

# ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ С БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ ПРИ РАСЧЁТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОТКЛИКА ВЫСОТНОГО ЧЕТЫРЁХКАМЕРНОГО ЖРД НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ДВИГАТЕЛЯ.

Владимиров С.А. к.т.н.(1), Горохов В.Б. к.ф.-м.н. (1), Корнев Д.В. (1), Титов В.А. к.ф.-м.н. (1), Кондратенко М.А. (1, 2), Трефилов С.И. (1, 2)  
1 - ФГУП ЦНИИмаш, 2 - МФТИ

## Постановка проблемы.

Сопло камеры высотного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) рисунок 1, имеет пониженное давление в выходном сечении сопла у стенки 0,09 атм. Поэтому при испытании двигателя в земных условиях без газодинамической трубы под воздействием атмосферного давления внутрь полноразмерного сопла входит скачок уплотнения. На скачке уплотнения давление у стенки сопла возрастает с 0,29 атм до 0,95 атм. Увеличение давления приводит к отрыву газового потока от стенки сопла. В результате образуется зона отрывного течения с пониженным давлением, в которую поступает атмосферный воздух. Схематическое пояснения возникновения скачка уплотнения приведено на рисунке 2. Течение газа у стенки сопла в зоне скачка уплотнения и зоне отрывного течения носит пульсационный характер.

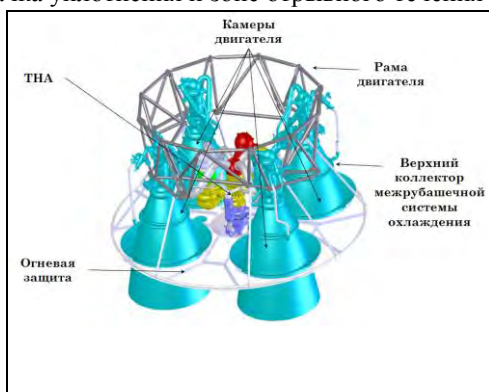


Рис.1. Типовая компоновка высотного 4-х камерного ЖРД [1]

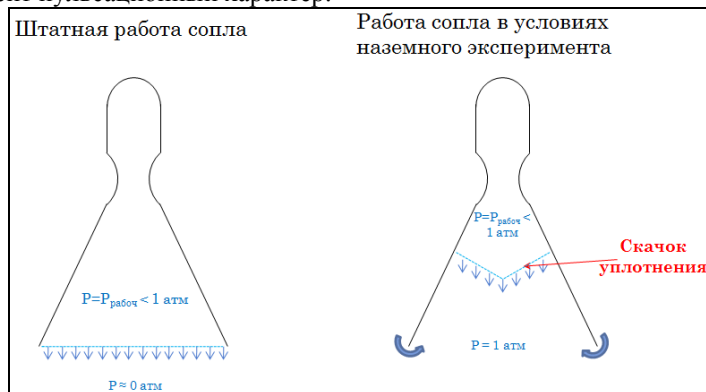


Рис.2. Схематическое пояснения возникновения скачка уплотнения

Так как при огневых испытаниях зафиксированы случаи пониженного ресурса в межрубашечной системе охлаждения, возникла необходимость оценки влияния пульсаций давления в зоне отрыва на ресурс камеры в опасных местах.

## Нагрузки.

В данной работе пульсационные нагрузки в районе скачка уплотнения, возникающих в условиях наземной экспериментальной отработки моделировались случайно (как во времени, так и в пространстве) меняющимся давлением, приложенном на стенки сопла в зоне скачка уплотнения. Рассматривались два случая пространственной корреляции нагрузки:

- нагрузка – полностью нескоррелированное случайное давление на внутреннюю стенку всех 4-х сопел в зоне отрыва потока с единичной амплитудой, равномерно распределённой на всём расчётном диапазоне частот;
- нагрузка – полностью скоррелированное случайное давление на внутреннюю стенку всех 4-х сопел в зоне отрыва потока с единичной амплитудой, равномерно распределённой на всём расчётном диапазоне частот.

## Конечно-элементная модель.

Для построения конечно-элементной модели использовался [SIMULIA/Abaqus 6.9](#), для расчётов - [SIMULIA/Abaqus 6.10](#). Т.к. особый интерес представлял отклик конструкции на стыке холодной стенки и рёбер межрубашечной системы охлаждения, модель составлялась из Solid-элементов. Внешний вид конечно-элементной модели приведён на рисунке 3. Размер расчётной модели: число элементов: 2 831 857, число степеней свободы: 7 362 475, Minimum memory required: 7 271 Мб.

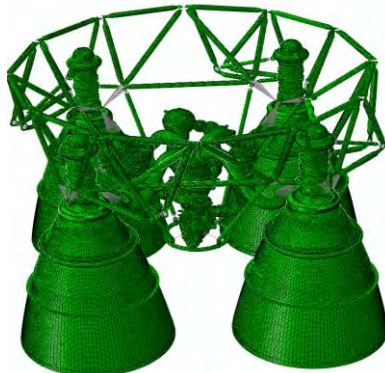


Рисунок 3. Внешний вид КЭМ исследуемого ЖРД.

### Расчёты.

Расчёт в 2 этапа:

- Расчёт собственных значений с записью рестарта;
- Запуск расчёта на отклик на случайное воздействие.

Расчёты велись на рабочей станции со следующими параметрами:

Процессор Intel®Core™ i7 CPU 975 3.33 GHz, RAM 12 Gb

Рассматривалось два варианта последовательности расчётов:

Вариант 1:	Вариант 2:
собственные частоты – Lanzos $t_{\text{расчёта}} = 17 - 30$ ч расчёт на отклик на случайное воздействие $t_{\text{расчёта}} = 15 - 24$ ч	собственные частоты – AMS $t_{\text{расчёта}} = 1 - 3$ ч расчёт на отклик на случайное воздействие $t_{\text{расчёта}} \gg 24$ ч

Вариант 1 оказался более предпочтительным по времени расчёта.

### Результаты.

В результате расчётов были получены динамические характеристики ЖРД: собственные формы и собственные частоты. Вид характерных собственных форм приведён на рисунке 4.

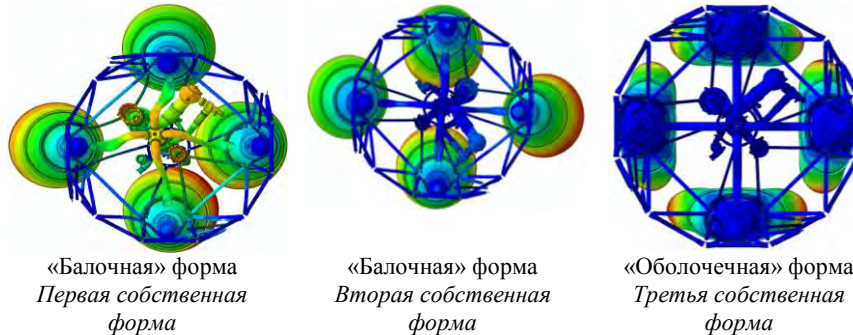


Рисунок 4. Внешний вид нескольких характерных собственных форм исследуемого ЖРД.

При расчётах откликов на нескоррелированное и скоррелированное воздействие было получено, что спектральная плотность напряжений при скоррелированном воздействии на 2 порядка меньше, чем спектральная плотность напряжений при нескоррелированном воздействии (рисунок 5).

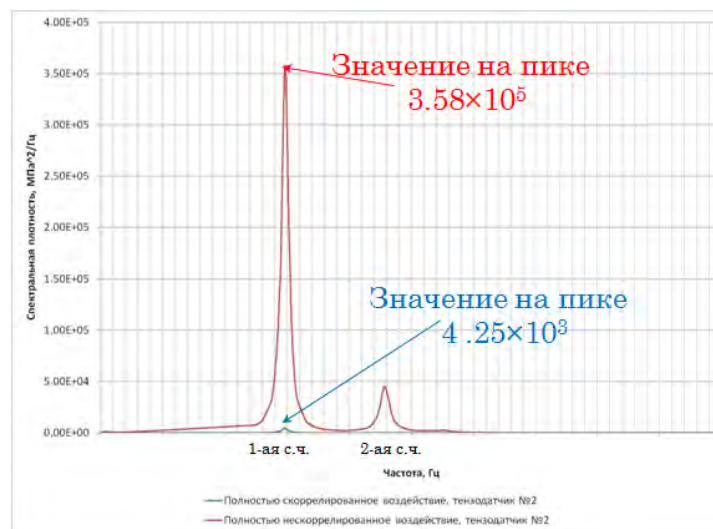


Рисунок 5. Характерный вид распределения спектральной плотности по частотам при воздействии случайного давления в частотном диапазоне 0 – 100 Гц

Сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными (рисунки 6 и 7) показали, что отклик на полностью скоррелированное воздействие на все 4 камеры ЖРД более похож на экспериментальные данные, чем отклик на нескоррелированное воздействие и для более точного моделирования воздействия необходимо подбирать более сложную корреляционную функцию.

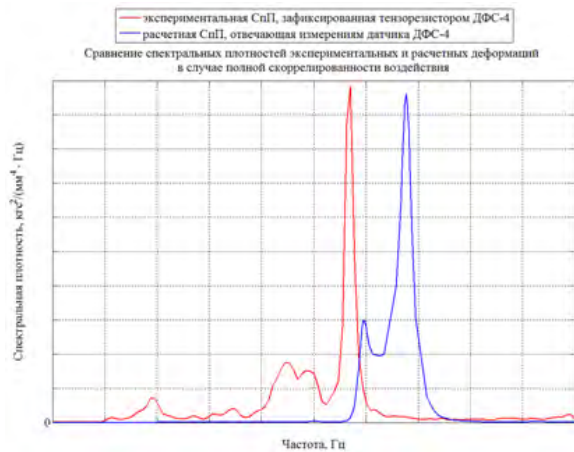


Рисунок 6. Сравнение спектральных плотностей напряжений экспериментально полученных и полученных расчётно в случае полностью скоррелированного воздействия в характерной точке.

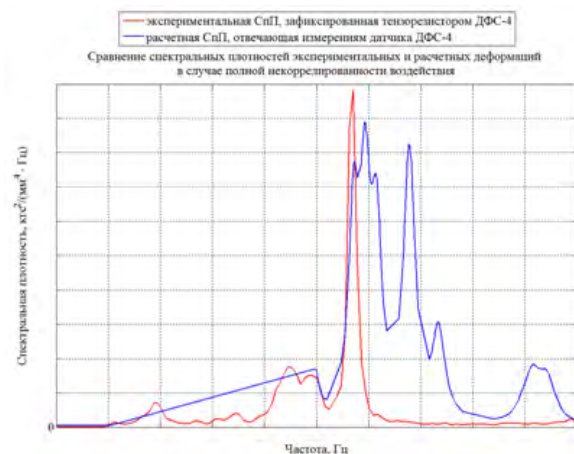


Рисунок 7. Сравнение спектральных плотностей напряжений экспериментально полученных и полученных расчётно в случае полностью нескоррелированного воздействия в характерной точке.

**Заключение.**

В работе были разработаны подробные конечно-элементные модели ЖРД.

Были определены динамические характеристики ЖРД при различных вариантах раскрепления двигателя на экспериментальном стенде.

Проведены расчётные исследования отклика конструкции двигателя на воздействие динамической боковой нагрузки, связанной с испытаниями двигателя в наземных условиях.

Выявлено, что спектральная плотность отклика конструкции на полностью нескоррелированное воздействие на 2 порядка меньше, чем отклик на скоррелированное воздействие.

Выявлено, что, как форма отклика на скоррелированное воздействие, так и восстановленная амплитуда переменного давления на скачке уплотнения, ближе к экспериментальным данным, чем форма отклика и амплитуда для полностью нескоррелированного воздействия.

**Список используемых источников.**

1. Двигатели 1944-2000: Авиационные, ракетные, морские, промышленные. Справочник.