

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

*Сиденко К.А.*

*Тольяттинский государственный университет, г.Тольятти*

**Ключевые слова:** пульсирующий воздушно-реактивный двигатель; экспериментальный образец; газодинамический процесс; резонаторная труба; турбулентные течения; рециркуляционная зона.

**Аннотация.** Представлены результаты численного расчета газодинамического процесса в пульсирующем воздушно-реактивном двигателе. Создана расчетная модель, проведены расчеты внутреннего течения потока. Определены конструктивные элементы впускного тракта, камеры сгорания и резонаторной трубы, влияющие на появления турбулентных течений, струй и рециркуляционных зон. По результатам расчета изготовлены двигатели и проведены огневые испытания в моторном боксе при скорости набегающего воздушного потока до 120 м/сек. Спроектирован и изготовлен тягомерный стенд. Сравнительный анализ результатов испытания в моторном боксе и численных расчетов дал возможность создания методики доводочных работ данного типа двигателей расчетным методом, минимизируя затраты на стадии проектирования.

## NUMERICAL STUDIES OF GAS-DYNAMIC PROCESSES IN A PULSATING AIR-JET ENGINE

*Sidenko K.A.*

*Tolyatti State University, Tolyatti*

**Keywords:** experimental sample; gas-dynamic process; pulsating air-jet engine; turbulent flows; recirculation zone; resonator tube.

**Abstract.** The results of numerical calculation of gas-dynamic process in pulsating air-jet engine are presented. The computational model is created and the calculations of internal flow are made. The structural elements of the inlet path, combustion chamber and resonator tube influencing the appearance of turbulent currents, jets and recirculation zones are determined. Based on the calculation results, the engines are manufactured and fire tests are carried out in the engine box at the velocity of the raging air flow up to 120 m/sec. Traction test bench was designed and manufactured. Comparative analysis of the test results in the engine box and numerical calculations made it possible to create a method of finishing works of this type of engines by the calculation method, minimizing costs at the design stage.

### Введение

Для решения различных специфических задач применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Основными типами двигателей, применяемых в составе силовых установок БПЛА, являются поршневые, турбореактивные и пульсирующие воздушно-реактивные двигатели (ПуВРД). Конструктивно ПуВРД подразделяются на клапанные и бесклапанные. Бесклапанные наиболее надежные, в них отсутствуют движущие элементы. В известных ПуВРД тракт двигателя выполнен в виде латинской буквы «U», концы которой обращены назад по ходу движения аппарата (рис. 1), при этом истечение реактивной струи происходит сразу из обоих концов.



Рис. 1. Бесклапанный ПуВРД производства фирмы «Эникс»

Поступление свежего воздуха в камеру сгорания осуществляется за счет волны разрежения, возникающей после импульса. Данная конструкция ПуВРД имеет существенный недостаток. При увеличении скорости ЛА поступление свежего воздуха в камеру сгорания уменьшается, это приводит к уменьшению тяги двигателя. Как правило максимальная скорость ЛА весом 70 кг в горизонтальном полете с «U-образным двигателем не превышает 60 м/сек. Предлагается бесклапанный ПуВРД, впускная труба которого направлена навстречу потоку (рис. 2).

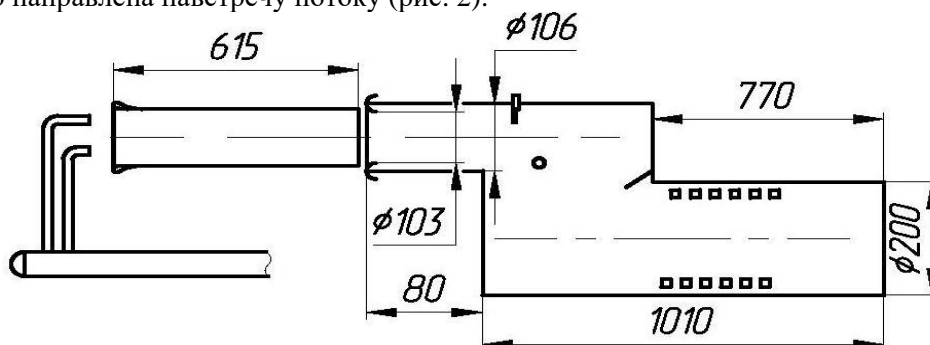


Рис. 2. Предлагаемый к исследованию ПуВРД

Двигатель состоит из впускной трубы, камеры сгорания, резонаторной трубы, змеевика, в который подается топливо под давлением 6 атм. Нагретое топливо, температурой до 500°С, направляется в распылитель.

Преимуществом данной конструкции является прогрессивная характеристика тяги, т. е. с увеличением скорости набегающего потока увеличивается наполнение свежим воздухом камеры сгорания и, как следствие, тяга двигателя возрастает. В настоящее время созданы экспериментальные работающие образцы. Применение данного вида двигателя возможно на самолётах-мишенях со скоростями полёта до 200 м/с, что в настоящее время является актуальной темой. Более того, интерес к созданию ПуВРД для скоростных БПЛА вызывает ожидаемая простота конструкции, дешевизна и надежность двигателя. Проведение численных исследований газодинамических процессов позволит визуализировать течения потока в двигателе, определить влияние конструктивных элементов камеры сгорания и резонаторной трубы на процесс смесеобразования.

#### Постановка задачи исследования

Существуют два основных способа распространения пламени в смесях.

– **Передача горения от слоя к слою за счет теплопроводности и диффузии** (максимальная скорость горения бензо-воздушной смеси не превышает 50 м/с).

– **Детонационное распространение горения** (скорость горения более 1500 м/с).

Детонация представляет собой комплекс мощной ударной волны и следующей за ее фронтом зоной быстрой экзотермической реакции. Ударная волна сжимает и нагревает топливовоздушную смесь, продукты сгорания которой сильно расширяются - происходит взрыв (детонационная волна). При ее появлении давление и температура в очаге резко, скачком нарастают до высоких значений [1, 2]. Обязательным условием появления детонационной волны является ускорение пламени.

По данным исследования [3] конвективные потоки, турбулентность, струи газа, пульсации, вихри, автотурбулизация горения в десятки и сотни раз увеличивают скорость распространения пламени. Механизм турбулентного горения представлен на рисунке 3.

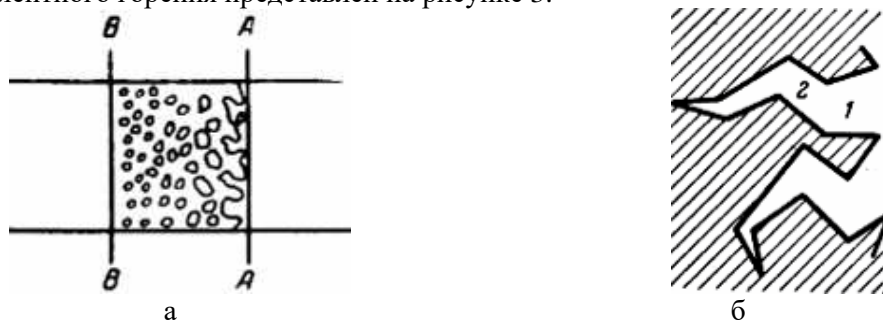


Рис. 3. Схема зоны горения в потоке с сильной турбулентностью: а – справа от плоскости AA – несгоревший газ, слева от плоскости BB – продукты горения; б – 1, 2 несгоревший газ

Турбулентность увеличивает поверхность горения, не только искривляя ее передний фронт, но раздробляя объемы несгоревшего газа, попавшие в зону горения. Фронт горения приобретает значительную ширину, он заполнен множеством горящих с поверхностей, постепенно уменьшающихся по размеру объемов несгоревшего газа. *Вследствие этого резко возрастает тепловыделение в потоке, то есть увеличивается мощность всей системы.* По этой причине на практике в системах, от которых требуется высокая мощность – двигателях, топках – используется именно турбулентный режим. В работе [4] получили практическое подтверждение влияния аэродинамического фактора на скорость горения, т.е. конструктивные элементы впускной трубы, камеры сгорания и резонаторной трубы влияют на скорость горения топливовоздушной смеси [5].

На основании вышеизложенного первоочередной задачей научно- исследовательской работы по изучению рабочего процесса ПуВРД является визуализация смесеобразования в проточной части двигателя расчетным методом конечных элементов с помощью программы Autodesk CFD 2019, а так же влияния различных конструктивных элементов камеры сгорания и резонаторной трубы на появления струй, вихрей и рециркуляционных зон.

#### Целями данной работы являются:

- создание расчетной модели ПуВРД;
- проведения численного расчета газодинамических процессов, проходящих в проточной части двигателей различной комплектации с целью получения визуальной картины течения газового потока, турбулентных зон, вихрей, струй и рециркуляционных зон;
- проведение огневых испытаний двигателя в моторном боксе;
- анализ расчетов с результатами, полученными при огневых испытаниях в моторном боксе.

### Создание расчетной модели

Трёхмерная модель, разработанная в программе Autodesk Fusion 360, представлена на рисунке 4.

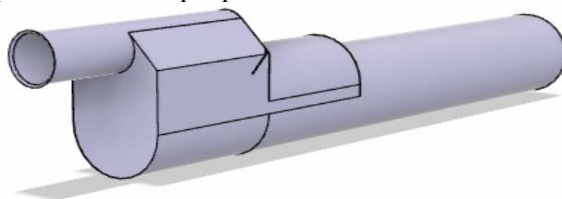


Рис. 4. Расчетная модель, спроектированная в 3D

Начальные условия переменная подача воздуха от 0 до 120 м/сек с частотой пульсации 100 Гц. Температура на входе 20 °С.

### Результаты численного расчета модели

Результаты численного расчета скорости течения представлена на рисунке 5 без козырька и змеевика.

Из анализа расчета видно только два продольных вихря (рис. 6).

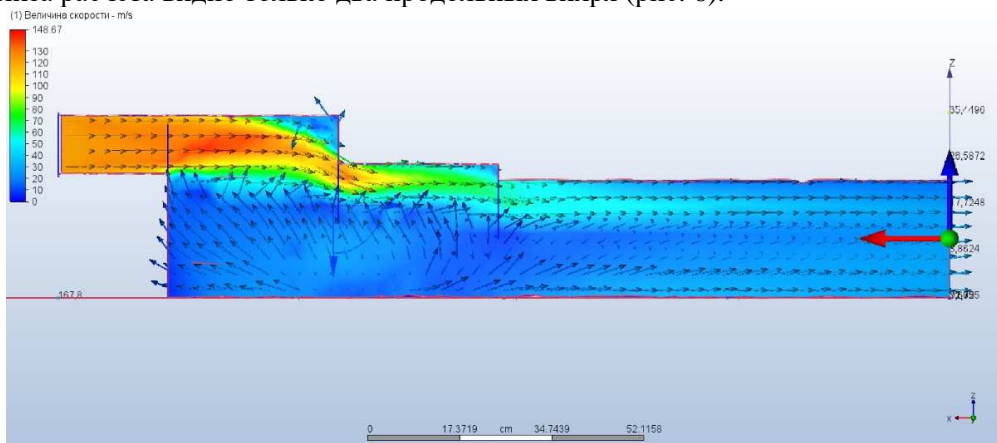


Рис. 5. Результаты численного расчета в комплектации без козырька и змеевика

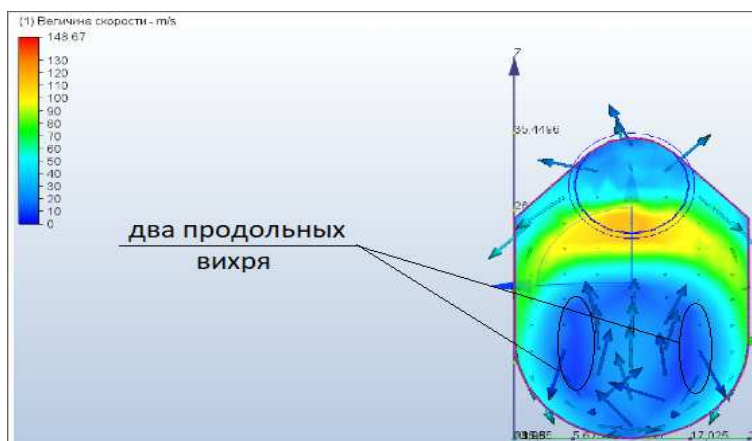


Рис. 6. Численный расчет внутреннего течения в ПуВРД, поперечный разрез

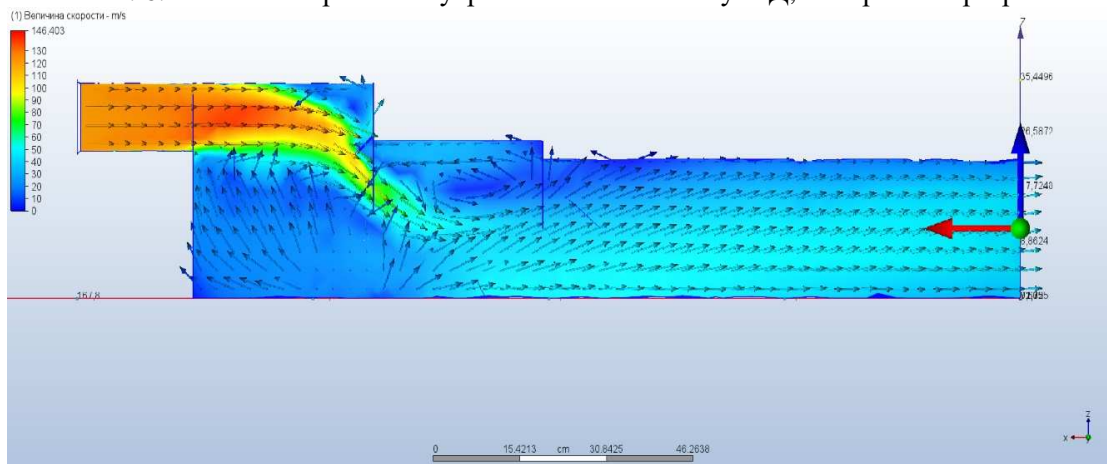


Рис. 7. Результаты численного расчета в комплектации с козырьком без змеевика

При установке козырька увеличилось количество рециркуляционных зон до трех (рис. 7). График скорости потока проточной части представлен на рисунке 8. Из графика видно отсутствие пульсации скорости, а значит, наблюдается ламинарное течение потока в резонаторной трубе.

При установке козырька и змеевика количество рециркуляционных зон увеличилось до четырех (рис. 9, 10).

Наблюдаем получение струй со скоростями от 10 до 65 м/с (рис. 11).

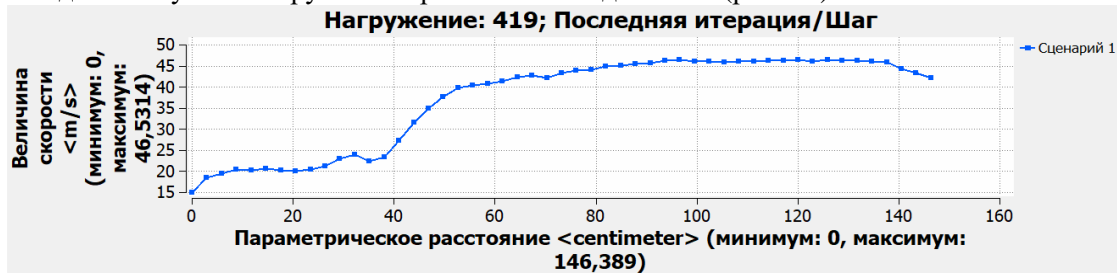


Рис. 8. График скорости вдоль всей проточной части двигателя без змеевика

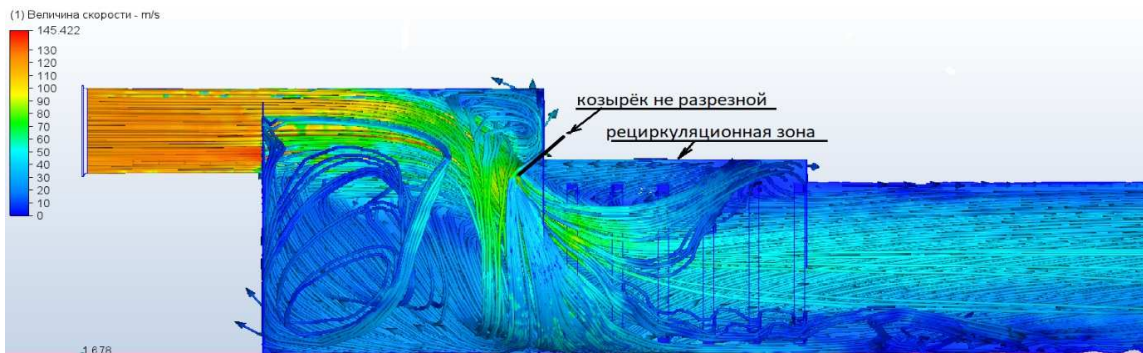


Рис. 9. Численный расчет внутреннего течения в ПуВРД, продольный разрез в комплектации с козырьком и змеевиком

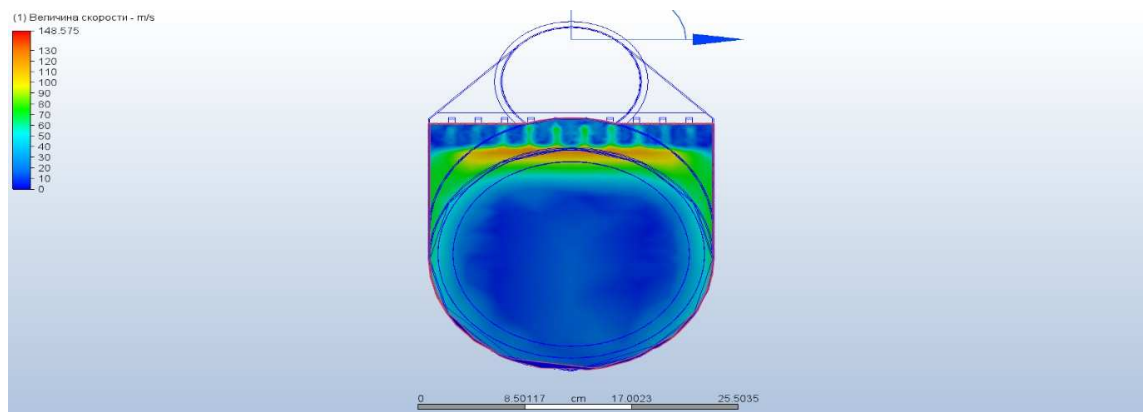


Рис. 10. Численный расчет внутреннего течения в ПуВРД, поперечный разрез в комплектации с козырьком и змеевиком



Рис. 11. График пульсаций струй за разрезным козырьком

Изменение скорости потока на змеевике от 0 до 14 м/с (рис. 12). Происходит торможение потока при столкновении с препятствием, при этом по данным [3] должны увеличиться давление и температура в месте удара. Это приведет к дополнительному воспламенению догорающей смеси. На летательном аппарате двигатель обдувается внешним потоком, поэтому был проведен численный расчет обдува ПуВРД в трубе.

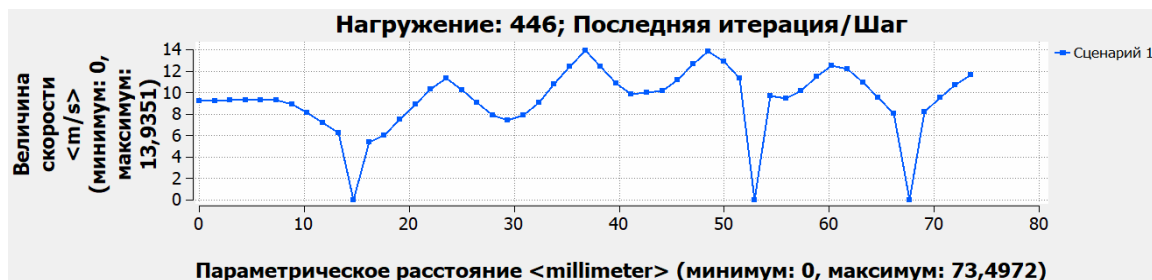


Рис. 12. График пульсаций скорости потока на змеевике

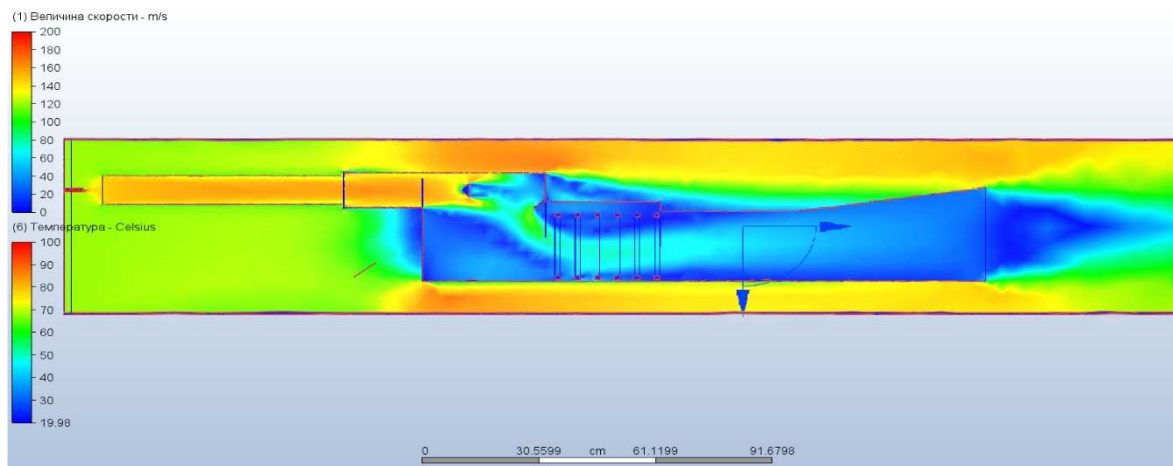


Рис. 13. Численный расчет обдува двигателя в трубе

В двигателе установлен конический стабилизатор. За коническим стабилизатором наблюдается торможение потока (рис. 13).

По результатам расчета наружного обдува двигателя наблюдаются донное давление, которое увеличивает продувку двигателя.

На основании проведенной работы появилась визуализация внутреннего течения в ПуВРД, определено влияние конструкции проточной части на образование рециркуляционных зон, вихрей и струй.

1. При установке змеевика количество рециркуляционных зон увеличилось до четырех.
2. При установке разрезного козырька появились пульсационные течения и рециркуляционные зоны.
3. При внешнем обдуве двигателя появляется донное давление, которое способствует продувке двигателя.
4. При установке конического стабилизатора наблюдается торможение потока.

### Результаты работы

Освоена методика расчета газодинамических процессов в ПуВРД, проведена визуализация процессов, проходящих в двигателе при его продувке.

На рисунке 14 представлен результат исследовательской работы методом численного расчета с целью получения максимального количества рециркуляционных зон, струй и вихрей как в камере сгорания, так и в резонаторной трубе.

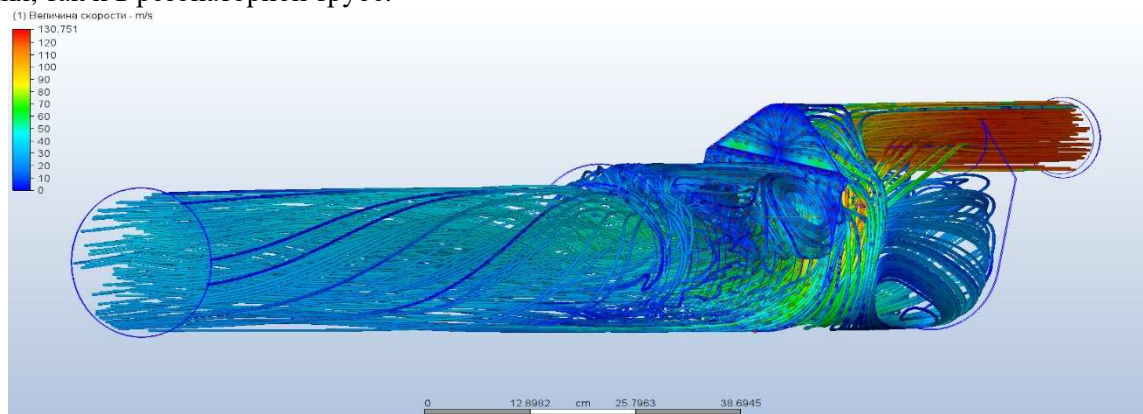
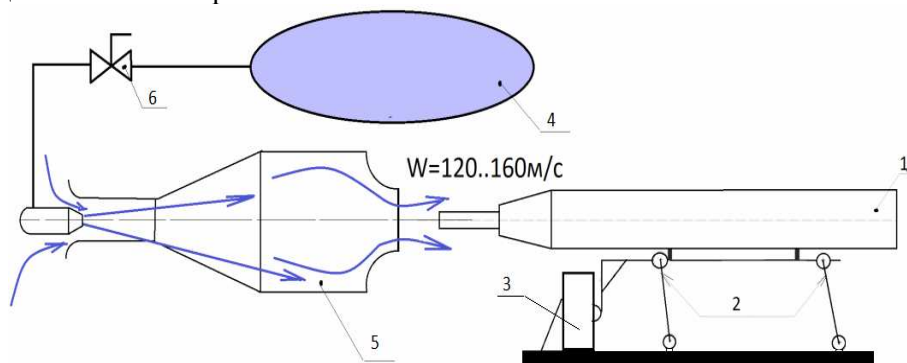


Рис. 14. Результаты численного расчета ПуВРД в комплектации с разрезным козырьком, коническим стабилизатором и змеевиком

Для проведения испытаний в моторном боксе был изготовлен испытательный стенд. На рисунке 15 схематично представлена тягомерная часть.



1–двигатель, 2–рычажные шарниры монтажного параллелограмма, 3–тензодатчик, 4–ресивер, 5–эжекторная труба, 6–регулятор

Рис. 15. Схема тягомерной части испытательного стенда

Сжатый до  $6 \text{ кг/см}^2$  воздух, подаваемый из ресивера ёмкостью  $12,6 \text{ м}^3$ , частично осушался и далее через эжектор с профилированным выходным соплом в виде струи натекал на впускной канал исследуемого двигателя 1. Двигатель в свою очередь был жёстко закреплён на шарнирном параллелограммном подвесе 2, жестко связанном с силоизмерительным тензометрическим датчиком 3. Все сигналы поступали через самописец в персональный компьютер и затем обрабатывались. В качестве основного параметра при обработке экспериментальных данных на начальном этапе исследований использовалась максимальная амплитуда пульсации тяги, получаемая с силоизмерительного датчика ДСТ. Скорость набегающего воздушного потока измерялась трубкой Пито.

Результаты огневых испытаний различной комплектации ПуВРД в моторном боксе представлены на рисунке 17.

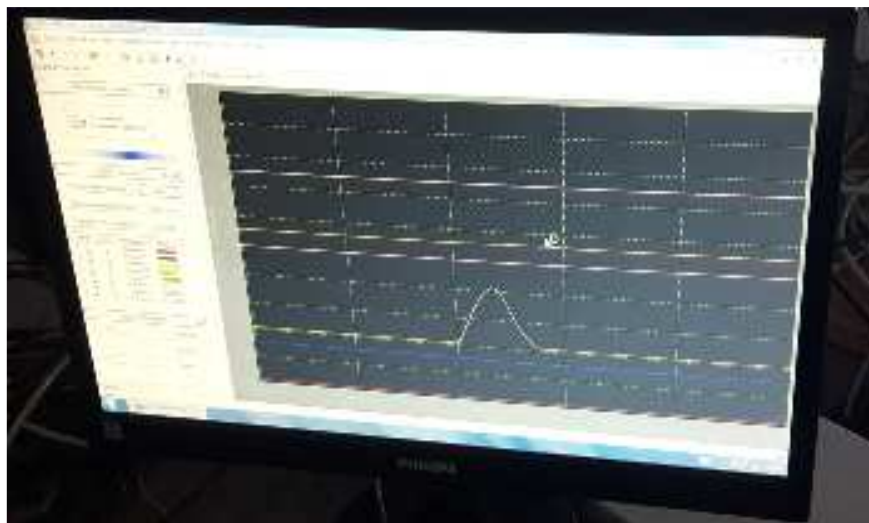
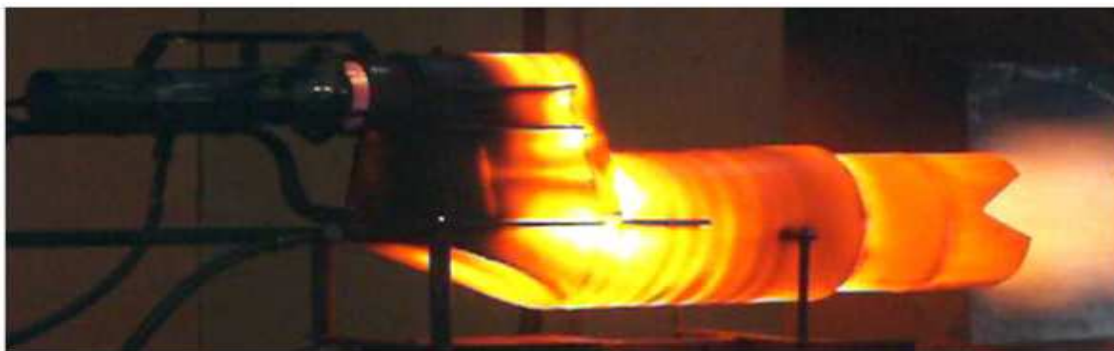


Рис. 16. График удара о тензометрический датчик



А

Рис. 17. Влияние аэродинамических факторов и конического стабилизатора на сдвиг зоны горения в проточной части двигателя



Б



В

Рис. 17. Продолжение

По результатам проведенной НИР получена методика расчета численным методом процесса смесеобразования в проточной части двигателя, практически получена возможность управления процессом горения в ПуВРД. Двигатель в комплектации без козырька и змеевика не получилось запустить в моторном боксе. На фото А показана работа двигателя в комплектации с козырьком без змеевика. Величина удара о тензодатчик 20 кг. На фото Б в комплектации с козырьком и змеевиком – 60кг. На фото В с козырьком, змеевиком и коническим стабилизатором – 80 кг.

#### Список литературы

1. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонация. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. Ч. 2 / Под ред. Ю.Б. Харитонова. – М.: Наука, 1984. – 376 с.
2. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации. – М.: Гос. Изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 164 с.
3. Щелкин К.И., Трошин Я.К., Газодинамика горения., изд. Академия наук СССР, Москва 1963, Институт химической физики. – 287 с.
4. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
5. Ствольные и эжекторные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели. Работа в детонационном режиме: монография / К.В. Мигалин и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2019. – 436 с.

#### Сведения об авторе:

*Сиденко Кирилл Алексеевич* – студент, ТГУ, г.Тольятти.