

ОГНЕВОЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ

© 2009 Г. С. Говоренко, Д. П. Тетерин, Д. С. Котельников, А. В. Алилуев, С. В. Алилуев,
В. Н. Федорец

ОАО «КБ «Электроприбор», г. Саратов

В статье изложен опыт создания стенда для испытания пульсирующих детонационных двигателей. Описаны структура и функции стенда, возможности использованных технических и программных средств, режимы работы стенда, отображение и обработка информации, порядок проведения огневых испытаний.

Макетный образец, стенд, тяга, удельный импульс тяги, диффузор, эжектор, инициатор

Разработанный макетный образец ПДД имеет следующие особенности [1]:

- режим работы импульсный с частотой следования единичных импульсов от 1 до 200 Гц;
- скорость горения топлива 800...2000 м/с;
- широкий диапазон изменения температуры и давления компонентов топлива на входе в двигатель;
- температура в камере сгорания до 4000 К;
- топливо может находиться в различных агрегатных состояниях (жидком, порошковом и газообразном).

Разработанный стенд для огневых испытаний макетных образцов ПДД обеспечивает:

- проведение испытаний макетных образцов, работающих на смесях жидкого горючего с воздухом;
- проведение испытаний макетных образцов, работающих на газоздушных рабочих смесях;
- проведение испытаний макетных образцов, работающих на воздушно-порошковых рабочих смесях;
- исследование рабочих процессов, протекающих в детонационных камерах (в реальном масштабе времени осуществляется измерение значений давления и температуры в детонационной волне, скорости распространения детонационной волны, единичного импульса тяги, частоты следования детонационных процессов, секундных расходов компонентов топлива);

- определение опытным путем оптимального соотношения компонентов детонационных смесей и его сравнение с расчетными данными;

- проведение обработки измеренных параметров, которая заключается в определении значений интегральной тяги, удельного импульса тяги, определении различных функциональных зависимостей между параметрами и отображении их в виде графиков, диаграмм и таблиц.

Сравнительный анализ технических и эксплуатационных характеристик известных стендов для испытаний силовых установок летательных аппаратов (ФГУП «ЦИАМ им. А.П. Баранова», ОАО «НПО «Сатурн», ФГУП «ММПП «Салют» и др.) показал, что ни один из них не учитывает особенностей разработанных макетных образцов ПДД.

Порядок разработки стенда. В соответствии с требованиями ГОСТ 2.102-68, ГОСТ 2.103-68 разработана конструкторская документация следующего состава: чертеж общего вида; спецификация; чертежи деталей; сборочный чертеж; принципиальная электрическая схема; перечень элементов; принципиальная пневмогидравлическая схема; ведомость покупных изделий; монтажная электрическая схема; габаритный чертеж; монтажный чертеж; пояснительная записка.

В соответствии с конструкторской документацией изготовлен стенд С-92 для проведения огневых испытаний макетных образцов ПДД [2].



Рис. 1. Макетный образец ПДД малой тяги

Все измерительные и регистрирующие приборы, входящие в состав стенда, поверены контрольно-измерительной лабораторией ОАО «КБ «Электроприбор». Сосуды, работающие под давлением, прошли ультразвуковой контроль и освидетельствованы Метрологическим центром. Арматура стенда имеет пожаро- и взрывобезопасное исполнение. Магистральи стенда проверены опрессовкой с обмыливанием стыковочных узлов.

Структура стенда. Структурная схема стенда для огневых испытаний ПДД малой тяги представлена на рис. 2.

Условные обозначения элементов, входящих в состав стенда для испытания пульсирующих детонационных двигателей:

- блок высокого давления (поз.1) – баллонная рампа для хранения сжатого воздуха;
- блок газообразного горючего (2) – баллонная рампа для хранения сжатого газообразного горючего;
- блок с жидким горючим (3);
- редукторы давления РД612У (7, 8, 9, 10);
- ресиверы (11, 12);
- блок клапанов подачи ЗК-М 501 С 32 НЗ У (13);
- регуляторы расхода РУСТ510-2У (14 и 15);
- расходомеры СМF050М-303-N-Q-F-Z-E-Z-Z-Z-GR (16 и 17);
- подогреватели воздуха с регулятором напряжения РНГТЕ-630 (18) – для обеспечения заданной температуры воздуха при имитации входных параметров двигателя на сверхзвуковых скоростях полета;
- смеситель (19);
- система инициирования (20);
- комплект выходных диффузоров (21);
- выхлопное устройство (22);
- пульт управления (23);
- система измерения и регистрации (24) в составе:

- а) датчик импульсного давления 014МТ;
- б) датчик импульсных сил ДИС-001;
- в) усилители зарядовые РШ 2731;
- г) осциллограф цифровой запоминающий четырехканальный АСК-3107;
- д) измеритель-регулятор технологический ИРТ-5920;
- е) датчик давления АИР-20;
- автоматическая система обработки результатов (25);
- персональный компьютер с программным обеспечением АСК-3107-РО5;
- компрессор высокого давления (26);
- агрегат подготовки к транспортировке порошкового горючего (27);
- газогенератор (28);
- комплект эжекторных насадков (29);
- блок арматуры наладки (30).

Общий вид стенда (магистральи, расходомеры, электропневмоклапаны, редукторы, датчики давления) изображен на рис. 3.

Функциональная схема пульта управления представлена на рис. 4.

Пульт управления позволяет измерять входные аналоговые сигналы, представленные в табл. 1, обрабатывать до 12 сигналов типа «сухой контакт» и выдавать до 40 дискретных управляющих сигналов уровнем 24 В. Информация с пульта управления передается по последовательным каналам информационного обмена RS-485 в персональный компьютер с программным обеспечением АСК-3107-РО5, где обрабатывается и выводится на экран монитора.

В табл. 2 перечислены внешние факторы, воздействовавшие на аппаратные средства стенда в процессе испытаний макетного образца ПДД.

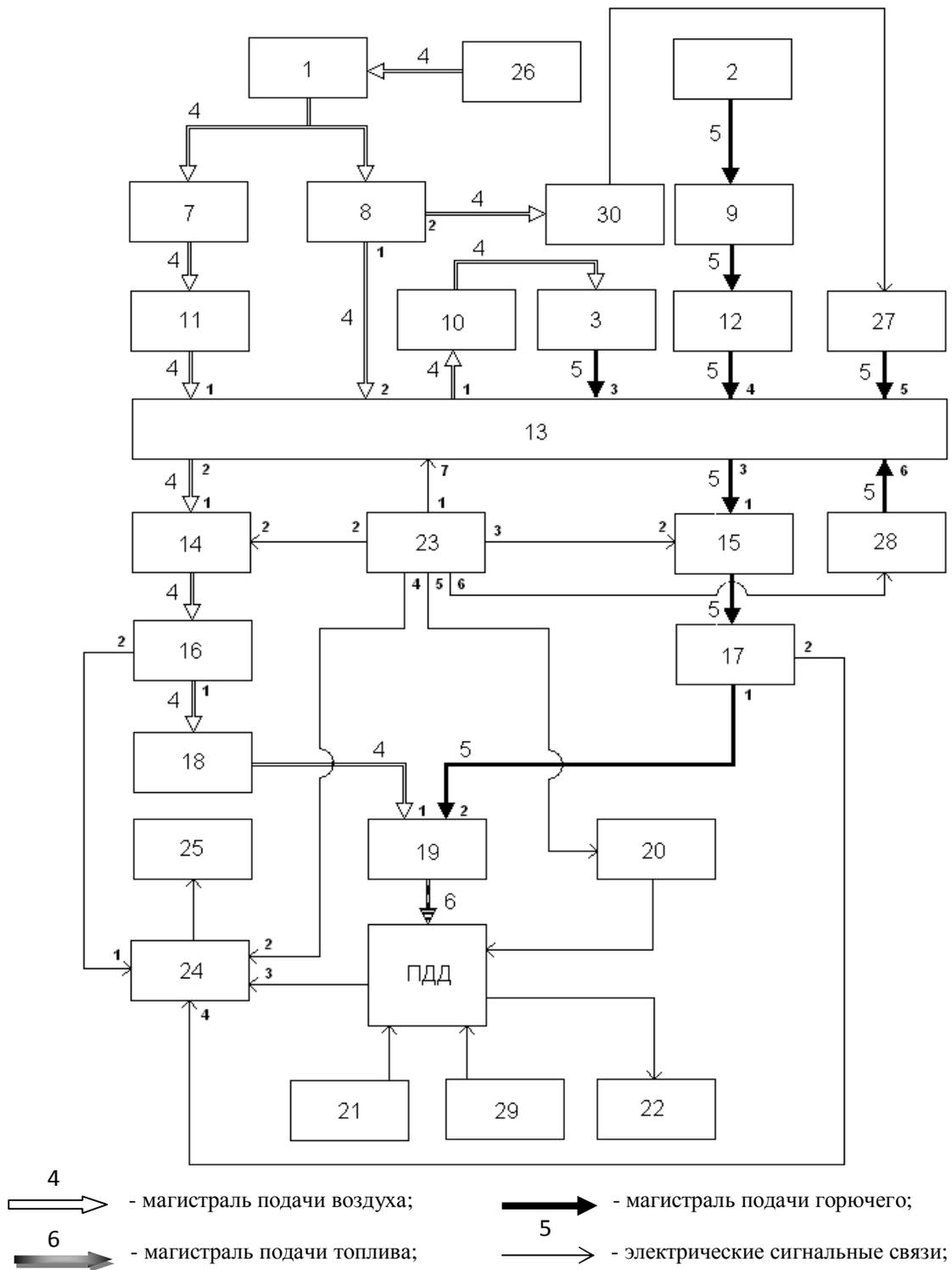


Рис. 2. Структурная схема стенда для огневых испытаний ПДД малой тяги

Таблица 1 – Входные аналоговые сигналы

№ п/п	Входной сигнал	Количество каналов	Диапазон измерения	Разрешающая способность
1	Ток	16	4...20 мА	4,88мкА
2	Напряжение	2	- 10 .. + 10 В	12,2 мкВ
3	Термопара	8	0...1372 °С	0,36 °С
4	Термометр Pt100	4	0...+350 °С	0,1 °С



Рис. 3. Основные узлы и устройства пневмосистемы стенда

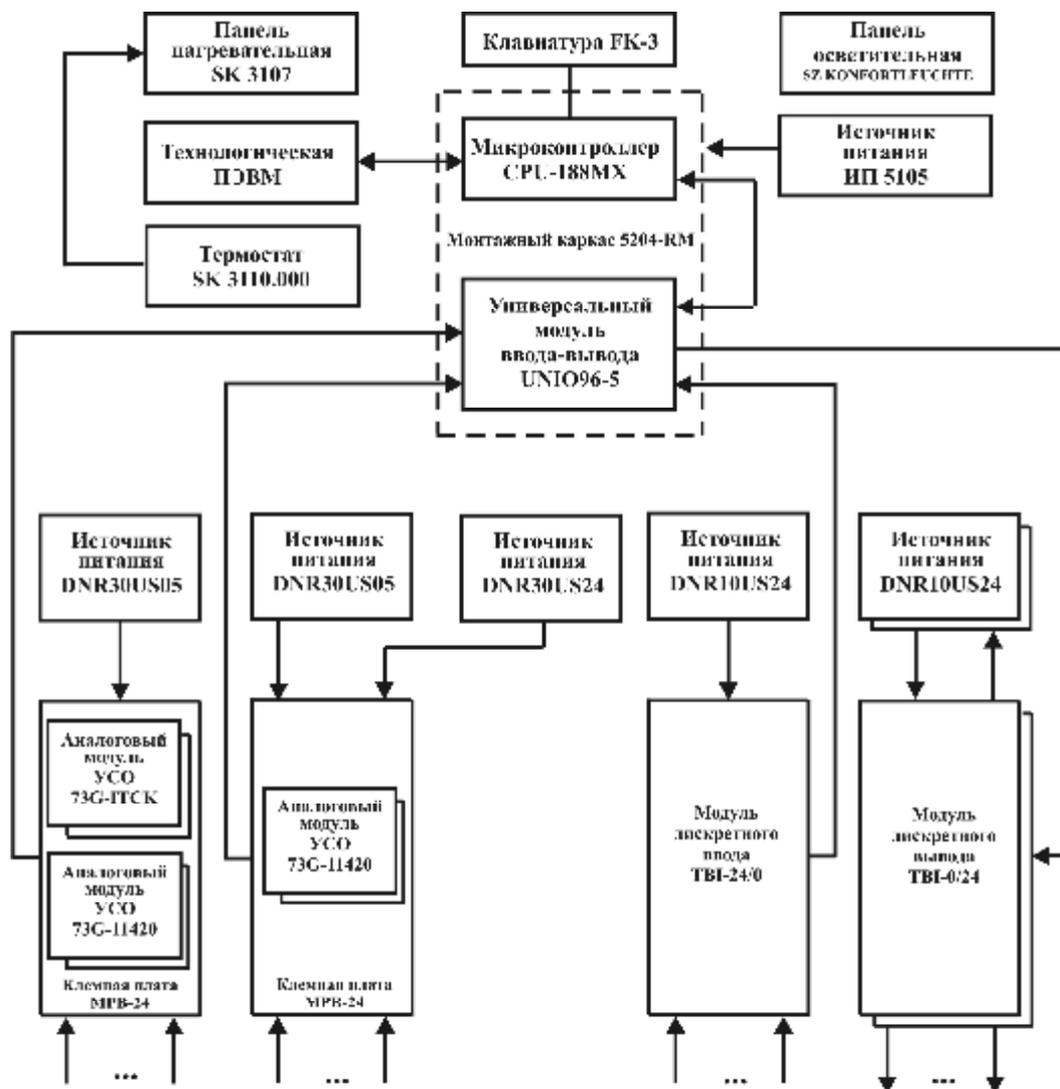


Рис. 4. Функциональная схема пульта управления

Таблица 2 – Внешние факторы

Наименование фактора внешней среды	Значение
Диапазон рабочих температур	- 20°C ... + 50°C
Влажность	5 ... 95 % без конденсации
Давление	до 4 570 м
Удары	до 12 g за 10 мс
Вибрация	1 g при 50-500 Гц

Условиями применения пульта управления обосновано использование элементной базы пульта управления, работающей в жестких условиях эксплуатации. В наибольшей степени этим условиям соответствует продукция фирм Fastwel, Octagon Systems, Grayhill, Omron.

Порядок работы стенда при проведении огневых испытаний. Описываемый стенд для проведения огневых испытаний ПДД малой тяги (рис. 2) позволяет проводить испытания ПДД, работающих на топливах в различном агрегатном состоянии (газообразном, жидком и порошковом).

Порядок проведения испытаний делится на два этапа: подготовительный и основной.

Подготовительный этап. Блок высокого давления (баллонная рампа) 1 заполняется сжатым воздухом от компрессора 26 до определенного уровня давления. После открытия запорных вентилей блока высокого давления 1 сжатый воздух по первой магистрали 4 подается на входы первого 7 и второго 8 редукторов давления, которые обеспечивают поддержание расчетного значения давления воздуха в первой магистрали 4. С выхода первого редуктора давления 7 по первой магистрали 4 сжатый воздух поступает на вход первого ресивера 11, выход которого закрыт блоком клапанов 13. С выхода второго редуктора давления 8 по магистрали 4 сжатый воздух поступает в управляющие полости клапанов 13 и подводится к блоку арматуры наладки 30. Вход блока арматуры наладки 30 закрыт. Запорные вентили блока газообразного горючего 2 закрыты.

При испытании ПДД, когда газообразное горючее подается из блока газообразного горючего 2, открываются запорные вентили блока газообразного горючего 2. При этом газообразное горючее по магистрали 5 подается через редуктор давления 9 во второй ресивер 12, выход которого закрыт бло-

ком клапанов 13. Редуктор давления 9 обеспечивает поддержание расчетного значения давления горючего в магистрали 5.

При испытании ПДД на порошковом горючем открывается вход блока арматуры наладки 30, при этом сжатый воздух подводится к агрегату подготовки к транспортировке порошкового горючего 27. Выход агрегата подготовки к транспортировке порошкового горючего 27 закрыт блоком клапанов 13.

При испытании ПДД, когда жидкое горючее подается из блока с жидким горючим 3, по сигналу с пульта управления 23 открывается первый клапан блока 13, при этом сжатый воздух по магистрали 4 подводится на вход редуктора давления 10 и далее через магистраль 4 на вход блока с жидким горючим 3. Жидкое горючее под давлением воздуха вытесняется из блока 3 по магистрали 5 на третий вход блока клапанов 13. Третий вход блока клапанов 13 закрыт. Редуктор давления 10 обеспечивает поддержание расчетного значения давления горючего в магистрали 5.

Основной этап

Режим 1. Работа устройства на газообразном горючем от блока газообразного горючего. По управляющему сигналу с пульта управления открываются клапаны 13. При этом сжатый воздух по первой магистрали 4 поступает через регулятор расхода 14 и расходомер 16 на подогреватели 18 и далее на первый вход смесителя 19. Одновременно газообразное горючее по второй магистрали 5 поступает через регулятор расхода 15 и расходомер 17 на второй вход смесителя 19, где происходит смешение газообразного горючего с воздухом в расчетном соотношении. С выхода смесителя 19 по магистрали 6 смесь газообразного горючего и воздуха (топливо) поступает в ПДД.

После открытия клапанов 13 и подачи топлива в ПДД с пульта управления 23 по

программе, задаваемой оператором, подаются управляющие воздействия на систему инициирования 20, которая, в свою очередь, оказывает импульсное воздействие на ПДД. В результате ПДД начинает работать в режиме пульсирующей детонации на газообразном горючем.

Режим 2. Работа устройства на порошковом горючем. Порядок проведения огневых испытаний ПДД малой тяги на порошковом горючем аналогичен проведению испытаний ПДД в режиме 1. Отличие состоит в способе подачи порошкового горючего в камеру ПДД.

По управляющему сигналу с пульта управления 23 открываются клапаны 13, в результате чего сжатый воздух по магистрали 4 проходит через регулятор расхода 14 и расходомер 16 на подогреватели 18 и далее на первый вход смесителя 19. Одновременно происходит подача порошкового горючего из агрегата подготовки к транспортировке порошкового топлива 27 по магистрали 5 через открытые клапаны 13. Порошковое горючее поступает через регулятор расхода 15 и расходомер 17 на второй вход смесителя 19, где происходит смешение порошкового горючего с воздухом в расчетном соотношении. С выхода смесителя 19 по магистрали 6 смесь порошкового горючего и воздуха (топливо) поступает в ПДД.

Режим 3. Работа устройства на газообразном горючем от газогенератора. Газогенератор предназначен для преобразования заряда твердого горючего в газообразное состояние для последующего получения детонационной рабочей смеси, которая образуется в процессе смешения газообразного горючего с воздухом или другим газообразным окислителем в соответствии с их заданным соотношением.

Порядок проведения огневых испытаний ПДД малой тяги на газообразном горючем от газогенератора аналогичен проведению испытаний ПДД в режиме 1. Отличие заключается в применении газогенератора для получения газообразного горючего.

По управляющему сигналу с пульта управления 23 открываются клапаны 13, в результате чего сжатый воздух по магистрали 4 проходит через регулятор расхода 14 и расходомер 16 на подогреватели 18 и далее

на первый вход смесителя 19. Одновременно в газогенераторе 28 начинается преобразование горючего из твердого состояния в газообразное с заранее определенными характеристиками. В результате реакции образующееся газообразное горючее из газогенератора 28 поступает по магистрали 5 через открытые клапаны 13, регулятор расхода 15 и расходомер 17 на второй вход смесителя 19, где происходит смешение газообразного горючего из газогенератора 28 с воздухом в расчетном соотношении. С выхода смесителя 19 по магистрали 6 смесь газообразного горючего и воздуха (топливо) поступает в ПДД.

Режим 4. Работа устройства на жидком горючем. Порядок проведения огневых испытаний ПДД малой тяги на жидком горючем аналогичен проведению испытаний ПДД малой тяги на газообразном горючем от блока газообразного горючего. Отличие состоит в использовании блока жидкого горючего вместо блока газообразного горючего.

По управляющему сигналу с пульта управления 23 открываются клапаны 13, в результате чего сжатый воздух по магистрали 4 проходит через регулятор расхода 14 и расходомер 16 на подогреватели 18 и далее на первый вход смесителя 19. Одновременно происходит подача жидкого горючего из блока 3 по магистрали 5, через открытые клапаны 13, регулятор расхода 15 и расходомер 17 на второй вход смесителя 19, где происходит смешение жидкого горючего с воздухом в расчетном соотношении. С выхода смесителя 19 по магистрали 6 смесь жидкого горючего и воздуха (топливо) поступает в ПДД.

В процессе работы ПДД расход воздуха устанавливается и регулируется с пульта управления 23 регулятором расхода 14, расход горючего – регулятором расхода 15.

Информация о действиях оператора поступает с пульта управления 23, о текущих значениях расхода и давления воздуха – с расходомера 16, газообразного горючего – с расходомера 17. Информация о параметрах рабочего процесса в ПДД поступает в систему измерения и регистрации 24. Вся поступающая в систему измерения и регистрации 24 информация записывается и отобра-

жается в заданной оператором форме, а также может передаваться для обработки, хранения и визуализации в автоматизированную систему обработки результатов 25 по командам оператора. Работающий макетный образец ПДД показан на рис.5.

В процессе испытаний оператор может дополнительно устанавливать на ПДД комплекты выходных диффузоров 21 и эжекторных насадков 29.

Для отвода продуктов детонации из ПДД используется выхлопное устройство 22.

В случае необходимости штатного или аварийного отключения испытательного стенда с пульта управления 23 прекращается выдача сигналов. Закрываются клапаны 13, система инициирования 20 перестает выдавать импульсные воздействия и ПДД прекращает свою работу.



Рис. 5. Работающий макетный образец ПДД с эжекторным насадком

Отображение и обработка информации. Результаты испытаний, отображаемые в виде осциллограмм (рис. 6) на мониторе ПК, преобразуются в таблицу Microsoft Excel и обрабатываются при помощи этой же программы.

Таблица результатов обработки содержит следующие данные:

- значения по оси времени;
- амплитуда напряжения на выходе канала датчика тяги (канал А осциллографа);

- амплитуда напряжения на выходе каналов датчиков давления в детонационной камере;
- значение единичного импульса тяги;
- суммарное значение тяги;
- удельный импульс тяги.

Разработанный стенд позволил провести серию огневых испытаний ряда макетных образцов ПДД. В процессе огневых испытаний были проведены следующие исследования:

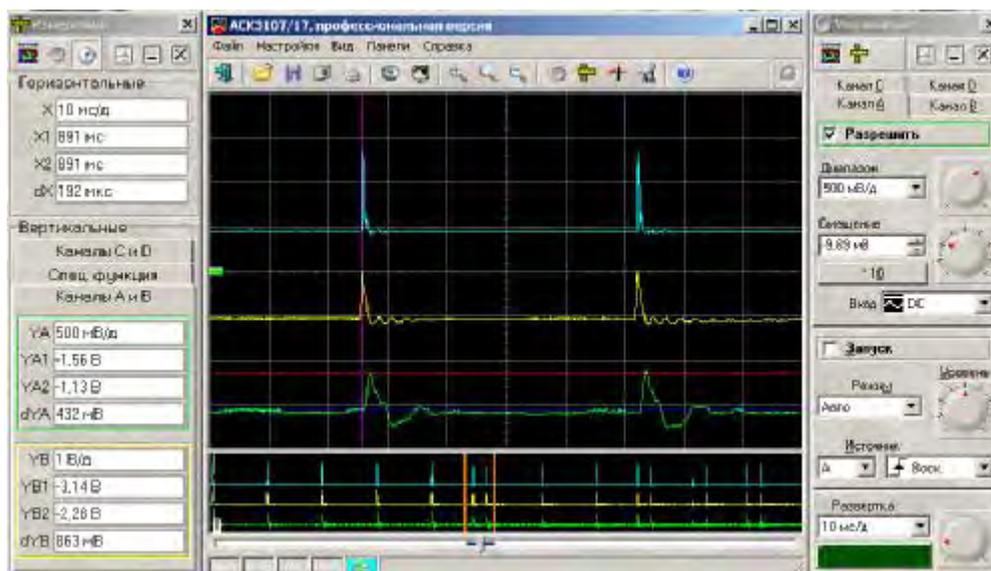


Рис. 6. Отображение параметров макетного образца ПДД на дисплее ПК

- определена работоспособность смесителя компонентов эжекторного типа на частотах следования детонационных импульсов от 10 до 200 Гц, системы инициирования и макетных образцов ПДД в целом;

- определена работоспособность макетных образцов ПДД с многосекционными детонационными камерами;

- определена работоспособность макетных образцов ПДД с газодинамической системой инициирования на основе генератора Гартмана;

- определены зависимости основных тяговых характеристик макетных образцов ПДД от степени заполнения и продувки детонационных камер, геометрических характеристик детонационных камер, сопел, эжекторных насадков;

- испытана система электроискрового инициирования повышенной мощности для обеспечения работы макетного образца ПДД при низких температурах рабочей смеси;

- по результатам испытаний определен технический облик ПДД, а также сформулированы направления дальнейших исследований и разработки основных систем и устройств ПДД, в частности детонационной камеры, системы инициирования, системы подачи компонентов и продувки детонационной камеры, системы автоматического управления.

Огневой стенд находится в эксплуатации 5 лет. Без учета отладочных операций на нем было проведено около 200 огневых испытаний макетных образцов ПДД. Испытания показали надежность функционирова-

ния всех систем и узлов стенда. В процессе испытаний не было сбоев электронных систем управления, инициирования, измерения и обработки результатов. Возникшие в измерительных каналах помехи были устранены гальванической развязкой сенсоров от металлических частей стенда и макетного образца ПДД. *Исследования проводятся в рамках гранта МО РФ.*

Библиографический список

1 Импульсные детонационные двигатели / под ред. д-ра физ.-мат. наук Фролова С.М. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. – 592 с.

2 Исследование и разработка пульсирующих детонационных двигателей для перспективных образцов вооружения и военной техники. Шифр «Почин» (II этап): Науч.-техн. отчет ОАО «КБ «Электроприбор». Вып. по Гос. контр. № 5144 от 31.05.2004. 2005 г.

References

1 Pulsing detonation engines / under the editorship of d.f.-m.s. Frolov's S.M. – M: TORUS PRESS, 2006 year. - 592 p.: illustrations.

2 The Technological report of «Electropribor» Design Bureau. «Research and working out of pulsing detonation engine for perspectiv samples of armament and the military engineering», the code «Pochin» (II stage). It is executed on the state contract № 5144 from 31.05.2004. 2005 year.

FIRING TEST STAND PULSE DETONATION LOW-THRUST ENGINES

© 2009 G. S. Govorenkho, D. P. Teterin, D. S. Kotelnikhov, A. V. Aliluev, S. V. Aliluev, V. N. Fedorets

«Electropribor» Design Bureau, Saratov

In the article experience of creation a test stand of pulse detonation engines is stated. Stand operating modes, representation and information machining, order of conducting fire tests are presented structure and functions of the test stand, possibility used technical and software.

A model sample, test stand, a thrust, thrust specific impulse, a diffuser, an ejector, a initiator

Информация об авторах

Говоренко Герман Семенович, доктор технических наук, профессор, первый заместитель главного директора по науке ОАО «КБ Электроприбор», г. Саратов. E-mail: tdp@kbep.ru. Область научных интересов: надежность и качество систем летательных аппаратов.

Тетерин Дмитрий Павлович, кандидат технических наук, главный конструктор ОАО «КБ Электроприбор», г. Саратов. E-mail: tdp@kbep.ru. Область научных интересов: автоматизированные системы контроля.

Котельников Денис Сергеевич, инженер-конструктор 2 категории ОАО «КБ Электроприбор», г. Саратов. E-mail: kds@kbep.ru. Область научных интересов: схемотехника.

Алилуев Алексей Васильевич, инженер-конструктор 3 категории ОАО «КБ Электроприбор», г. Саратов. E-mail: ali_ale_86@mail.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, системы управления силовых установок летательных аппаратов.

Алилуев Сергей Васильевич, младший научный сотрудник ОАО «КБ Электроприбор», г. Саратов. E-mail: ali_ale_86@mail.ru. Область научных интересов: испытания силовых установок летательных аппаратов.

Федорец Виталий Николаевич, кандидат технических наук, руководитель лаборатории ОАО «КБ Электроприбор», г. Саратов. E-mail: fvn.spb@mail.ru. Область научных интересов: детонационные двигатели, процессы горения.

Govorenko German Semenovich, Doctor of Technical Science, The first assistant to the executive director on a science, the professor «Electropribor» Design Bureau. E-mail: tdp@kbep.ru. Area of research: reliability and quality of systems of flying machines.

Teterin Dmitrii Pavlovich, Candidate of Technical Science, The main designer «Electropribor» Design Bureau. E-mail: tdp@kbep.ru. Area of scientific interests: the automated monitoring systems.

Kotelnikhov Denis Sergeevich, The engineer-designer of «Electropribor» Design Bureau. E-mail: kds@kbep.ru. Area of research: circuitry.

Aliluev Alexei Vasilievich, The engineer-designer of «Electropribor» Design Bureau. E-mail: ali_ale_86@mail.ru. Area of research: mathematical modelling, control systems of power-plants of flying machines.

Aliluev Sergei Vasilievich, The younger scientific employee «Electropribor» Design Bureau. E-mail: ali_ale_86@mail.ru. Area of research: tests of power-plants of flying machines.

Fedorets Vitalii Nicolaevich, Candidate of Technical Science, The chief of laboratory «Electropribor» Design Bureau. E-mail: fvn.spb@mail.ru. Area of research: Detonation engines, burning fuel, a design of power-plants, synthesis of difficult technical systems, arms and the military technics.