



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. 2023, № 2, с. 43-52.

Поступила: 10.12.2023

Окончательный вариант: 18.12.2023

© УлГУ

УДК 004.942

## Топологическая оптимизация приёмника воздушного давления SIMP-методом

Лёвин Ю.С.<sup>1,2\*</sup>, Сидоренко О.М.<sup>1,2</sup>,  
Калинов Е.Д.<sup>1,2</sup>

[\\*lev.ura@mail.ru](mailto:lev.ura@mail.ru)

<sup>1</sup>УлГУ, Ульяновск, Россия

<sup>2</sup>АО «УКБП», Ульяновск, Россия

---

В работе проведено исследование модели приёмника воздушного давления, построенной в конечно-элементном комплексе ANSYS Mechanical. Модель имитирует деформацию приёмника при широкополосной случайной вибрации. Посредством топологической оптимизации с использованием SIMP-метода определена форма приёмника, обеспечивающая максимальную прочность при минимальной массе с учётом ограничения по габаритам.

*Ключевые слова:* компьютерная модель, случайная широкополосная вибрация, статический анализ, авиационные приборы, приёмник воздушного давления, ANSYS Mechanical, топологическая оптимизация, SIMP-метод

---

### Введение

Вопросы проектирования приёмников воздушного давления (ПВД) являются приоритетными при разработке системы воздушных сигналов. Одной из основных характеристик ПВД является масса-габаритная характеристика, поскольку от массы будут зависеть эксплуатационные качества. В свою очередь, ограничения по размерам конструкции, зачастую, не позволяют добиться достаточной прочности при использовании стандартных подходов к проектированию.

Для ускорения темпов проектирования и получения конкурентоспособных продуктов необходимо применение различных методов оптимизации конструкций. Использование параметризованной модели является наиболее распространённым методом оптимизации, но её применение затруднительно вследствие сложной геометрии ПВД.

Альтернативой параметрической является структурная оптимизация (в том числе топологическая), позволяющая получить оптимальную форму по заданным критериям дета-

ли (изделия) без параметризации конструкции. В основе принципа топологической оптимизации (ТО) лежат математические методы моделирования, в том числе метод конечных элементов. ТО выполняется с применением различных систем инженерного анализа (CAE систем).

## 1. Методы структурной оптимизации конструкций

Существуют три типа задач оптимизации конструкции [1]: 1) определение оптимального распределения размеров элементов при неизменной геометрии и топологии конструкции (рис. 1.1 а); 2) оптимизация размеров элементов и геометрии (формы) конструкции (рис. 1.1 б); 3) оптимизация топологии конструкции с последующим определением формы и размеров элементов (рис. 1.1 в).

Первый тип задач подходит только для оптимизации простейших конструкций. Исходная структура получается путём генерации ферменной конструкции, в которой стержневые элементы соединяют каждый узел со всеми остальными узлами. В процессе оптимизации конструкции слабо нагруженные "лишние" элементы удаляются автоматически, когда площадь их поперечного сечения оказывается менее некоторого заданного значения. В результате в силовой схеме фермы должны остаться только стержни, наиболее эффективно передающие приложенные нагрузки к закреплениям.

Целью оптимизация размеров конструкции является поиск оптимальной формы конструктивных элементов, обеспечивающей минимальную массу при заданном условии прочности.

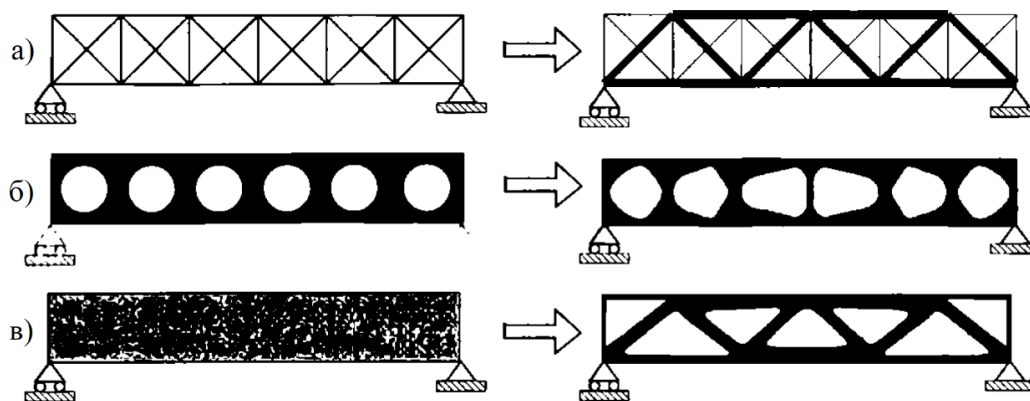


Рис. 1.1. Типы задач оптимизации [1]

В отличие от оптимизации формы и размеров силовых элементов ТО позволяет найти оптимальное распределение материалов в области допустимого распределения, которая определена как область проектирования. Область проектирования представляет собой область конечных элементов, в которой каждый элемент может быть как “пустым”, так и “заполненным материалом”. Топология конструкции формируется “заполненными материалом” элементами области проектирования [2]. Единственные известные параметры

при этом - приложенные нагрузки, условия закрепления, максимальные размеры (объём) конструкции и некоторые дополнительные ограничения, такие как местоположение и размер отверстий или твёрдых областей. В этой задаче физический размер и форма конструкции неизвестны.

“В настоящее время широко применяется SIMP-метод ТО (Solid Isotropic Material with Penalization), основополагающая идея которого заключается в создании поля виртуальной плотности, представляющей аналог некоторой реальной характеристики объекта. Назначение метода состоит в уменьшении податливости конструкции вследствие перераспределения материала в рассматриваемой области пространства при известных граничных условиях. Результатом его использования является получение равнопрочного объекта в рамках рассматриваемой задачи. Широкое применение SIMP получил в аддитивных технологиях (технологиях 3D-печати), способных создавать объекты необходимой формы. В качестве расчётной переменной рассматривается плотность материала. Оптимальная структурная топология получена путём перераспределения материала внутри области на основе критериев оптимальности или метода математического программирования” [3].

## 2. Прочностной расчёт исходной конструкции ПВД

В данной работе ТО проведена для улучшения прочностных характеристик ПВД. Материалом корпуса ПВД является сталь 12Х18Н10Т, а материалом винтов – сталь 30ХГСА. В таблице 2.1. представлены их физические и механические свойства [4].

Таблица 2.1. Физические и механические свойства материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа
12Х18Н10Т	7900	198	510	196
30ХГСА	7850	215	750	490

Контакты между стенками, а также между стенками и фланцем заданы с учётом глубины проплавления лазерной сваркой от 0,4 до 0,6 мм (см. рис. 2.1. – 2.2).

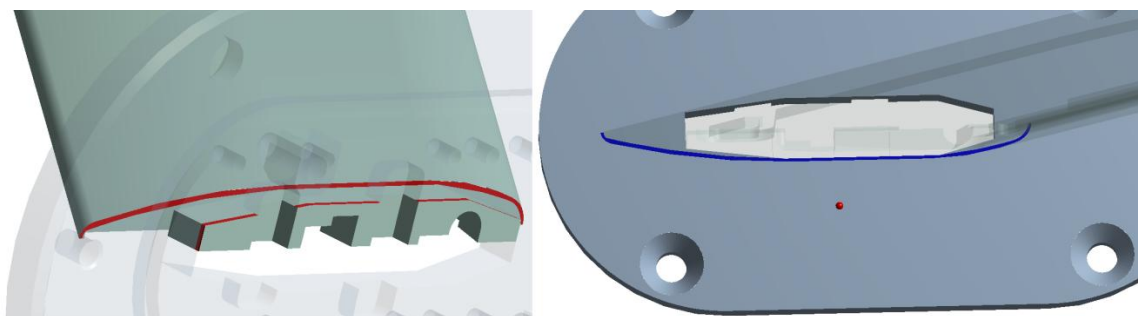
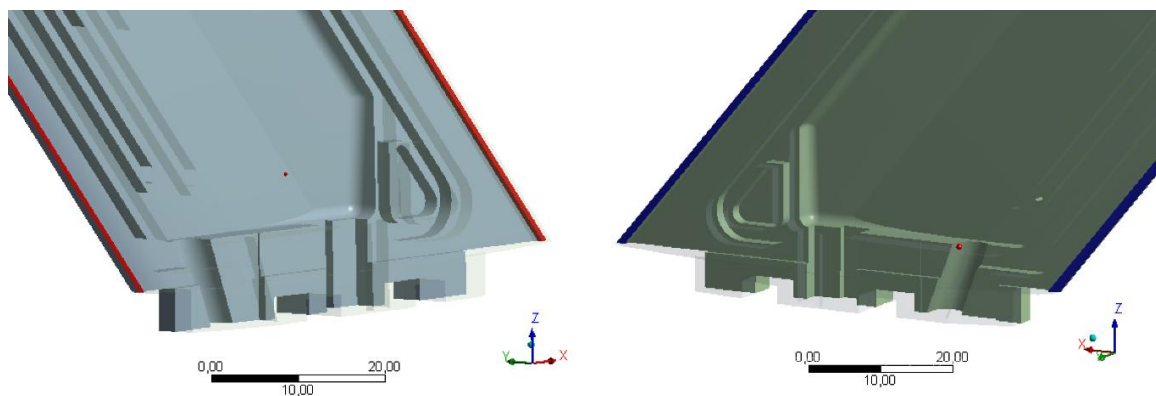


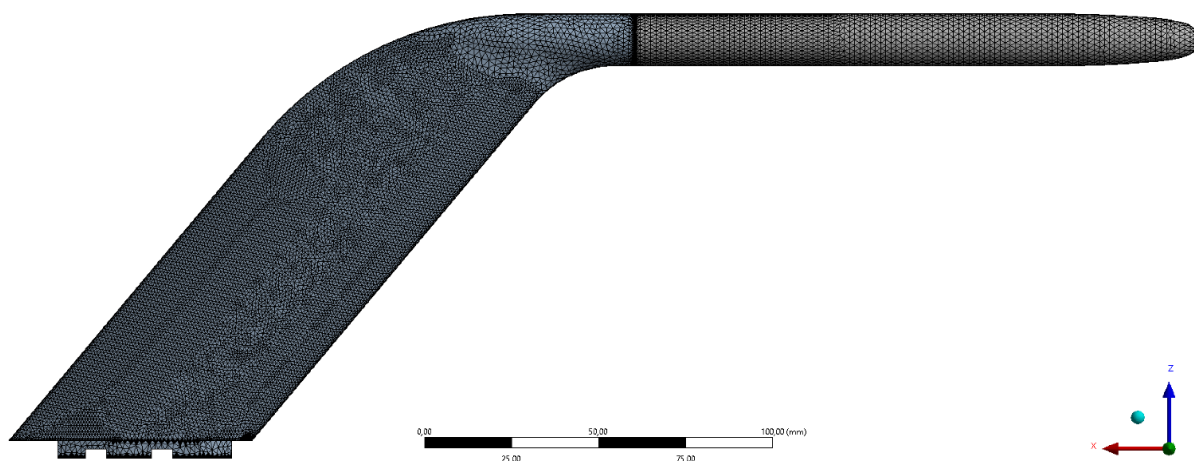
Рис. 2.1. Контакты между фланцем и стенками



**Рис. 2.2.** Контакт между стенками

Так как ПО Ansys при проведении ТО преобразует нелинейные контакты в линейные, а также для уменьшения времени проведения прочностного расчёта, все контакты в модели имеют тип “bonded” (жёсткое закрепление). Расчёт проведён без внутренних компонентов приёмника (трубок, кабелей и т.д.). Отсутствующие компоненты заданы в виде присоединённой массы, с сохранением координат центра тяжести.

С применением программного комплекса ANSYS/Mesh построена тетраэдральная сетка (см. рис. 2.3.), содержащая 2,06 млн. элементов.



**Рис. 2.3.** Конечноэлементная сетка на поверхности ПВД

Расчёт на прочность проведён с ПВД, установленным на плиту, имитирующую объект применения, зафиксированную по нижней грани с ограничением типа “Fixed Support” (ограничение всех степеней свободы) (см. рис. 2.4.). Приёмник закреплён на плите четырьмя винтами.

С применением метода суперпозиции мод проведено моделирование одного из режимов испытаний – воздействие широкополосной случайной вибрации (ШСВ). Характеристики режима представлены в таблице 2.2. и на рис. 2.5.

A: Modal  
 Fixed Support  
 Frequency: N/A  
 16.06.2023 9:49

Fixed Support

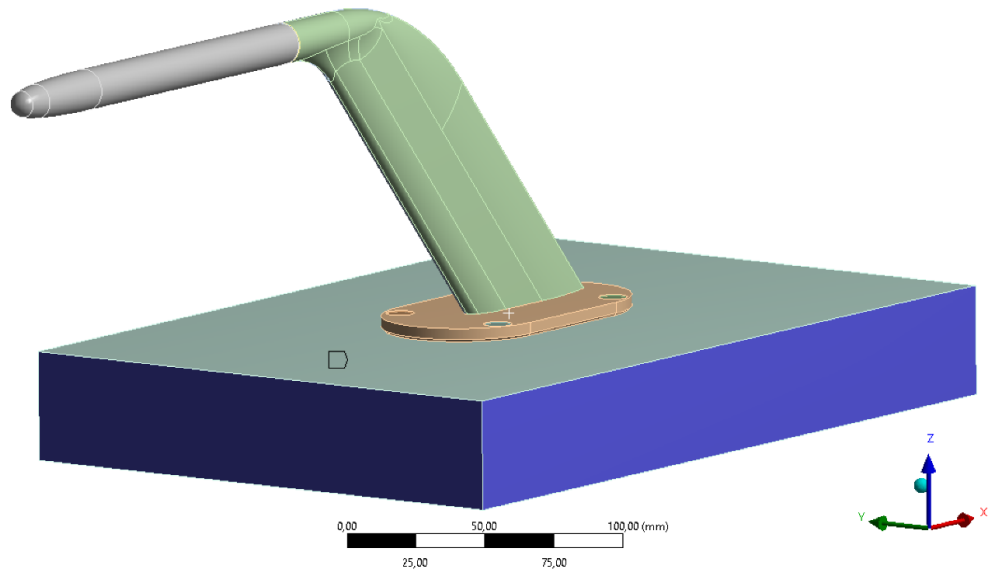


Рис. 2.4. ПВД на плите, имитирующей объект применения

Таблица 2.2. Параметры широкополосной случайной вибрации

Диапазон частот, Гц	От 10 до 40	От 10 до 51.7	От 51.7 до 500	От 500 до 2000
Плотность виброускорения, $g^2/Гц$	0.024	0.024-0.04	0.04	0.04-0.0026

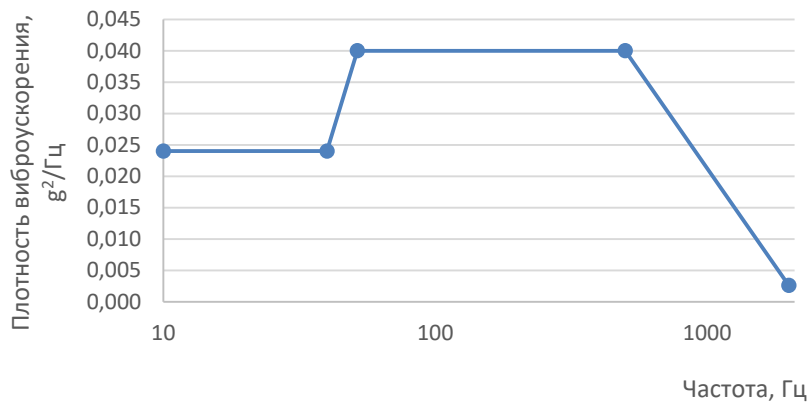
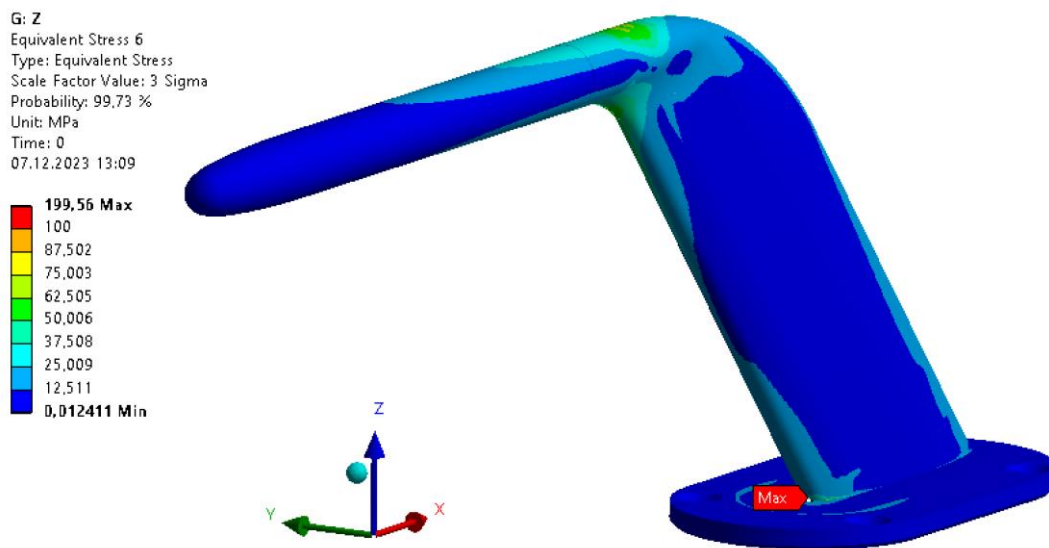


Рис. 2.5. Зависимость плотности виброускорения от частоты колебаний

В результате моделирования испытаний воздействием ШСВ получены значения максимальных нормальных напряжений – 199.56 МПа (вероятность превышения этого значения составляет 0.27%), возникающих в конструкции при воздействии ШСВ по оси Z. На рис. 2.6. представлены результаты воздействия ШСВ в виде распределения эквивалентных механических напряжений.

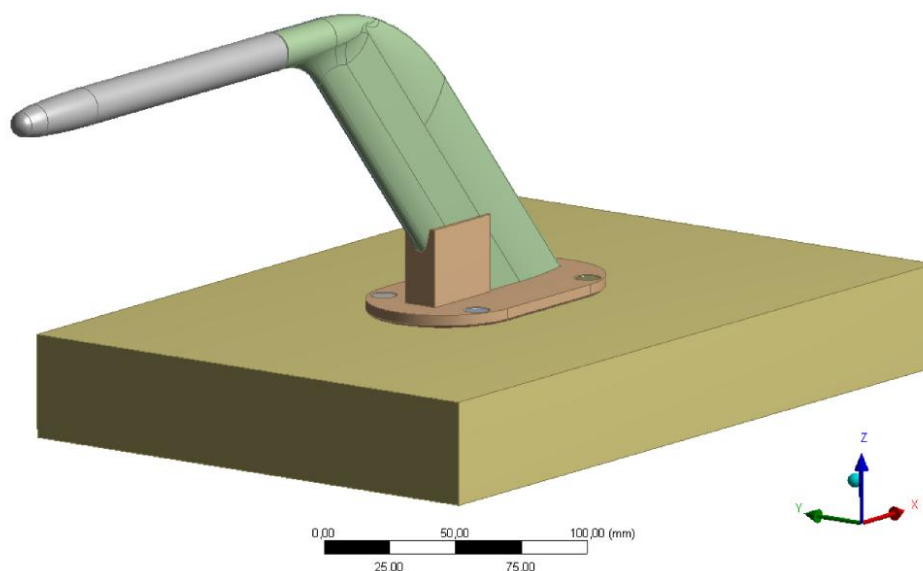


**Рис. 2.6.** Распределение эквивалентных механических напряжений в конструкции ПВД

Параметром оценки механической прочности элементов крепления является коэффициент запаса прочности, который определяется как отношение предела текучести материала к эквивалентным напряжениям. Полученное значение коэффициента запаса прочности 0,98 не удовлетворяет условию прочности [5].

### 3. Топологическая оптимизация ПВД

Для проведения топологической оптимизации, с учётом ограничений по габаритам, создана область проектирования в месте возникновения максимальных напряжений (см. рис. 3.1.).



**Рис. 3.1.** Область проектирования



В ПО ANSYS проведение ТО возможно только при воздействии статических нагрузок. Проведено моделирование напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструкции ПВД при воздействии таких статических нагрузок (линейного ускорения) по оси Z, при воздействии которых на оригинальную конструкцию, в ней возникают напряжения равные 199.56 МПа. Значение необходимых статических нагрузок получено проведением двух прочностных расчётов с заведомо недостаточными и заведомо избыточными статическими нагрузками. По результатам этих расчётов получена линейная зависимость значений механических напряжений от величины ускорения (см. рис. 3.2.).

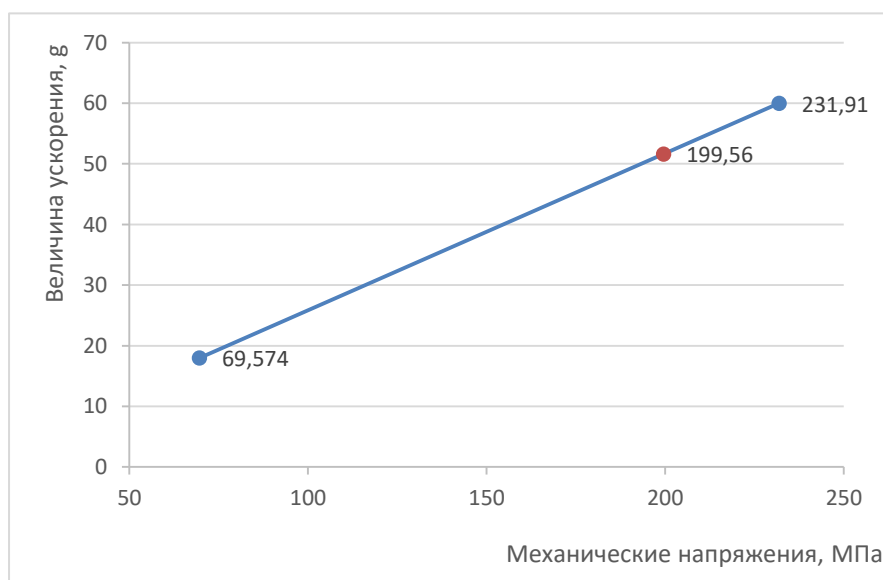


Рис. 3.2. Зависимость значений механических напряжений от величины ускорения

Область проектирования представлена твёрдым телом, материалом которого является сталь 12X18H10T. Область проектирования разбита на 967 тысяч конечных элементов и имеет контакт типа “bonded” со стенками и фланцем ПВД (см. рис. 3.3).

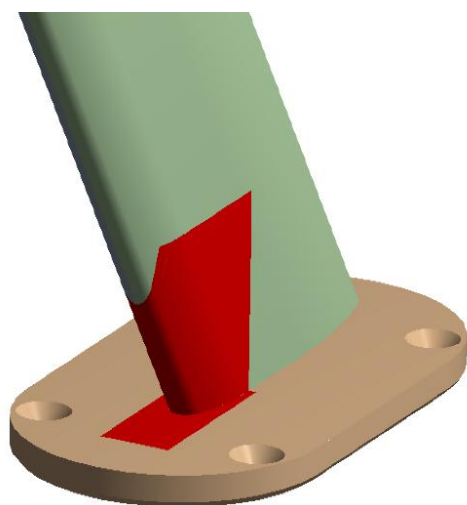
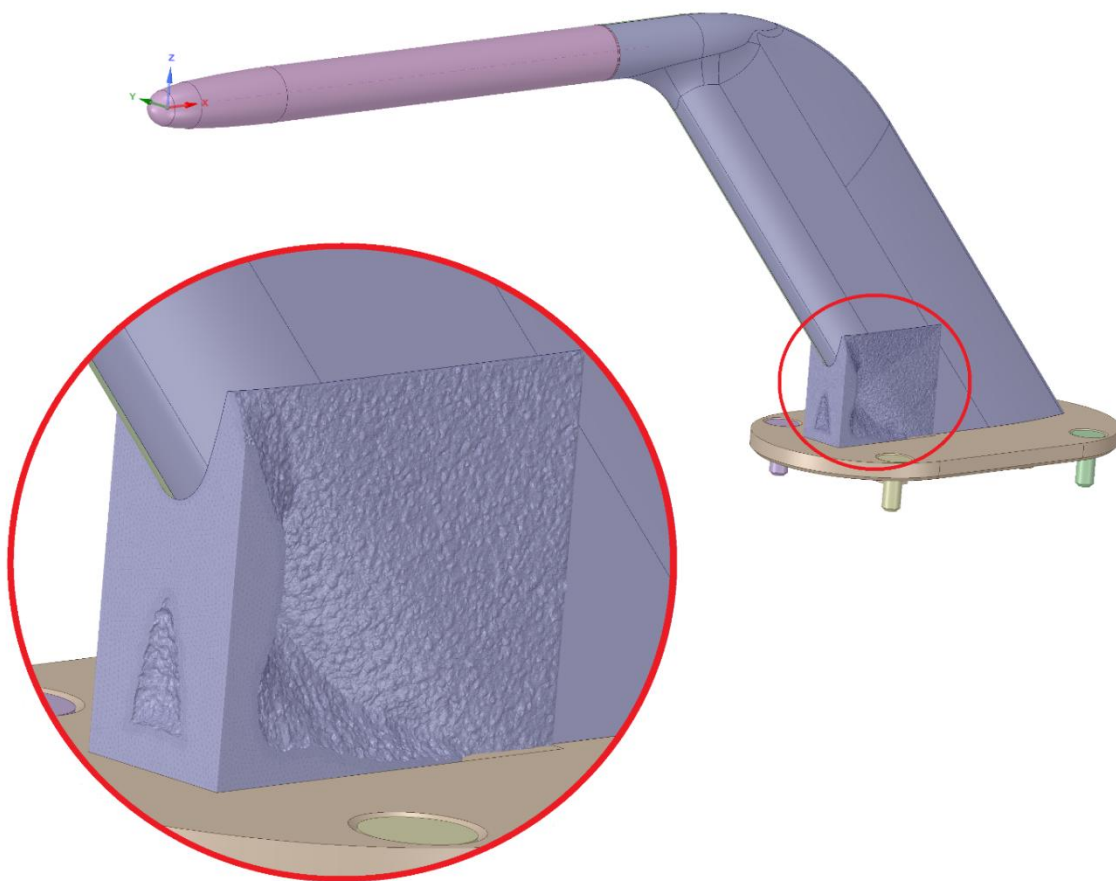


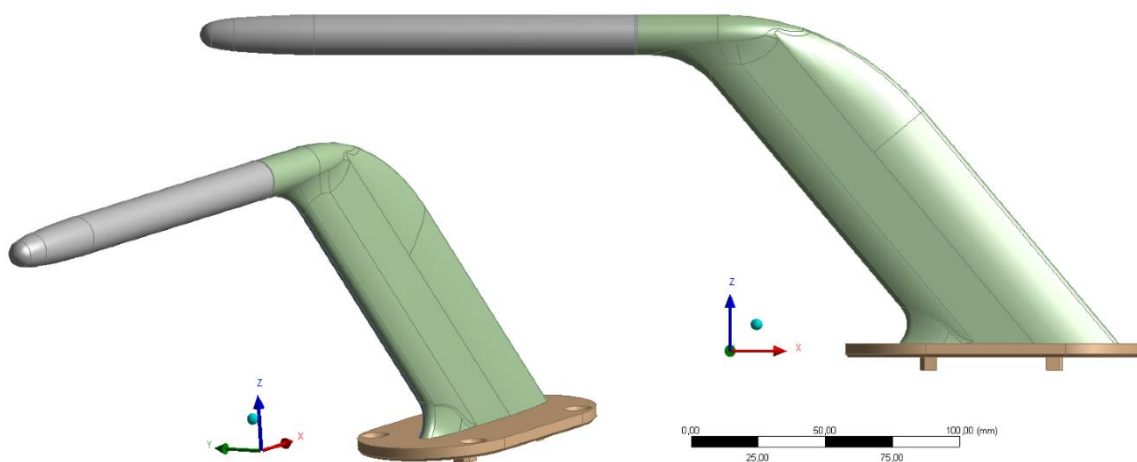
Рис. 3.3. Контакты области проектирования

В САЕ-системе ANSYS решение задач топологической оптимизации направлено на уменьшение либо податливости, либо массы, либо объёма. В данном случае топологическая оптимизация проводилась по критерию податливости с использованием SIMP-метода. На уменьшение податливости (увеличение жёсткости) конструкции наложено ограничение - использование 40% массы области проектирования. По прошествии 12 итераций изменения геометрии/моделирования НДС получена оптимизированная геометрия (см. рис. 3.4.).



**Рис. 3.4.** Оптимизированная геометрия РВД

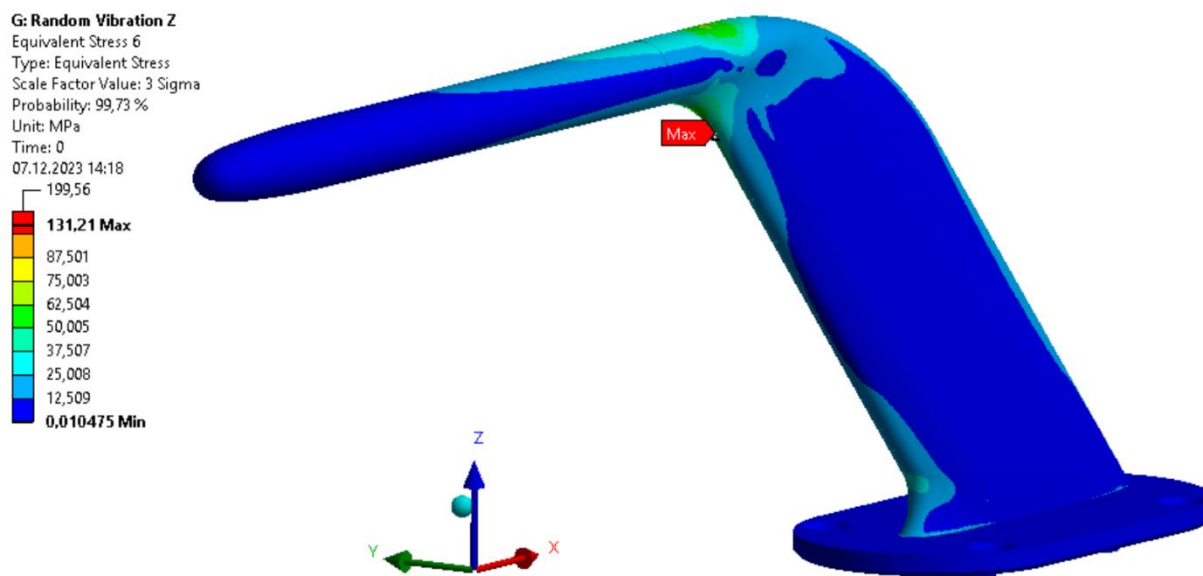
На основе результатов топологической оптимизации изменена конструкция стенок РВД, с учётом способа производства - фрезерования. Масса изменённой конструкции составила 0.82 кг. Изменённая конструкция РВД представлена на рис. 3.5.



**Рис. 3.5.** Изменённая конструкция РВД



Далее (с сохранением граничных условий, закреплений, контактов и настроек сетки) проведено моделирование воздействия ШСВ на изменённую конструкцию ПВД. На рис. 3.6. представлены результаты воздействия ШСВ на изменённую конструкцию ПВД в виде распределения эквивалентных механических напряжений.



**Рис. 3.6.** Распределение эквивалентных механических напряжений в изменённой конструкции ПВД

Значения максимальных эквивалентных напряжений, возникающих в конструкции при воздействии ШСВ на изменённую конструкцию ПВД составили 131.21 МПа. Обеспечивается минимальный коэффициент запаса прочности 1.49, удовлетворяющий условию прочности.

## Заключение

Результаты проведённого исследования показывают, что прочностные характеристики конструкции ПВД, разработанной с применением результатов ТО, превосходят прочностные характеристики оригинальной конструкции. Значения максимальных эквивалентных напряжений снизились на 68.35 МПа (на 34%) относительно оригинальной конструкции. При этом масса ПВД возросла на 0.36% (масса оригинальной конструкции – 0.817кг).

## Список литературы

1. Сысоева В.В., Чедрик В. В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // *Учёные записки ЦАГИ*. 2011. Т. 42, №. 2, с. 91-101.
2. Супотницкий Е.С., Курносое В.Е., Андреева Т.В. Топологическая оптимизация конструкций в области проектирования // *Материалы XI международной студен-*

ческой научной конференции «Студенческий научный форум 2019». 2019. Т. Технические науки, №. 3, с. 91-95.

3. Башин К.А., Р.А. Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // *Вестник ПНИПУ*. 2017. сер. Аэрокосмическая техника, №. 51, с. 51-61.
4. *Марочник Сталей и Сплавов*. Под общ. ред. Сорокина В.Г. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
5. Филоненко-Бородич М.М. *Механические теории прочности*. М.: Изд-во МГУ, 1961. 91с.

## Topology optimization of pitot-static tube by SIMP method

*Lyovin Y.S.<sup>1,2\*</sup>, Sidorenko O.M.<sup>1,2</sup>, Kalinov E.D.<sup>1,2</sup>*

\*[lev.ura@mail.ru](mailto:lev.ura@mail.ru)

<sup>1</sup>Ulyanovsk State University, Russia

<sup>2</sup>Ulyanovsk Instrument Design Bureau, Ulyanovsk, Russia

The mathematical model that simulates deformation of the pitot-static tube under a broadband random vibration is developed in ANSYS Mechanical. By means of topological optimization using SIMP method, a pitot-static tube shape is determined that ensures maximum strength and minimum weight taking into account the size limitation.

**Keywords:** *computer model, broadband random vibration, static analysis, aircraft instruments, pitot-static tube, ANSYS Mechanical, topology optimization, SIMP method.*