапазоне частот вращения золотника. Резкое уменьшение скорости потока в пристеночной области эжекторного канала можно объяснить его отрывом в диффузорной части канала. Известно, что отрыв пограничного слоя всегда связан с образованием вихрей в результате взаимодействия прямого и

обратного течений, что может происходить в колебательном процессе. В этом процессе и может происходить присоединение массы, повышающей тягу [5], т. е. одна и та же масса воздуха может создавать тягу сначала как активная, а затем как присоединённая. При этом происходит преобразование кинетической энергии (динамического напора) в импульс. Этим объясняется противоречие между измеренной тягой и результатом её расчёта по динамическому напору. Можно предположить, что при $n = 12000$ об/мин имеет место умеренное присоединение массы без отрыва потока, а при $n = 13000$ об/мин – более интенсивное, с его отрывом, возможно, в резонансном колебательном процессе.

Для оценки эффективности пульсирующего эжекторного усилителя тяги в условиях полёта необходимо проведение дополнительных исследований. Учитывая, что реализация рабочей частоты пульсаций 200 Гц потребует решения проблемы создания сложной топливной аппаратуры дизельного типа с давлением более 30 МПа высокочастотного впрыска, была создана простая система непрерывной подачи топлива низкого регулируемого давления 0,4 – 0,8 МПа во входной патрубков (рис. 8).

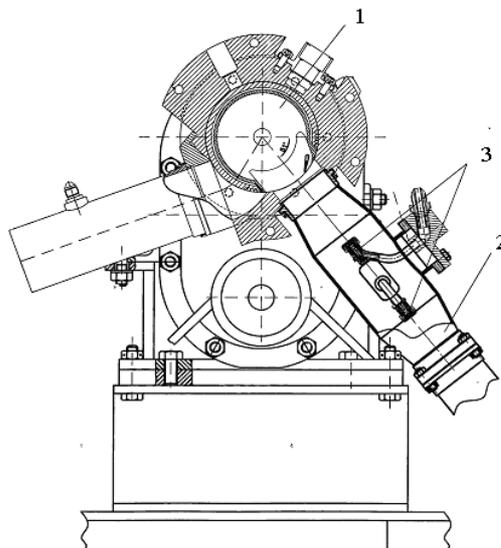


Рис. 8. Камера сгорания $V = \text{const}$ с подачей топлива во входной патрубок
1 – камера сгорания $V = \text{const}$; 2 – входной патрубок; 3 – центробежные топливные форсунки

Данная система с центробежными форсунками от вертолётного двигателя РД-600 обеспечила работоспособность камеры до 190 Гц, и её следует считать перспективной для дешёвых ПуВРД. Одновременно с доработкой системы топливоподачи для уменьшения потерь, особенно волновых, на высоких частотах пульсаций выхлопной патрубков был развёрнут на 60° (рис. 8) в радиальном направлении.

Однако меньшее время пребывания топливовоздушной смеси (ТВС) в камере и худшее качество распыла потребовали повышения эффективности системы зажигания. Для этого свеча накаливания мощностью 200 Вт дорабатывалась следующим образом:

- устанавливались специальные экраны, уменьшающие «захлаживание» нагревательной спирали при продувке;
- спираль помещалась в корпус, наполненный материалом с повышенной теплопроводностью (аналогия традиционного ТЭНа).

Но это не обеспечило надёжного воспламенения ТВС на высокой частоте пульсаций. Кроме того, сразу после запуска спираль могла перегореть от непосредственного воздействия на неё

продуктов сгорания с температурой более 2000 К.

Последующее применение плазменной системы зажигания даже с потребляемой мощностью 50 Вт обеспечило лучший запуск. Это объясняется струйным воздействием плазмы, истекающей из свечи специальной конструкции [6] на сравнительно большой объём ТВС.

По результатам отработки системы зажигания можно сделать следующие выводы:

- отработку рабочего процесса камеры сгорания необходимо проводить с плазменной системой зажигания мощностью ~ 200 Вт с последующим переходом на зажигание от дежурного факела пламени на основных режимах работы;
- для исключения пробоя свеча должна быть изготовлена с использованием сертифицированных изоляционных керамических материалов.

Разработанная камера сгорания $V = \text{const}$ может найти применение:

- в ПуВРД как основная камера сгорания [4, 7];
- в детонационных двигателях в качестве инициатора взрывного сгорания (преддетонатора); взрывное воспламенение может быть обеспечено за счёт инжектирования из КС $V = \text{const}$ реагирующих струй гетероген-

ного топлива в воздух; экспериментально подтверждено [8], что быстрое вовлечение в реакцию большого объема образующейся гетерогенной смеси приводит к взрывному сгоранию, по параметрам близкому к детонационному;

– в МГД-генераторах и газодинамических лазерах [9];

– в специальных энергетических установках для создания сверхвысоких температур [9];

– в приводных ГТД [11 – 14].

Библиографический список

1. Пат. 2196906 РФ, МПК⁷ F02C5/02. Камера сгорания газотурбинного двигателя [Текст] / Богданов В.И., Кузменко М.Л. № 2000117931/06; заявл. 05.07.00; опубл. 20.01.03.

2. Богданов, В. И. Физико - математическая модель рабочих процессов золотниковой камеры сгорания постоянного объема [Текст] / В. И. Богданов, Д. В. Кувтырев // ИФЖ-2003. Т. 16. – № 5. – С.71-75.

3. Богданов, В. И. Профилирование несимметричного сопла при изменяющихся по времени параметрах торможения истекающего газа и размере минимального сечения [Текст] / В. И. Богданов [и др.] // Аэромеханика и газовая динамика. – 2002. № 3. – С. 43-59.

4. Богданов, В. И. КС $V=\text{const}$ с самоприводящимся золотником для новых реактивных технологий [Текст] / В. И. Богданов [и др.] // Тр. междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – Ч. 2. – Самара, 2003. – С. 234-240.

5. Богданов, В. И. Взаимодействие масс в рабочем процессе пульсирующих реактивных двигателей как средство повышения их тяговой эффективности [Текст] / В. И. Богданов // ИФЖ. – 2006. – Т.79. – № 3. – С. 85-90.

6. Михайлов, В. В. Разработка электроискровых свечей зажигания ДВС с

вихревой стабилизацией разряда [Текст] / В. В. Михайлов, А. Н. Мухин, В. А. Фигурин // Матер. 2-й Российской конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». – Рыбинск: РГАТА, 2005. – С. 25-31.

7. Богданов, В. И. ПуВРД с камерой сгорания $V=\text{const}$ и перспективы применения его на БПЛА [Текст] / В. И. Богданов, Е. А. Тарасова // Полет. – 2005. – № 11. – С. 29-31.

8. Силакова, М. А. Генерация импульсов давления при истечении реагирующих гетерогенных струй в воздух / [Текст]: автореферат. дис... канд. физ. - мат. наук / Силакова М. А.; [ИХФ им. Н. Н. Семёнова]. – М., 2005. – 30 с.

9. Богданов, В. И. О применении камеры сгорания $V = \text{const}$ в газодинамических лазерах и МГД-генераторах [Текст] / В. И. Богданов // Инженер. – 2010. – № 8. – С.27.

10. Богданов, В. И. Об освоении пульсирующего детонационного рабочего процесса в энергодвигательных установках [Текст] / В. И. Богданов // Изв. РАН. Энергетика. – 2007. – № 2. 2007. – С. 84-90.

11. Богданов, В.И. ГТУ со сгоранием топлива при постоянном объеме. Новые концепции создания [Текст] / В. И. Богданов // Газотурбинные технологии. – 2002. – № 2. – С. 16-19.

12. Богданов, В. И. Концепция многотопливного автомобильного двигателя с усилителем крутящего момента [Текст] / В. И. Богданов // Двигателестроение. – 2006. – № 4. – С. 19-21.

13. Богданов, В. И. О применении цикла ГТД с подводом теплоты при постоянном объеме [Текст] / В. И. Богданов, Е. А. Тарасова // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2007. – № 3. – С. 35-37.

14. Богданов, В. И. Автомобиль и его двигатель – возможные перспективы развития [Текст] / В. И. Богданов // Автомобильная промышленность. – 2009. – № 1. – С. 25-28.

SOME RESULTS OF EXPERIMENTAL REFINING OF A CONSTANT VOLUME VALVE COMBUSTION CHAMBER

© 2011 V. I. Bogdanov, S. P. Kuznetsov

Science-and-Production Association “Saturn”, Rybinsk

The high-level performance constant volume valve combustion chamber is intended for advanced power generating engine systems with a pulsating work process. The review of both published basic results obtained during the investigations and the new ones with recommendations for further chamber improvement is presented. The chamber can be applied in pulse jet engines, as initiator of detonation in detonation engines, as well as in gas-dynamic lasers and MHD generators.

Constant volume combustion chamber, detonation initiator, pulse jet engine, gas-dynamic laser, MHD-generator.

Информация об авторах

Богданов Василий Иванович, д.т.н., главный специалист, ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск. Область научных интересов: исследования по созданию реактивных двигателей с пульсирующим рабочим процессом. E-mail: saturn@npo-saturn.ru.

Кузнецов Сергей Павлович, к.т.н., доцент, заместитель генерального конструктора ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск. Область научных интересов: поузловая доводка и испытания авиационных двигателей. E-mail: saturn@npo-saturn.ru.

Bogdanov Vasilii Ivanovitch, doctor of technical sciences, chief specialist, Science-and-Production Association “Saturn”. Area of research: creating jet engines with a pulsating operating process. E-mail: saturn@npo-saturn.ru.

Kuznetsov Sergei Pavlovitch, associate professor, candidate of technical sciences, deputy general designer of gas turbine engines, Science-and-Production Association “Saturn”. Area of research: aircraft engine development and testing. E-mail: saturn@npo-saturn.ru.