

Моделирование отклика камеры сгорания высотного двигателя на нештатные силовые воздействия при наземных огневых испытаниях

к.т.н. Владимиров С.А., к.ф.-м.н. Титов В.А., Кондратенко М.А., Корнев Д.В.,
Трефилов С.И., д.т.н. Горохов В.Д., к.т.н. Жеребчиков С.Н.
ФГУП ЦНИИмаш, АО КБХА
8(495) 513-59-14, S.A.Vladimirov@tsniimash.ru;
8(495) 513-43-26, KondratenkoMA@tsniimash.ru, DWKornev@tsniimash.ru,
TrefilovSI@tsniimash.ru

Аннотация. В статье предложен расчетно-экспериментальный способ определения среднеквадратических уровней напряжений в подколлекторной зоне камеры высотного четырехкамерного двигателя 14Д23 в условиях наземных огневых испытаний при действии нештатных пульсационных воздействий (боковой силы).

Ключевые слова: ЖРД, боковая сила, линейная система, передаточная функция, корреляционные связи, показания тензорезисторов.

Сопла высотного четырёхкамерного двигателя 14Д23 при наземных огневых стендовых испытаниях, вследствие возникновения скачка уплотнения и отрыва потока, подвергаются нештатным пульсационным воздействиям на внутренние стенки [1]. Нештатные поперечные воздействия на стенку сопла обозначают термином "боковая сила". Боковая сила вызывает колебания напряжений, которые могут быть причиной снижения ресурсной прочности в подколлекторной зоне. Для её оценки необходимо определить амплитуду колебаний напряжений в элементах конструкции, относящихся к указанной зоне. Главной целью работы является оценка среднеквадратических значений амплитуд динамических напряжений, реализующихся в стенке сопла под коллектором, на основе данных тензометрирования внешней стенки камеры двигателя, проведенного в ходе испытаний.

Для решения задачи выбран подход, в котором двигатель рассматривается как линейная система [2], а боковая сила представлена в виде распределенных по внутренней стенке сопла в области отрыва потока случайных пульсаций давления. Варьируемыми величинами являются пульсации давления, критериальными – расчётные аналоги показаний тензорезисторов, вычисляемыми – значения компонент тензора напряжений в критических элементах подколлекторной зоны. При этом варьируемые воздействия задаются взаимными спектральными плотностями, зависящими наперед заданным способом от параметров их интенсивности и характерного размера зоны взаимной корреляции. Спектральные плотности критериальных и вычисляемых величин определяются с использованием передаточных функций в соответствии с [3]. Отклик конструкции по напряжениям рассчитывается для значений пульсаций давления, которые дают такие значения расчетных показаний тензорезисторов, что для разности между экспериментальными показаниями тензорезисторов и их расчетными аналогами выполняется условие минимальности уклонения. Отклик конструкции рассчитывается для всех возможных размеров зон корреляции варьируемых величин. Для поиска наиболее невыгодных режимов, реализующих максимальные напряжения в подколлекторной зоне рассмотрена ситуация полной коррелированности воздействий на каждую камеру со случайным выбором положительного направления пульсации давления, действующего на элементарный участок внутренней поверхности сопла.

Так же выполняется восстановление временных зависимостей компонент тензора напряжений в критических элементах подколлекторной зоны. Значения компонент тензора напряжений получаются путем решения прямой динамической задачи воздействия на камеру набора таких пульсаций давления, для которых соблюдается согласованность экспериментальных и расчетных временных зависимостей показаний тензорезисторов.

Возможности стандартного конечно-элементного пакета оказались недостаточными для реализации указанного подхода по скорости вычислений. Поэтому был разработан специальный алгоритм и соответствующее программное обеспечение. С его помощью проанализированы спектральные характеристики и получены консервативные оценки среднеквадратических значений амплитуд напряжений в критических элементах подколлекторной зоны камеры высотного двигателя 14Д23.

Исходные данные

Среднеквадратические амплитуды напряжений в подколлекторной зоне оцениваются по результатам огневых испытаний РД 0124А №8А и РД 14Д23 в составе установки 14Д23УЭ исходя из показаний шести тензорезисторов ДФС-1,..., ДФС-6, установленных по периметру на одном уровне на внешней поверхности сопла камеры сгорания КСЗ (в районе приварки ее крепления к наружной стенке расширяющейся части сопла на диаметре 125 мм).

На рисунках 1, 2 и 3 приводятся временные зависимости напряжений, вычисленных по показаниям тензорезисторов в одном из испытаний, квазистатические напряжения и амплитуды переменных напряжений для тензорезистора ДФС-1, а также автоспектральные плотности выделенной переменной составляющей напряжений для тензорезисторов ДФС-1,..., ДФС-6.

В качестве исходных данных были взяты наиболее высокие значения среднеквадратических отклонений (СКО) параметров ДФС-1,..., ДФС-6 в частотном диапазоне свыше 1 Гц.

Экспериментальные отклики конструкции рассматриваются как стационарные случайные процессы (на 5 – 10 секундных временных интервалах), а сама конструкция – как линейная система, реагирующая на распределенное по пространству случайное воздействие.

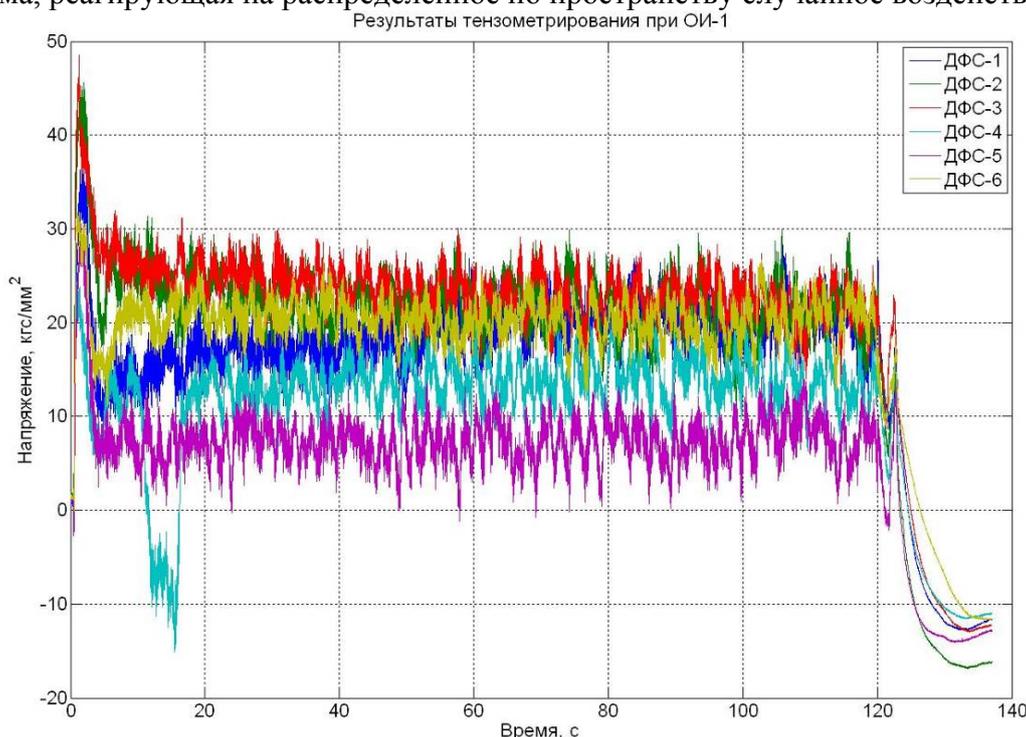


Рисунок 1. Временная зависимость напряжений, вычисленных по показаниям тензорезисторов ДФС-1,...,6 при ОИ-1

В частотном диапазоне свыше 1 Гц автоспектральные плотности напряжений обладают выраженными максимумами на частотах, являющихся для конструкции резонансными. Это подтверждается испытаниями методом сброса статической силы и результатами расчетов динамических характеристик с использованием метода конечных элементов.

Алгоритм восстановления среднеквадратических отклонений компонент тензоров напряжений в критических элементах подколлекторной зоны.

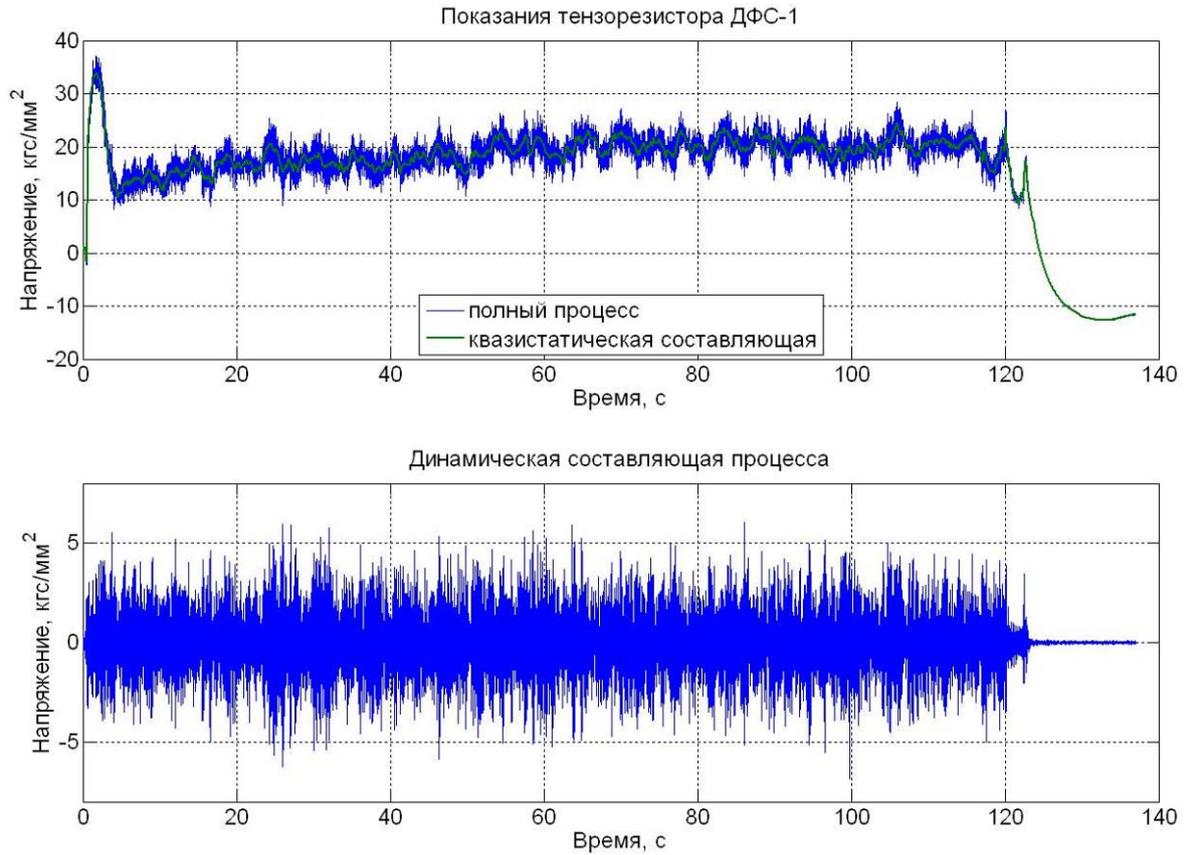


Рисунок 2. Выделение динамической составляющей напряжений, вычисленных по показаниям тензорезистора ДФС-1

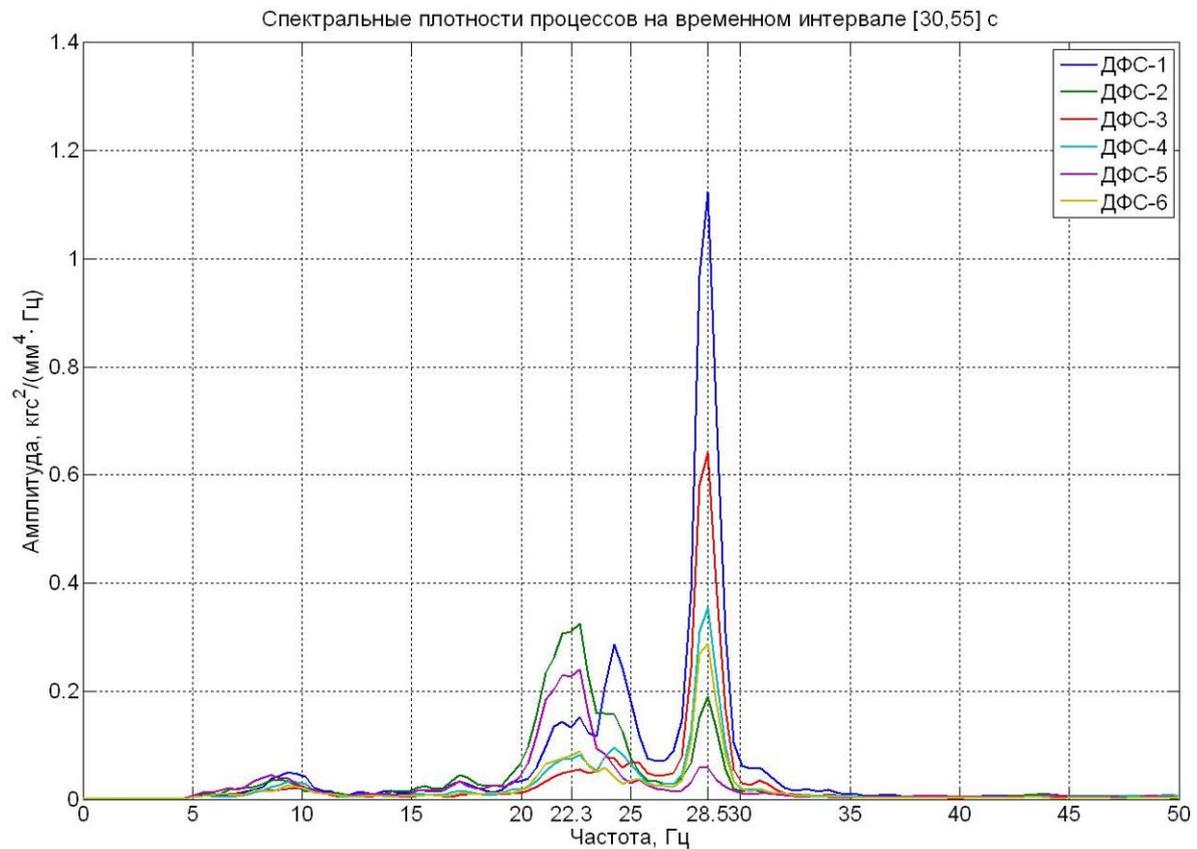


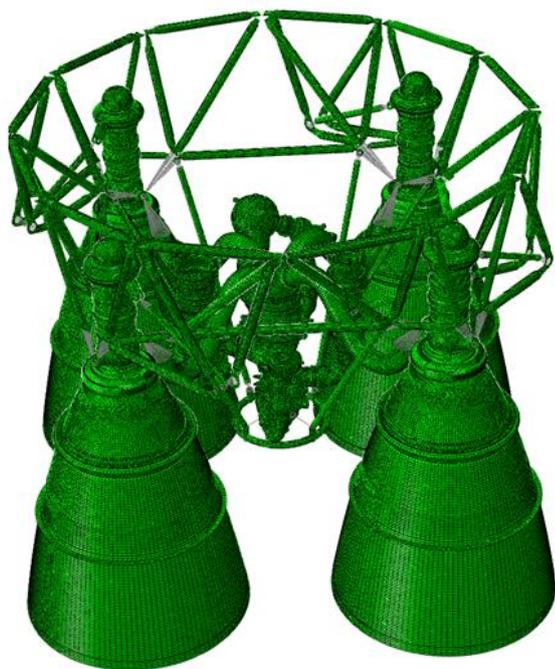
Рисунок 3. Автоспектральные плотности напряжений, вычисленных по показаниям тензорезисторов ДФС-1,...,6 при ОИ-1

Алгоритм естественно разделяется на три составные части:

- 1) расчёт динамических характеристик методом конечных элементов,
- 2) расчёт передаточных функций между единичными значениями пульсаций давлений в зоне скачка уплотнения и значениями деформаций и напряжений,
- 3) вычисление интенсивностей нештатных пульсаций давления по выбранной модели воздействия и вычисление соответствующих СКО компонент тензоров напряжений в критических элементах.

Для вычисления параметров отклика конструкции используются заранее рассчитанные и сохранённые на жёсткий диск значения передаточных функций. Операция загрузки коэффициентов форм колебаний и передаточных функций в память выполняется один раз перед расчетами (эта операция не занимает много времени, но при этом она является наиболее медленной во второй части алгоритма).

Параметры необходимых для расчета динамических характеристик двигателя 14Д23 вычисляются с использованием разработанной конечно-элементной модели (КЭМ), описываемой своими матрицами масс M и жесткости L . В КЭМ подробно смоделированы рёбра межрубашечной системы охлаждения в подколлекторной зоне камеры двигателя (см. рисунок 4). Расчёт собственных частот ω_m и форм колебаний $\vec{\Phi}_m(\vec{X})$ проведён методом Ланчоса с нормированием собственных форм по приведенной массе путем решения уравнений $L\vec{\Phi}_m(\vec{X}) = \omega_m^2 M\vec{\Phi}_m(\vec{X})$.



Конечно-элементная модель -
межрубашечная система
охлаждения

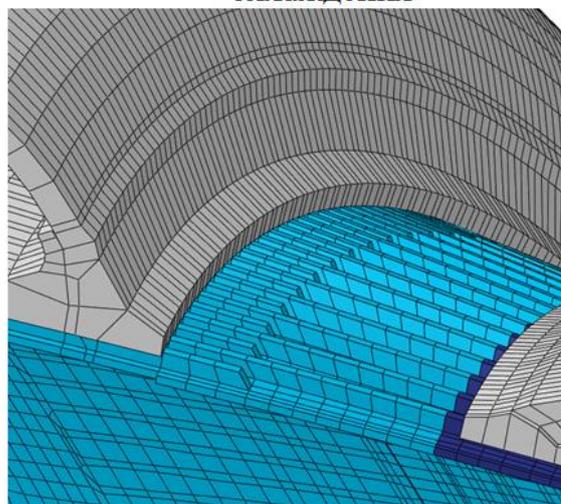


Рисунок 4. Внешний вид конечно-элементной модели двигателя 14Д23

В подмоделях камер выделены совокупности элементов $P_n^{(l)}$, к поверхностям которых прикладывается переменное давление. Эти элементы для каждой камеры с индексом l обозначены номерами $n = 1, 2, \dots, N$. Предполагается, что пульсации давления на элементы $P_{n_1}^{(l_1)}$ и $P_{n_2}^{(l_2)}$, где $l_1 \neq l_2$ некоррелированы между собой.

Обозначим через $S(\omega; P_{n_1}^{(l_1)}, P_{n_2}^{(l_2)})$ взаимную спектральную плотность пульсаций давлений, действующих на поверхности элементов $P_{n_1}^{(l_1)}, P_{n_2}^{(l_2)}$. Обозначим через $\vec{R}_n^{(l)}$ радиус-вектор центра тяжести площадки элемента $P_n^{(l)}$, к которой прикладывается давление. В соответствии с [3] будем считать, что коррелированность воздействий на две различные площадки

определяется расстоянием между их центрами тяжести. Будем рассматривать класс функций $S(\omega; P_{n_1}^{(l)}, P_{n_2}^{(l)})$ вида:

$$S(\omega; P_{n_1}^{(l)}, P_{n_2}^{(l)}) = pQ(\omega; \|\bar{R}_{n_1}^{(l)} - \bar{R}_{n_2}^{(l)}\|), \quad (1)$$

$$\text{где: } Q(\omega; 0) = 1, \quad Q(\omega; r) \in (0, 1) \text{ для } r > 0. \quad (2)$$

В такой ситуации автоспектральная плотность воздействия для фиксированной площадки характеризует белый шум с интенсивностью p . Множитель $Q(\omega, r)$ описывает распределение корреляционных связей по пространству.

В работе рассмотрены три корреляционных модели воздействия.

Первая модель $Q(\omega, r) = \exp(-Ar)$, $A > 0$, описывает случай, когда влияние друг на друга воздействий на различные элементы не зависит от частоты, а зависит лишь от расстояния между ними (чем больше расстояние – тем меньшая корреляция воздействий). Параметр A описывает характерный размер зоны корреляции.

Вторая модель $Q(\omega, r) = \exp(-A|\omega|r)$, $A > 0$, учитывает зависимость взаимного влияния воздействий от частоты. Здесь для двух фиксированных элементов коррелированность воздействия убывает с ростом частоты.

Наконец, третья модель $Q(\omega, r) = 1$ описывает случай полной корреляции.

Обозначим через T_k дисперсию переменной составляющей напряжений, вычисленных по показаниям тензорезистора ДФС- k на частотном диапазоне измерений. Пусть $R_k^{(1)}$ – расчетное значение параметра T_k при воздействии единичного переменного давления и выбранной функции $Q(\omega, r)$ или, в случае полной скоррелированности воздействия, фиксированным вариантом выбора положительных направлений пульсаций давлений на элементы. Искомое значение нормирующего величину интенсивностей пульсаций давления множителя p является результатом минимизации невязки $r = \sum_k (pR_k^{(1)} - T_k)^2$.

Площадки, на которые действуют пульсации давления при конечно-элементном моделировании, имеют форму четырехугольников с вершинами в узлах $\bar{X}_{n,q}^{(l)}$, здесь $q = 1, 2, 3, 4$, значения l, n – отвечают индексации конечного элемента в подмодели камеры, которому принадлежит площадка. Преобразуем единичное давление, прикладываемое к площадкам, к четырем приложенным в узлах $\bar{X}_{n,q}^{(l)}$ силам $\bar{F}_{n,q}^{(l)}\delta(\bar{X} - \bar{X}_{n,q}^{(l)})$, ориентированным по направлению изнутри камеры сгорания наружу.

Передаточная функция показаний тензорезистора ДФС- k от пульсаций единичного давления, приложенного к соответствующим поверхностям элемента с номером n , принадлежащего соплу камеры с номером l , имеет вид:

$$H_{n,k}^{(l)}(\omega) = E \sum_{m=1}^3 \frac{(x_m^k - y_m^k)}{\sum_{p=1}^3 (x_p^k - y_p^k)^2} \sum_{j=1}^4 \frac{\{\bar{F}_{n,q}^{(l)}, \bar{\Phi}_j(\bar{X}_{n,q}^{(l)})\}}{\omega_j^2 - \omega^2 + i \frac{\delta\omega\omega_j}{\pi}} \{\bar{\Phi}_j(\bar{Z}_k^{(1)}) - \bar{\Phi}_j(\bar{Z}_k^{(2)}), \bar{e}_m\}, \quad (3)$$

где: $\bar{Z}_k^{(1)} = (x_1^k, x_2^k, x_3^k)$, $\bar{Z}_k^{(2)} = (y_1^k, y_2^k, y_3^k)$ координаты узлов модели, образующие базу тензорезистора ДФС- k , δ – логарифмический декремент колебаний конструкции; E – модуль Юнга материала, на который наклеиваются тензорезисторы; $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ – орты глобальной системы координат.

Взаимные спектральные плотности показаний тензорезистора ДФС- k и ДФС- j $U_{kj}(\omega)$ представляются в виде [2, 3]:

$$U_{kj}(\omega) = \sum_{l=1}^4 \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N H_{n_1,k}^{(l)}(\omega) H_{n_2,j}^{*(l)}(\omega) K(P_{n_1}^{(l)}) K(P_{n_2}^{(l)}) S(\omega; P_{n_1}^{(l)}, P_{n_2}^{(l)}). \quad (4)$$

Если положительное направление прикладываемой пульсации давления ориентировано “изнутри наружу”, положим $K(P_n^{(l)}) = 1$. В противном случае $K(P_n^{(l)}) = -1$.

Далее, пусть в точке \vec{X} подколлекторной зоны сопла камеры известны отвечающие собственным формам колебаний тензоры напряжений $\Sigma_j(\vec{X})$. Взаимная спектральная плотность компонент тензора напряжений в этой точке рассчитывается по формуле, аналогичной (4), в которой выражения для соответствующих передаточных функций (записанные в тензорном виде) имеют вид:

$$\Xi_n^{(l)}(\omega) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\sum_{q=1}^4 \left\{ \vec{F}_{n,q}^{(l)}, \vec{\Phi}_j(\vec{X}_{n,q}^l) \right\}}{\omega_j^2 - \omega^2 + i \frac{\delta\omega\omega_j}{\pi}} \Sigma_j(\vec{X}). \quad (5)$$

Интегрирование по частотному диапазону измерений от 0 до 50 Гц полученных формул позволяет определить дисперсии пульсаций тензоров напряжений в подколлекторной зоне.

В общей сложности по первой и второй корреляционным моделям было рассмотрено 30000 случайно выбранных реализаций пульсационных нагрузок. Для случая полной коррелированности входного воздействия рассмотрено 20000 случайно выбранных реализаций наборов коэффициентов $K(P_n^{(l)})$.

Расчетное восстановление временных зависимостей компонент тензора напряжений в критических элементах подколлекторной зоны.

Обозначим через $p_n^{(l)}(t)$, $t \in [0, T]$ задаваемую временную зависимость пульсационного давления, действующего на грань элемента с номером n и принадлежащего камере с индексом l . Представим эти временные зависимости в форме разложений в ряд Фурье:

$$p_n^{(l)}(t) = \sum_k c_{n,k}^{(l)} \exp(i\lambda_k t), \quad \lambda_k = \frac{2\pi}{T} k. \quad (6)$$

Разложим временную зависимость $D_m(t)$ показаний ДФС- m в ряд Фурье:

$$D_m(t) = \sum_k d_{m,k} \exp(i\lambda_k t). \quad (7)$$

Поскольку фиксируемые тензорезистором временные зависимости обусловлены пульсационными составляющими, имеем:

$$\sum_k d_{m,k} \exp(i\lambda_k t) = \sum_l \sum_n \sum_k c_{n,k}^{(l)} H_{n,m}^{(l)}(\lambda_k) \exp(i\lambda_k t) \quad (8)$$

и, стало быть,

$$d_{m,k} = \sum_l \sum_n c_{n,k}^{(l)} H_{n,m}^{(l)}(\lambda_k). \quad (9)$$

Такие условия выписываются для каждого фиксированного k и для тех значений m , которые отвечают показаниям тензорезисторов, на основании которых восстанавливаются временные зависимости. Для решения получаемых сильно переопределенных систем линейных уравнений используется алгоритм вычисления псевдообратной матрицы (Moore-Penrose). Отклик конструкции по напряжениям вычисляется с использованием формулы:

$$\Sigma(t) = \sum_k \sum_{l=1}^4 \sum_n c_{n,k}^{(l)} \Xi_n^{(l)}(\lambda_k) \exp(i\lambda_k t). \quad (10)$$

Результаты расчетов

С помощью разработанного алгоритма выполнены расчеты деформаций в точках расположения тензорезисторов и напряжений в подколлекторной зоне для большого количества реализаций различных корреляционных моделей входных воздействий.

Получена статистическая информация о возможных уровнях колебаний напряжений в

подколлекторной зоне сопла камеры при его испытаниях (суммарно рассмотрено порядка 50000 реализаций различных режимов нагружения). Установлено, что СКО амплитуд колебаний компонент тензора напряжений в рассмотренных элементах для самых неблагоприятных моделей пульсационного воздействия не превосходят СКО динамических составляющих напряжений, вычисленных по показаниям тензорезисторов ($\sigma_{\text{мин}}=10,7$ МПа), а в основном оказываются в 2-3 раза меньше.

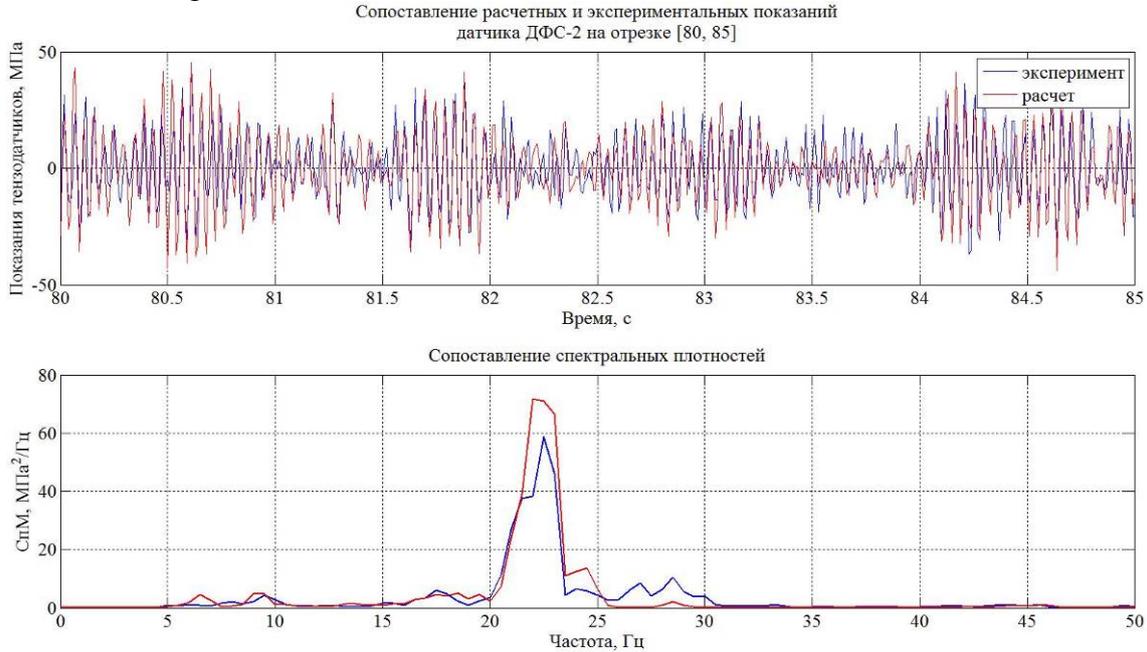


Рисунок 5. Сопоставление временных зависимостей и спектральных плотностей исходных и расчетных напряжений, вычисленных по показаниям тензорезисторов

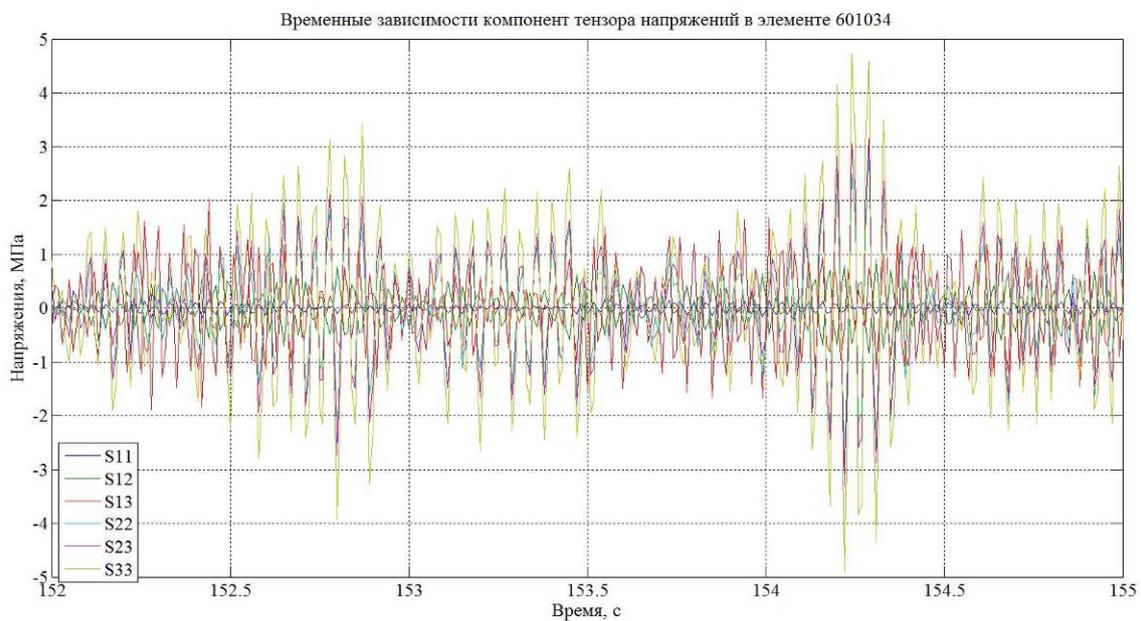


Рисунок 6. Реконструированные компоненты тензора напряжений в одном из критических элементов подколлекторной зоны

Выполнено расчетное восстановление временных зависимостей колебаний компонент тензора напряжений в критических элементах подколлекторной зоны (см. рисунки 5 и 6.) На рисунке 5 представлены исходные временная зависимость и автоспектральная плотность напряжений, вычисленных по показаниям тензорезистора ДФС-2 на одном из временных ин-

тервалов, и те же данные, полученные в результате решения прямой задачи динамики по реконструированным пульсациям давления. На рисунке 6 изображены расчётные временные зависимости компонент тензора напряжений в одном из критических элементов подколлекторной зоны.

Выводы

Разработан метод восстановления амплитуд переменных деформаций и напряжений во всей конструкции, основанный на результатах выборочного тензометрирования. Хорошее совпадение временных зависимостей и спектральных плотностей расчётных напряжений и напряжений, вычисленных по записанным при огневых наземных испытаниях двигателя РД-0124А показаниям тензорезисторов ДФС-1, ..., ДФС-6, подтверждает работоспособность метода. Предлагаемый алгоритм применим к любым линейным динамическим системам.

Результаты математического моделирования свидетельствуют о том, что нештатные колебания камер двигателя 14Д23 с полноразмерными соплами при огневых испытаниях в наземных условиях, обусловленные нерасчётным истечением горячих газов и наличием внутри сопла скачка уплотнения, приводят к появлению динамических напряжений в подколлекторной зоне, амплитуда которых в 2-3 раза меньше амплитуд напряжений, вычисленных по показаниям тензорезисторов ДФС-1, ..., ДФС-6.

Литература

1. Архипов А.Б., Горохов В.Д. и др. Решение проблем наземных испытаний ЖРД РД0124А со штатными высотными соплами. Научно-технический юбилейный сборник КБ химавтоматики: В 3 томах / Под ред. В.С. Рачука. Воронеж: «Кварта», 2012. Т. 1. с. 82 – 86.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989.
3. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979.