

УДК 534.1: 629.73.

## **Динамическое состояние конструкции авиационного изделия со сварными соединениями**

**Зарецкий М.В.<sup>1\*</sup>, Сидоренко А.С.<sup>2\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*Ижевский электромеханический завод «Купол»,*

*ул. Песочная, 3, Ижевск, 426033, Россия*

<sup>2</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [iemz@kupol.ru](mailto:iemz@kupol.ru)*

*\*\*e-mail: [k906@mai.ru](mailto:k906@mai.ru)*

### **Аннотация**

Представлены результаты разработки численных моделей и данные расчетной оценки характеристик вибрационных ускорений конструкции авиационного изделия, содержащей непрерывные сварные соединения, при действии случайной стационарной кинематической нагрузки. Получены зависимости для спектральных характеристик и уровней вибрационных ускорений в различных точках конструкции изделия и сварных швов. Определены зоны и значения максимальных уровней вибрации при случайной нагрузке, соответствующей условиям совместного полета изделия с носителем. Показано существенное влияние конфигурации сварных соединений на уровни виброускорений в зоне сварных швов.

**Ключевые слова:** конструкция, динамическое состояние, сварное соединение, случайные колебания, метод конечного элемента, вибрационное ускорение, спектральная плотность.

## Введение

На авиационное изделие, транспортируемое на самолете-носителе, действует вибрация, которая может привести к частичному или полному разрушению его конструкции. Поэтому оценка вибродинамического состояния авиационных изделий является актуальной научно-технической задачей и необходима для оценки и подтверждения характеристик вибрационной прочности. На уровне вибрационных нагрузок и на динамическое состояние конструкции авиационного изделия в целом оказывают влияние такие факторы как режим полета, особенности конструкции самолета и узлов подвески, условия размещения изделий и т.д. Нагрузки, возникающие во время совместного полета, могут вызвать относительно высокий уровень напряжений в зонах нерегулярностей конструкции, которые могут оказать существенное влияние на накопление усталостных повреждений.

При отсутствии экспериментальных данных, необходимые характеристики динамического состояния изделия могут быть получены расчетным путем с использованием современных систем численного моделирования. Расчетные модели колебаний конструкций летательных аппаратов и авиационных изделий содержатся в книгах [1, 2, 3]. В этих исследованиях рассматривалась модель конструкции в виде балки на изолированной подвеске, к которой приложены внешние динамические воздействия в узлах соединения с носителем. Движение изделия определялось как

поперечные колебания балки с переменными жесткостными и массовыми характеристиками в вертикальной плоскости при учете относительно небольшого количества форм колебаний. При этом предполагалось, что заданы характеристики вибрации в узлах подвески изделия и не учитывалось влияние нерегулярностей конструкции в виде соединений и резких изменений поперечных сечений. Характерным видом нерегулярностей являются сварные соединения, которые могут существенно изменять напряженно-деформированное состояние и влиять на прочность конструкции [4, 5, 6]. Исследования характеристик напряженного состояния и прочности тонкостенных конструкций в локальных зонах сварных соединений [7, 8, 9, 10] показывают актуальность проблемы оценки влияния сварных соединений на динамическое деформирование конструкций.

Целью настоящей работы является разработка и реализация методики математического моделирования динамического состояния тонкостенной конструкции авиационного изделия, содержащей сварное соединение. Динамическое деформирование конструкции вызывается кинематическим возбуждением воспроизводящем действие реальных полетных нагрузок. Для кинематического воздействия используется обоснованная модель динамических нагрузок на летательные аппараты в виде широкополосного случайного процесса [11]. Новизной разработанных моделей является учет особенностей реальной конструкции в виде непрерывных сварных соединений элементов конструкции (бугеля и корпуса) изделия.

## Методика численного моделирования конструкции

Для случая расчета реальных конструкций, в которых распределение массы и жесткости имеют сложные зависимости, использование приближенных аналитических методов требует введения существенных упрощающих предположений.

В настоящей работе для создания расчетной модели конструкции изделия используются геометрические характеристики реальной конструкции, распределение массы элементов, механические характеристики материалов.

Исследуемым объектом является отсек авиационного изделия, который состоит из оболочки-обечайки и узла подвески (бугеля) (рис. 1). Толщина, радиус и длина оболочки принимаются 2.5, 155 и 400 мм соответственно. При моделировании принималось, что узел подвески и обечайка не имеют непосредственного соединения между собой по соприкасающимся поверхностям, но с помощью сварного шва объединены в единую конструкцию. Случайные кинематические нагрузки передаются на конструкцию через узел подвески, который обеспечивает жесткое закрепление конструкции по всем направлениям.

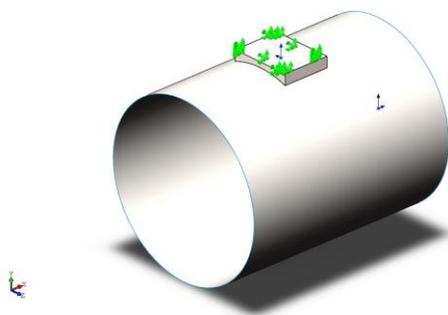


Рис. 1. Отсек изделия

Для моделирования динамического состояния авиационного изделия применяется система твердотельного моделирования и конечно-элементного расчета сложных конструкций SolidWorks Simulation [12]. Разработаны оболочечные конечно-элементные модели (КЭМ) конструкции авиационного изделия с различными типами сварного соединения бугеля к обечайке: сварные швы по двум сторонам (рис. 2) и сплошной шов по периметру бугеля (рис. 3). Для моделирования конструкции использовались конечные элементы типа SOLID (объемный элемент) и SHELL (оболочечный элемент). Элементы типа SOLID представляют собой объемные десятиузловые параболические тетраэдральные КЭ, которые используются при создании трехмерных структурных расчетных моделей и позволяют моделировать конструкции содержащие нерегулярности, достаточно хорошо описывают изменения напряжений и перемещений. Четырехузловые плоские элементы SHELL, обладающие изгибной и мембранной жесткостью, имеют шесть степеней свободы в каждом узле и характеризуется толщиной и физическими свойствами материала. При моделировании—наиболее подробно воспроизводятся жесткостные и массовые характеристики тех частей конструкции, через которые передаются динамические нагрузки и которые оказывают основное влияние на динамическое состояние.

В качестве глобальной системы координат принята прямоугольная правосторонняя система координат с началом в центре поперечного сечения, соответствующего центру масс изделия. Ось X модели совпадает с продольной осью изделия и направлена по полету; ось Y направлена вверх.

Демпфирующие свойства конструкции изделия описываются с использованием обобщенной модели Рэлея, которая описывает действие внешних и внутренних диссипативных сил пропорциональных соответственно массе и жесткости конструкции. Диссипативный оператор имеет вид  $\alpha [M] + \beta [C]$ . Первое слагаемое является линейной моделью вязкого внешнего трения. В этом случае диссипативный оператор пропорционален инерционному оператору  $[M]$ . Второе слагаемое соответствует использованию модели Фойхта для описания вязкоупругого поведения конструкции, когда диссипативный оператор пропорционален упругому оператору  $[C]$ .

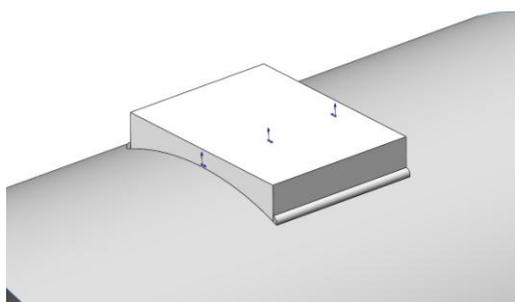


Рис. 2. Швы по двум сторонам

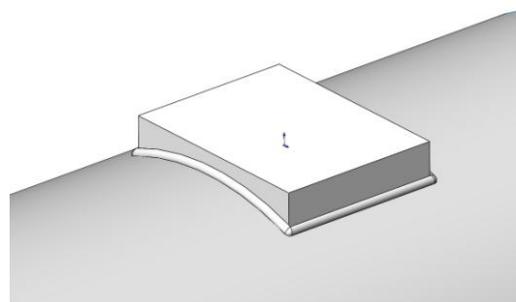


Рис. 3. Сплошной шов по периметру

На рис. 3, 4 представлены КЭМ конструкций, соответствующие двум вариантам сварного соединения бугеля и обечайки: сварные швы по двум сторонам бугеля (вариант 1) и сплошной замкнутый шов (вариант 2). Обечайка изделия набрана элементами типа SHELL. Для моделирования узла подвески и сварного шва используются элементы SOLID.

При моделировании конструкции в окрестности сварного соединения формируется нерегулярная КЭ сетка на бугеле и оболочке с последовательным изменением размеров элементов.

Для обеспечения корректности соединения КЭ различной при создании трехмерной модели конструкции обечайка моделируется как цилиндрическая поверхность, а узел крепления как твердотельный элемент. При подготовке расчетной модели задается тип создаваемой сетки – комбинирования сетка

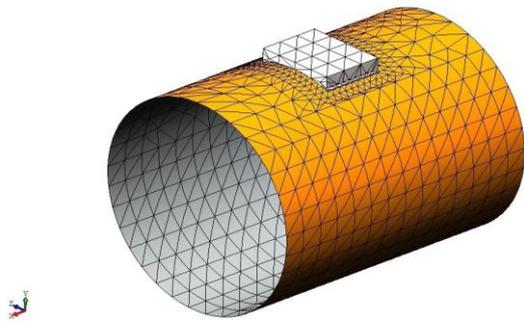


Рис. 3. КЭМ (вариант соединения 1)

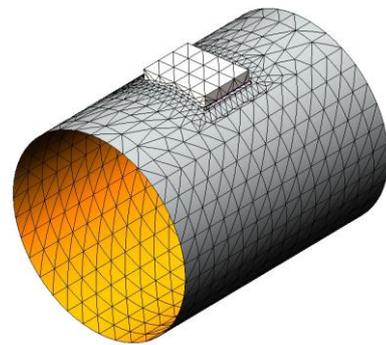
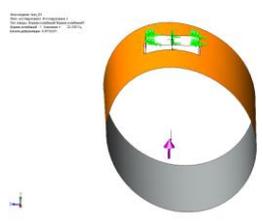
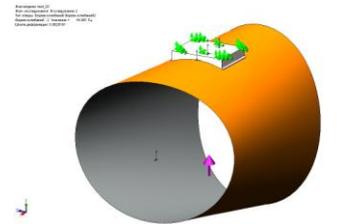
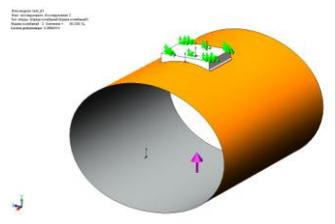
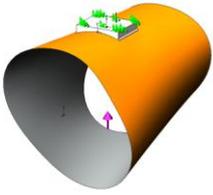
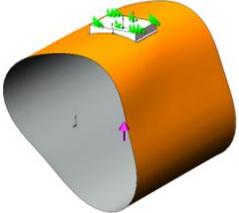
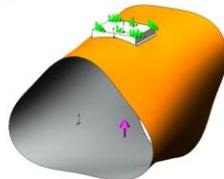


Рис. 4. КЭМ (вариант соединения 2)

На первом этапе проводится определение собственных форм и частот колебаний конструкции. Собственные формы колебаний и соответствующие им значения частот для различных конфигураций сварного соединения представлены в таблице.

Таблица

	 1 форма	 2 форма	 3 форма
шов по двум сторонам	20.555 Гц	40.959 Гц	56.051 Гц
шов сплошной	20.664 Гц	40.933 Гц	56.427 Гц

	 <p>4 форма</p>	 <p>5 форма</p>	 <p>7 форма</p>
ШОВ ПО ДВУМ СТОРОНАМ	93.532 Гц	117.13 Гц	193.27 Гц
ШОВ СПЛОШНОЙ	93.869 Гц	117.72 Гц	194.41 Гц

На следующем этапе исследований определяются характеристики виброускорений при возбуждении конструкции случайным стационарным процессом с модельной спектральной плотностью ускорения («белый» шум). Кинематическая нагрузка на конструкцию изделия задается во всех узлах КЭМ бугеля, которые закреплены по всем направлениям.

### Результаты численного анализа

Динамический расчет конструкции выполняется с применением алгоритмов модального анализа для случайных процессов. В этом типе анализа используется разложение вектора узловых перемещений в ряд по собственным формам и последующее решение системы. При анализе задается количество учитываемых собственных форм и параметры пошагового динамического анализа – интервал и шаг интегрирования, метод и параметры процедуры интегрирования, характеристики демпфирования.

Расчеты выполнены для случая нагружения, при котором колебания конструкции вызываются кинематическим возбуждением бугеля от узлов подвески на носителе в форме стационарного случайного процесса ускорения по оси Y с

заданной постоянной спектральной плотностью («белый» шум) со значением спектральной плотности  $10 \text{ (м}^2/\text{с}^4) / \text{Гц}$  и средним квадратическим отклонением (СКО) равным  $63,25 \text{ м/с}^2$  в диапазоне частот  $(0 - 400) \text{ Гц}$  (рис. 6). При этом учитывается влияние постоянной гравитационной нагрузки на колебания конструкции [13].

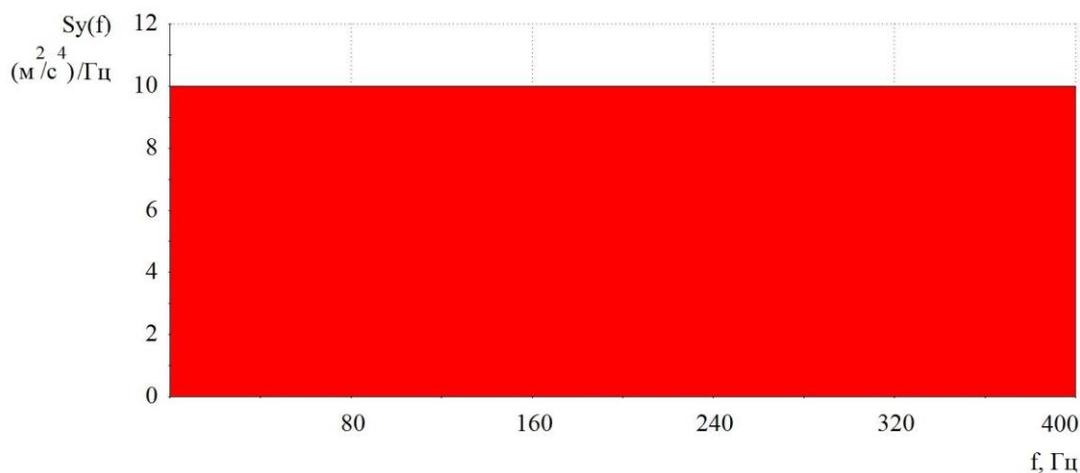


Рис. 6. Спектральная плотность ускорения бугеля

Вычислялись характеристики составляющих ускорения по оси  $Y$  и результирующее ускорение для различных узлов КЭМ и рассматриваемых вариантов сварного соединения, показанных. Для подтверждения корректности результатов численного анализа проводились вычисления с последовательным дроблением КЭ сетки в зоне сварного соединения. Использовались КЭ модели с характерными размерами элементов 15 и 10 мм. Получено, что в данном диапазоне изменения размеров элементов относительно изменение максимальных уровней ускорений не превышает 1%. Приведенные далее результаты вычислений получены для характерных размеров элементов равных 10 мм.

Распределение уровней виброускорений в конструкции на фиксированной частоте, соответствующей 3-й собственной форме для случаев сварного соединения

по двум сторонам бугеля и сплошного замкнутого шва показаны на рис. 7 и 8 соответственно.

Для заданных условий нагружения в обоих случаях наибольшие уровни ускорения, соответствующие 3-й собственной форме имеют место в торцевых зонах обечайки изделия и на одной образующей (узлы 733 и 1433). Максимальные значения СКО ускорения в этих узлах различаются несущественно и составляют  $379 \text{ м/с}^2$  и  $383 \text{ м/с}^2$  соответственно.

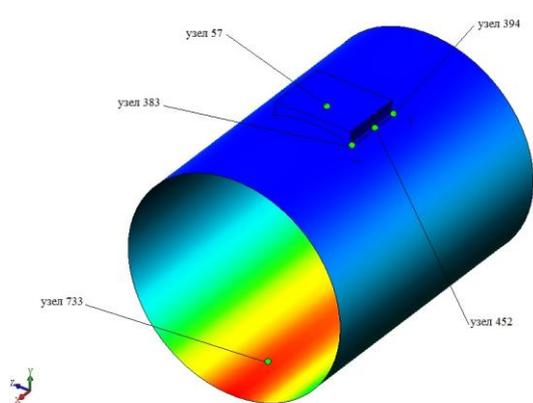


Рис. 7.

Виброускорения (вариант соединения 1)

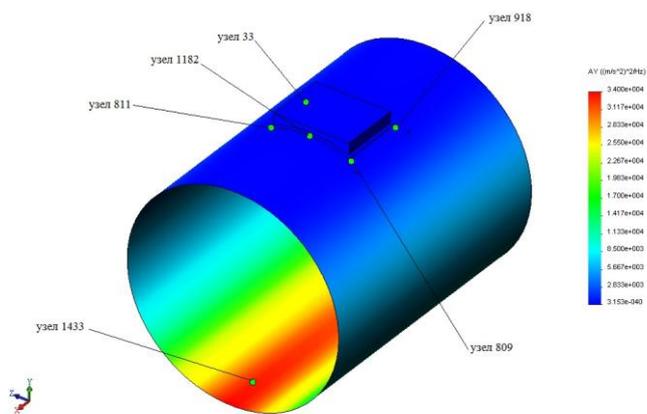


Рис. 8

Виброускорения (вариант соединения 2)

Результаты вычислений спектральных плотностей ускорения в направлении оси  $Y$  ( $S_y(f)$ ) для случаев сварного соединения по двум сторонам бугеля и сплошного шва показаны на рис. 9, 10 и соответственно. Приведенные зависимости, соответствуют узлам КЭМ в различных точках сварного шва и конструкции изделия, показанных на рис. 7 и 8. Видно, что увеличение длины сварного шва приводит к резкому увеличению значений спектральной плотности ускорения на сварном шве, что следует из сравнений зависимостей для одинаковых точек сварных швов на рис. 9 (узлы 383, 384) и 10 (узлы 809, 918). При этом наибольшие уровни

реакции наблюдаются на пересечении сварных швов 10 (узлы 809, 918). Это соответствует расчетным данным работы [14], в которой показано, что "особую опасность представляют места пересечения стыка с боковой поверхностью соединения - угловые точки".

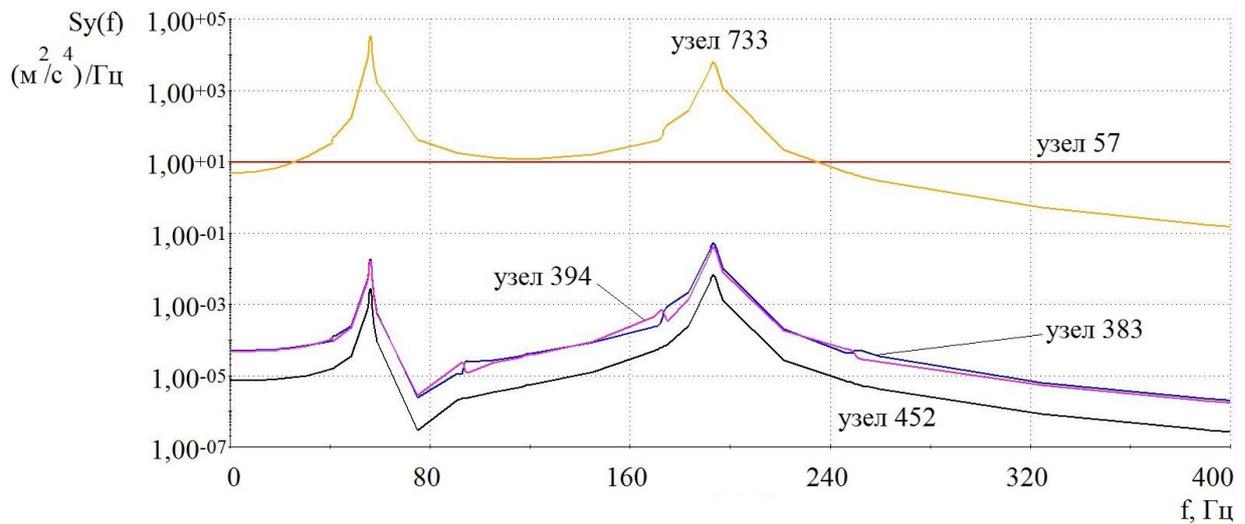


Рис. 9. Спектральная плотность виброускорений по Y (вариант соединения 1)

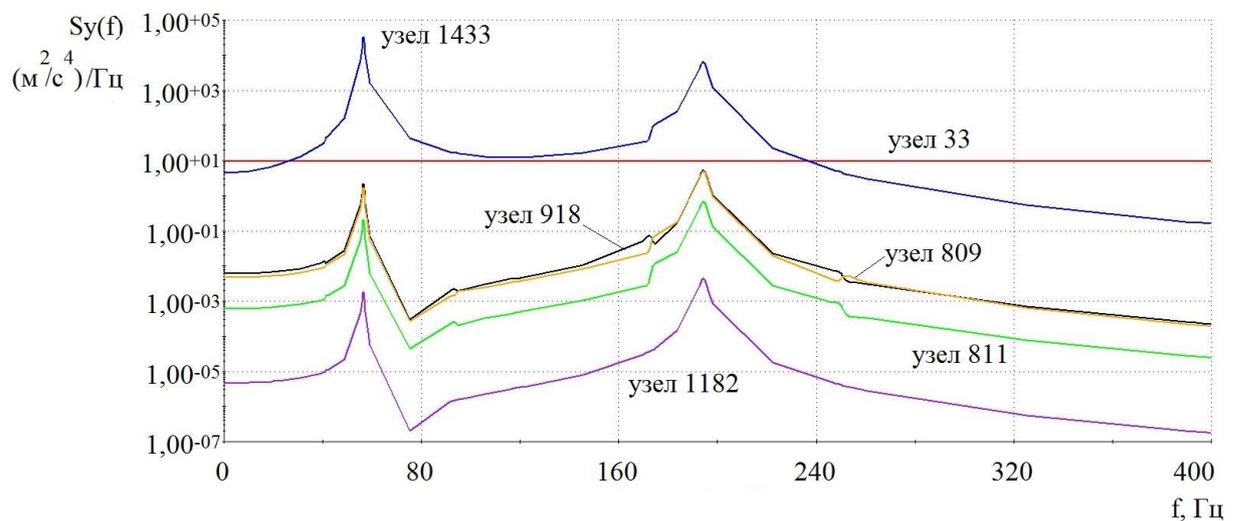


Рис. 10. Спектральная плотность виброускорений по Y (вариант соединения 2)

Спектральные плотности результирующего ускорения  $S_{rez}(f)$  для случаев сварного соединения по двум сторонам бугеля (в узлах 733, 383) и сплошного шва (в узлах 1433, 809) представлены на рис. 11 и 12 соответственно. Результирующее

ускорение определяется как абсолютное значение алгебраической суммы составляющих ускорения при поступательном движении по трем осям и повороте вокруг этих осей. Из сравнения графиков на рис. 9, 11 и 10, 12 следует, что уровни результирующего ускорения незначительно превышают уровни ускорения в направлении оси  $Y$  для обоих вариантов сварного шва.

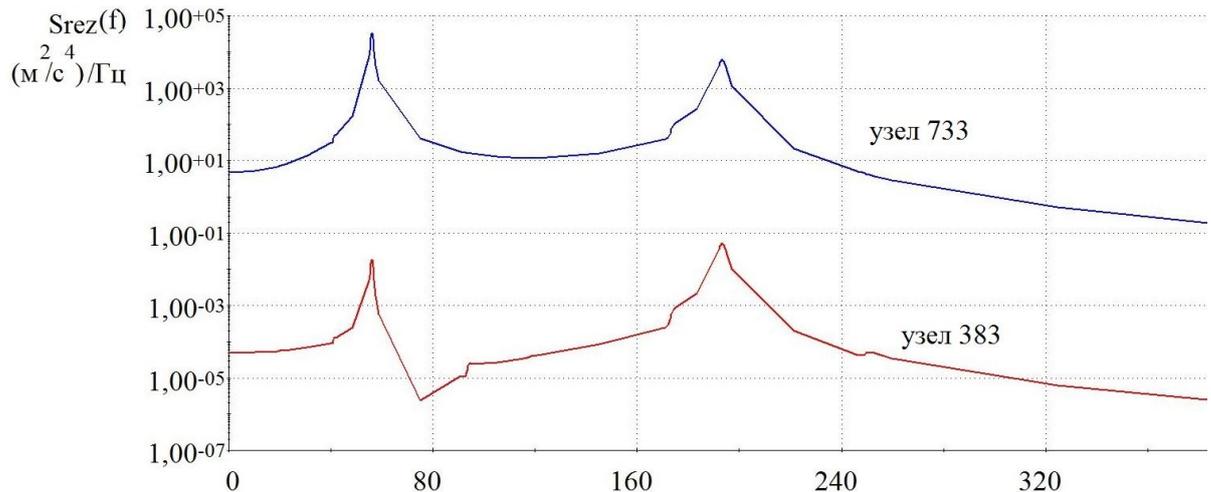


Рис. 11. Спектральные плотности результирующих ускорений (соединение 1)

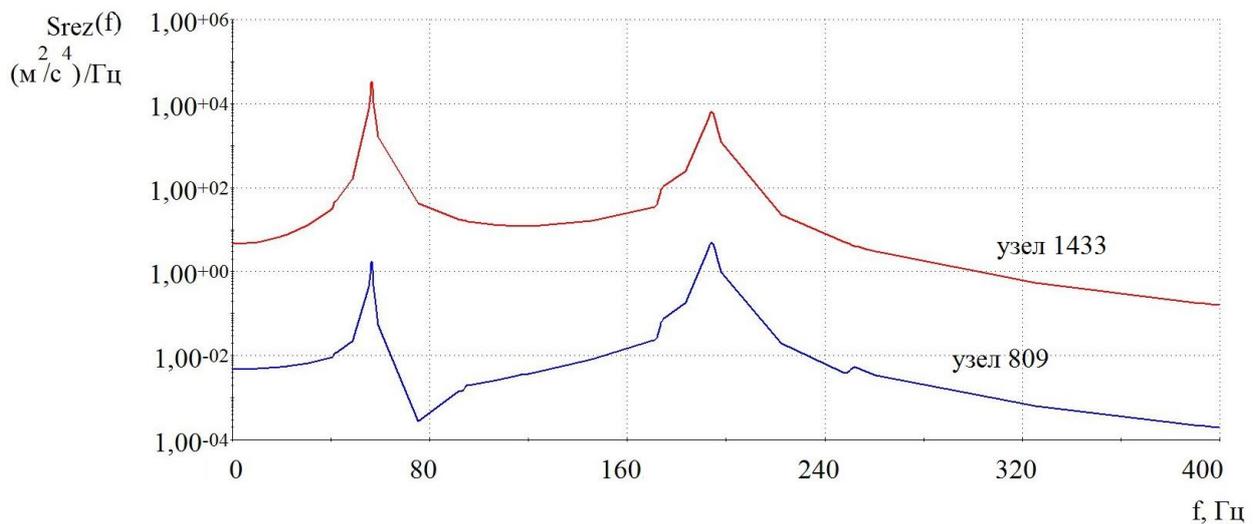


Рис. 12 Спектральные плотности результирующих ускорений (соединение 2)

Изменение дисперсий ускорения по оси  $Y$  ( $D_y$ ) по частотному диапазону для случаев сварного соединения по двум сторонам бугеля и сплошного сварного шва

проиллюстрировано на рис. 13 (дисперсия 1) и 14 (дисперсия 2). Видно, что основной вклад в дисперсию дают составляющие виброускорения в диапазоне от 50 до 200 Гц и соответствующие 3-й и 7-й собственным формам колебаний конструкции.

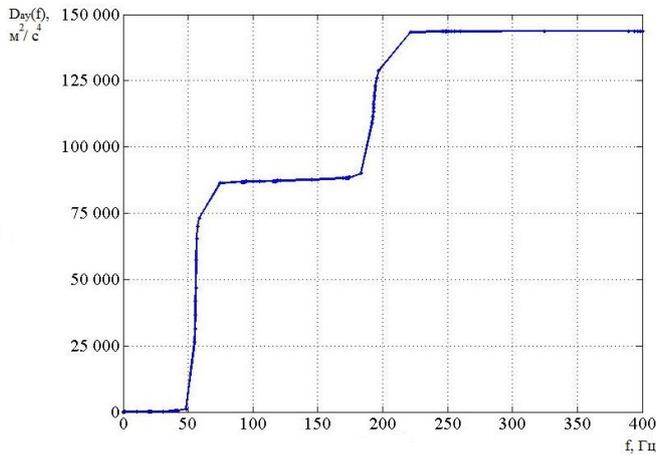


Рис. 13. Дисперсия ускорения 1

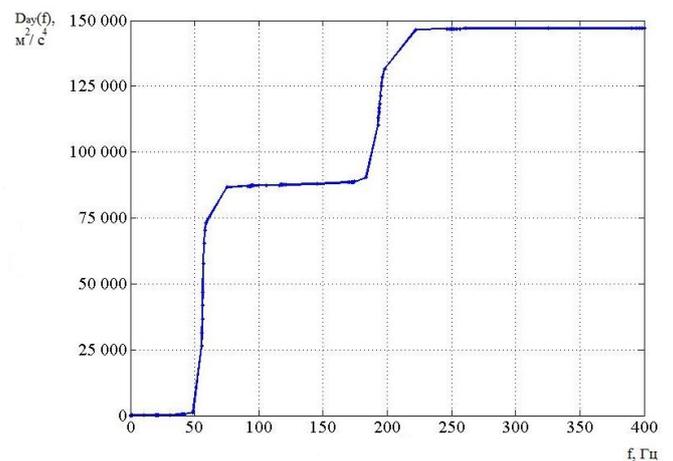


Рис. 14. Дисперсия ускорения 2

### Основные результаты и выводы

Разработаны методики численного моделирования динамического и состояний конструкций авиационных изделий при случайном нагружении. Модели, разработанные с использованием объемных КЭ, позволяют учитывать нерегулярности конструкции и оценивать характеристики составляющих ее пространственного локального деформирования.

На основе разработанных КЭ моделей определены динамические характеристики конструкции изделия, спектральные характеристики и дисперсии вибрационных ускорений при случайном кинематическом нагружении для различных вариантов сварного соединения. Установлено существенное влияние длины сварного соединения на уровни вибрационного ускорения в зоне сварных

швов. Полученные результаты имеют качественное соответствие с известными расчетными данными.

Результаты расчетов показывают, что разработанные КЭ модели позволяют определять распределение, спектральные плотности и дисперсии составляющих вибрационных ускорений при случайных пространственных колебаниях изделий со сварными соединениями с учетом различных характеристик сварного соединения.

Адекватность моделей и работоспособность программ подтверждены физической корректностью результатов расчетов динамических ускорений, сходимостью значений характеристик ускорений при дроблении КЭ разбивки.

Разработанные методики моделирования могут быть использованы для оценки характеристик динамического состояния, корпусов и узлов подвески авиационных изделий при заданных условиях случайного нагружения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ*

*(проект № 17-08-00849 А).*

### **Библиографический список**

1. Фигуровский В.И. Расчет на прочность беспилотных летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1973. - 360 с.
2. Диментберг Ф.М., Колесников К.С. Вибрации в технике. Справочник в 6 т. - М.: Машиностроение, 1980. Т. 3. - 544 с.
3. Фирсанов В.В. Динамика и прочность установок авиационного вооружения. - М.: Изд-во МАИ, 2007. - 400 с.

4. Иерусалимский К.М., Корнеев А.Н. Влияние остаточных напряжений после сварки на прочность и устойчивость элементов конструкций // Труды ЦАГИ. № 2633. 1998. С. 34 - 43.
5. Винокуров В.А., Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности - М.: Машиностроение, 1996. - 576 с.
6. Меркулов И.Е., Ендогур А.И. Создание модели сварного отсека сверхзвукового самолета с учетом конструктивно-технологической схемы // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81168>
7. Golikov N.I., Sidorov M.S. Redistribution of residual welding stresses in ultrasound impact treatment of welded joints in pipes // Welding international, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 765 - 768.
8. Захаров М.Н., Насонов В.А. Критерий разрушения сварных стыковых соединений с внутренними дефектами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 7 (652). С. 76 - 82.
9. Mironov A.A., Volkov V.M. How to estimate the reliability of a weld joint under conditions of cyclic loading according to the results of a nondestructive check // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2011, vol. 40, no. 1, pp. 31 - 34.
10. Antonov A.A. Investigation of fields of residual stresses in welded structures // Welding International, 2014, vol. 28, no. 12, pp. 966 - 969.
11. Фирсанов В.В., Серпичева Е.В. Влияние напряженно-деформированного состояния «пограничный слой» на прочность фланцевых и сварных соединений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 11-1. С. 279 - 288.

12. Tsumarev Y.A., Tsumarev E.N., Ignatova E.V., Latypova E.Y. Reducing stress concentration in welded joints by brazing // *Welding International*, 2015, vol. 29, no. 3, pp. 227 - 229.
13. Wijker Jaap. *Random vibrations in spacecraft structures design: Theory and applications*. Springer Science+Business Media B.V. 2009, 518 p.
14. Elishakoff I. *Probabilistic Methods in the Theory of Structures: Strength of Materials, Random Vibrations, and Random Buckling*, Songapore, World Scientific, 2017, 522 p.
15. Martins J.R.R.A., Hwang J.T. Review and unification of methods for computing derivatives of multidisciplinary computational models // *AIAA Journal: devoted to aerospace research and development*, 2013, vol. 51, no. 11, pp. 2582 - 2599.
16. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Одинцев И.Н. Разумовский И.А. Развитие методов расчетного и экспериментального определения локальных остаточных напряжений при сложных спектрах нагружения // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2015. № 6. С. 53 - 62.
17. Галимов Э.Р., Беляев А.В., Сироткина Л.В. Методы прогнозирования свойств сварных соединений // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2015. Т. 71. № 6. С. 84 - 87.
18. Алямовский А.А. *SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации*. – М.: ДМК Пресс, 2015. - 562 с.
19. Тушев О.Н., Березовский А.В. Определение спектральных плотностей динамических характеристик нелинейной модели конструкции // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2013. № 1. С. 18 - 27.

20. Зарецкий М.В., Сидоренко А.С. Динамика конструкции авиационного изделия при случайном кинематическом нагружении // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29685>

21. Шахматов Д.М. Особенности напряженно-деформированного состояния разнородных сварных соединений // Сварка и диагностика. 2013. № 1. С. 32 - 36.