

УДК 539.3

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ИСПЫТАНИЙ НА РАКЕТНОМ ТРЕКЕ**© Сергей Иванович Герасимов^{1,2,4}, Владимир Иванович Ерофеев³,
Василий Андреевич Кикеев⁴**¹Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия²Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия³Институт проблем машиностроения, Нижний Новгород, Россия⁴Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россияs.i.gerasimov@mail.ru

Аннотация. Проведено расчетное исследование прочности и динамических характеристик регистрирующей аппаратуры, используемой в практике аэробаллистических испытаний транспортных упаковочных контейнеров. В результате численного анализа определены деформации, перемещения и напряжения, возникающие в аппаратуре. Полученные результаты позволяют сделать вывод о работоспособности аппаратуры и дать рекомендации к ее защите.

Ключевые слова: регистрирующая аппаратура, ракетный трек, прочность, модальный анализ.

ASSESSMENT OF PERFORMANCE RECORDING EQUIPMENT UNDER TEST CONDITIONS TO ROCKET TRACK**S.I. Gerasimov^{1,2,4}, V.I. Erofeev³, V.A. Kikeev⁴**¹Sarovsky Physico-Technical Institute MEPhI, Sarov, Russia²Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia³Institute of Problems of Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod, Russia⁴Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Conducted computational study of strength and dynamic characteristics of the recording equipment used in the practice tests aeroballistic transport packaging containers. As a result of numerical analysis, the strain, the displacements and stresses arising in the equipment. The obtained results allow us to conclude about the health of the equipment and make recommendations for its protection.

Keywords: recording equipment, the missile track, strength, modal analysis.

Введение

Транспортные упаковочные комплекты (ТУК), используемые для транспортировки и долговременного хранения радиоактивных материалов и отработавшего ядерного топлива должны отвечать различным требованиям безопасности перевозки радиоактивных веществ. В частности, одним из них является обязательное проведение экспериментальной проверки головных образцов на соответствия конструкции требованиям, предъявляемым к упаковкам для воздушной перевозки РМ, указанным в п. 3.4.6.4 НП-053-04 [1] и п. 737 TS-R-1 [2].

Испытания представляют из себя разгон ТУК до требуемой скорости и последующее соударение с имитатором мишени. Для этого объект испытаний монтируется на ракетную тележку, способную перемещаться вдоль рельсовых направляющих, разгон тележки осуществляется ракетными двигателями.

Для регистрации процесса разгона, полета и соударения используется как различная фотографическая аппаратура и различные методы визуализации аэродинамических процессов [3, 4] так и средства видеорегистрации. С помощью кабельных датчиков на финишном участке, а также при помощи штатной хронографической системы измеряется скорость движения ракетной тележки с объектом испытаний. Скорость и угол подхода объекта испытаний к мишени регистрируется с помощью фотограмметрических измерений и видеосъемки. Помимо датчиков на финишном участке, для регистрации процесса, на ракетной тележке расположен блок видеорегистрации.

Для получения качественных видеоданных необходимо обеспечить работоспособность видеооборудования а также другой регистрирующей техники, монтируемой на блоке видеорегистрации.

Для оценки работоспособности регистрирующей аппаратуры в условиях испытаний на ракетном треке необходимо выполнить расчет прочности от динамического воздействия на камеру и светочувствительный элемент в результате разгона ракетной тележки до скорости 119 м/с. На первом этапе необходимо произвести расчет аэродинамического воздействия и определить поля давлений и температур, действующие на камеру и светочувствительный элемент, которые затем передаются в прочностной анализ. Также, необходимо выполнить модельный анализ для оценки собственных частот конструкции.

Блок видеорегистрации представляет из себя фундамент, на котором крепится необходимая регистрирующая аппаратура. В верхней части фундамента закреплены светочувствительный элемент и видеокамера. Вид на исследуемый участок фундамента с регистрирующей аппаратурой можно видеть на рис.1.

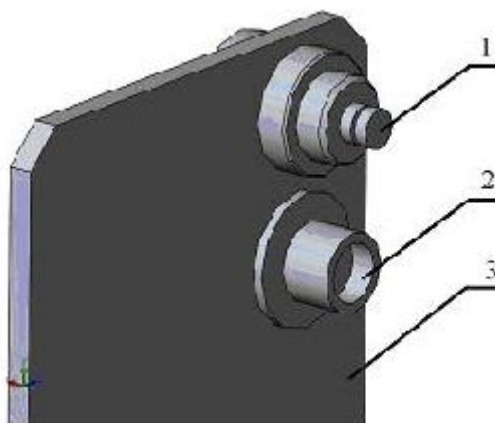


Рис.1. Схема блока видеорегистрации
(1 – видеокамера, 2- светочувствительный элемент, 3 - фундамент).

1. Расчет аэродинамического воздействия на блок видеорегистрации

Для определения влияния размеров расчетного домена на характер обтекания конструкции рассматривались несколько доменов различных размеров при одной начальной скорости обтекания.

Расчетный домен, используемый в дальнейших исследованиях имеет размеры 0,9×0,9×0,5 м (рис.2).

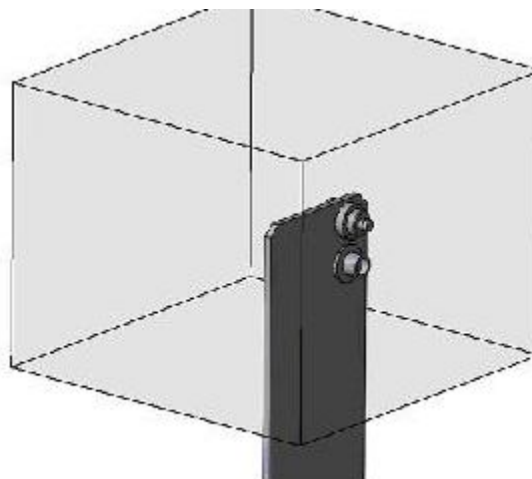


Рис.2. Расчетный домен, используемый при вычислении параметров обтекания блока видеорегистрации

Трехмерный расчет внешнего обтекания сверхзвуковым потоком сжимаемого газа проводился с учетом соответствующих условий на границе расчетного домена и поверхностях модели. Решались полные, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, дополненные двухпараметрической моделью турбулентности. Для воздуха использовалось уравнение состояния идеального газа. В процессе расчета определялись полные в объеме домена поля для всех параметров обтекающего газа, также исходная счетная сетка подвергалась периодической адаптации в зонах, где параметры потока имели высокоградиентное распределение. Исходная ячейка, при выполнении соответствующего критерия делалась на 8 ячеек меньшего размера.

На рис. 3 приведена счетная сетка для расчетов обтекания модели дважды адаптированная после 500 и 1000 итераций сетка для условий обтекания с начальной скоростью $V=119$ м/с. Исходная сетка состояла из 33726 ячеек, а адаптированная сетка из 264698, 870436.

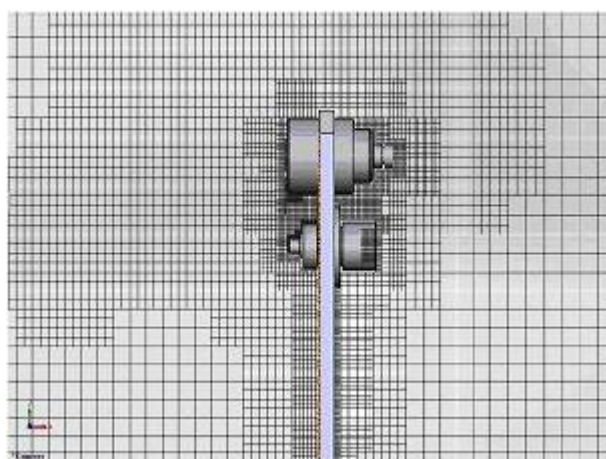


Рис. 3. Часть адаптированной расчетной сетки при моделировании обтекания модели.

В результате произведенных расчетов получены поля давлений и температур на поверхностях видеокамеры и светочувствительного элемента. Полученные данные необходимы для дальнейшего анализа прочности регистрирующей аппаратуры.

На схеме, приведенной на рис.1 регистрирующая аппаратура располагается непосредственно на фундаменте блока видеорегистрации. В некоторых случаях, например, при невозможности расположения аппаратуры на фундаменте, либо при необходимости

изменения ракурса съемки аппарата может быть размещена на отдельных выносных элементах. Для подобного случая расположения аппаратуры выполнен расчет сверхзвукового обтекания с начальной скоростью $M=3$ с целью определения аэродинамического воздействия на конструкцию.

Трехмерный расчет внешнего обтекания сверхзвуковым потоком сжимаемого газа проводился с учетом соответствующих условий на границе расчетного домена и поверхностях модели. Решались полные, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, дополненные двухпараметрической моделью турбулентности. Для воздуха использовалось уравнение состояния идеального газа. В процессе расчета определялись полные в объеме домена поля для всех параметров обтекающего газа, также исходная сетка подвергалась периодической адаптации в зонах, где параметры потока имели высокоградиентное распределение. Исходная ячейка, при выполнении соответствующего критерия делалась на 8 ячеек меньшего размера.

При моделировании сверхзвукового обтекания видеокамеры из условий симметрии использовалась четверть общего расчетного домена, имеющего размеры $400 \times 280 \times 280$ мм (рис. 4).

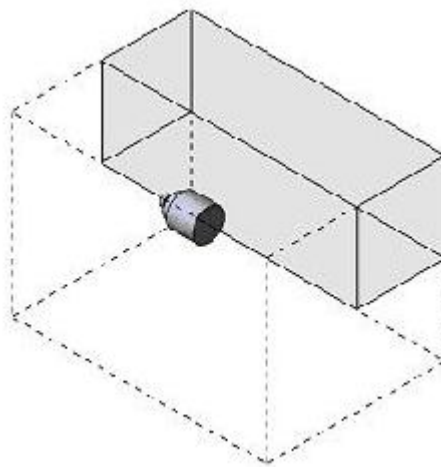


Рис. 4. Расчетный домен, принятый при моделировании обтекания модели видеокамеры со скоростью $M=3$.

Исходная расчетная и дважды адаптированная сетка в процессе расчета после 500 и 1000 итераций приведены на рис.4. Исходная сетка состояла из 138495 ячеек, а дважды адаптированная сетка 647251.

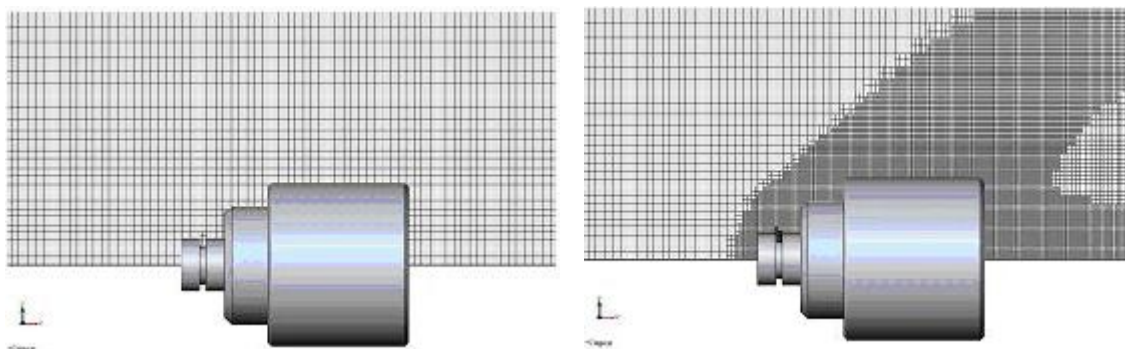


Рис. 5. Часть расчетной сетки при моделировании обтекания модели видеокамеры со скоростью $M=3$.

Характер распределения давления и температуры в среде и на фронтальных поверхностях видеокамеры приведен на рис. 6 – 9.

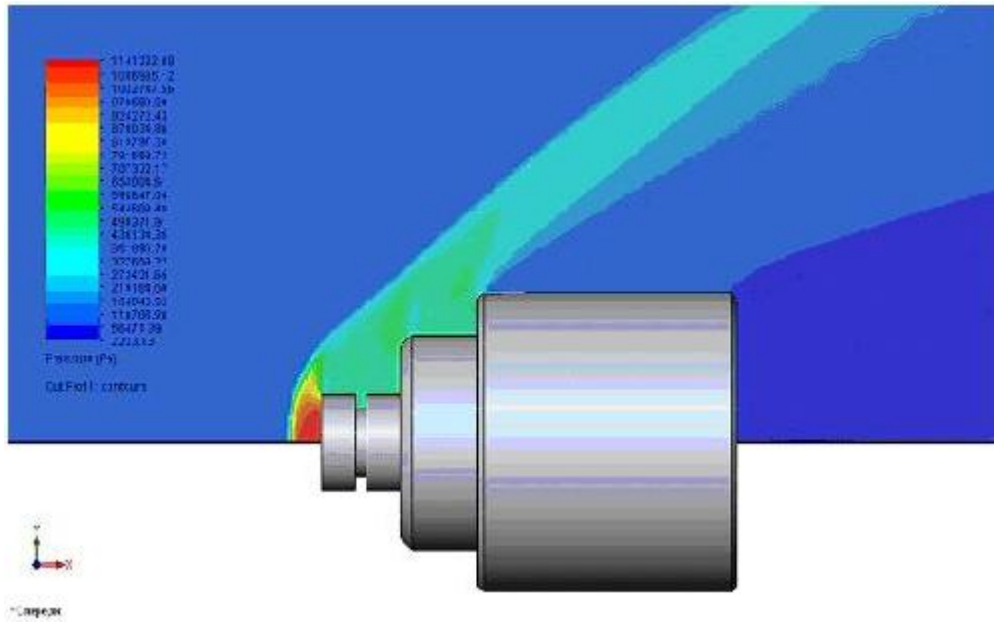


Рис. 6. Распределение полей давлений (Па) в среде при обтекании видеокамеры с начальной скоростью $M=3$.

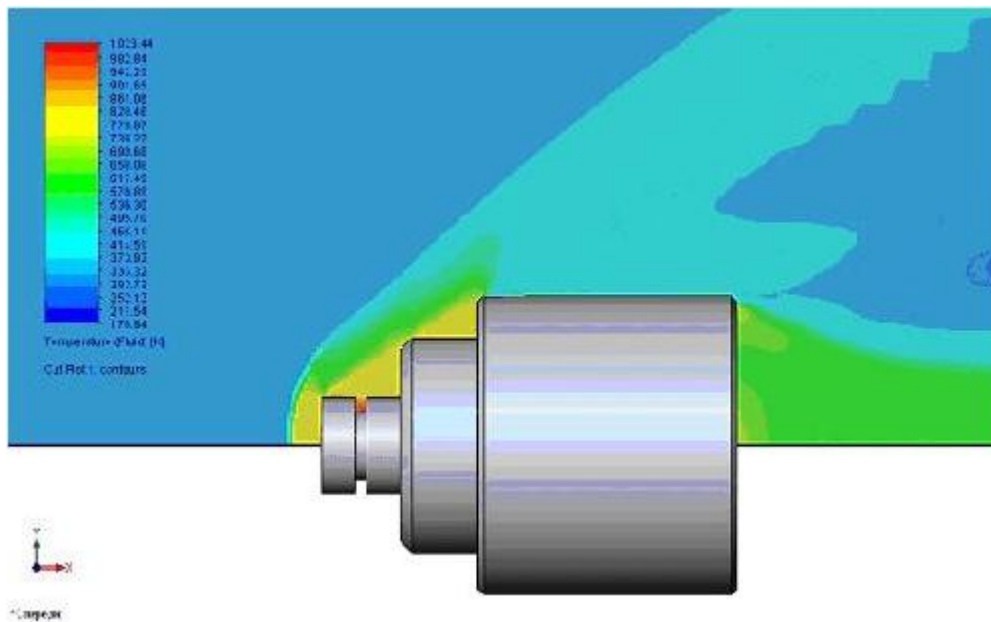


Рис. 7. Распределение полей температур (К) в среде при обтекании видеокамеры с начальной скоростью $M=3$.

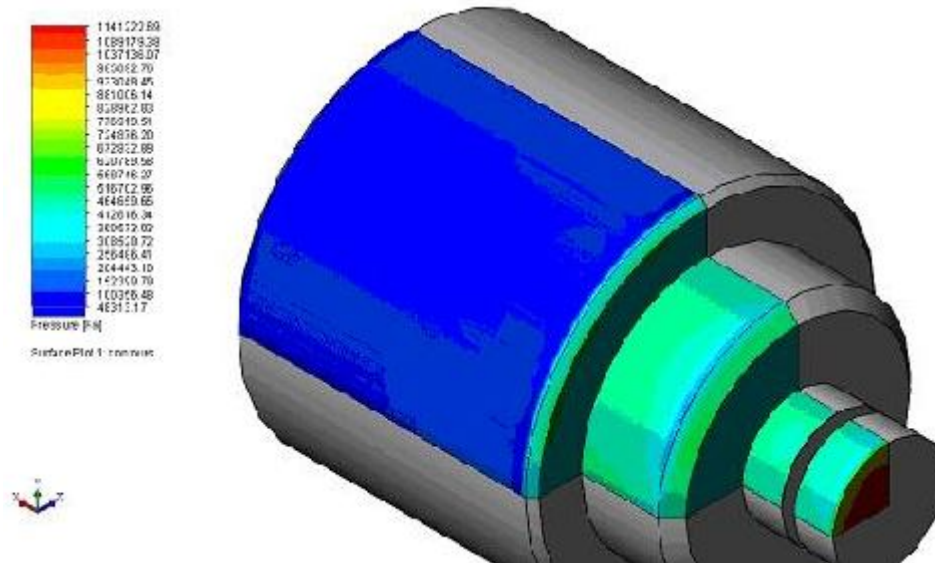


Рис. 8. Распределение полей давлений (Па) на поверхности видеокамеры при обтекании с начальной скоростью $M=3$.

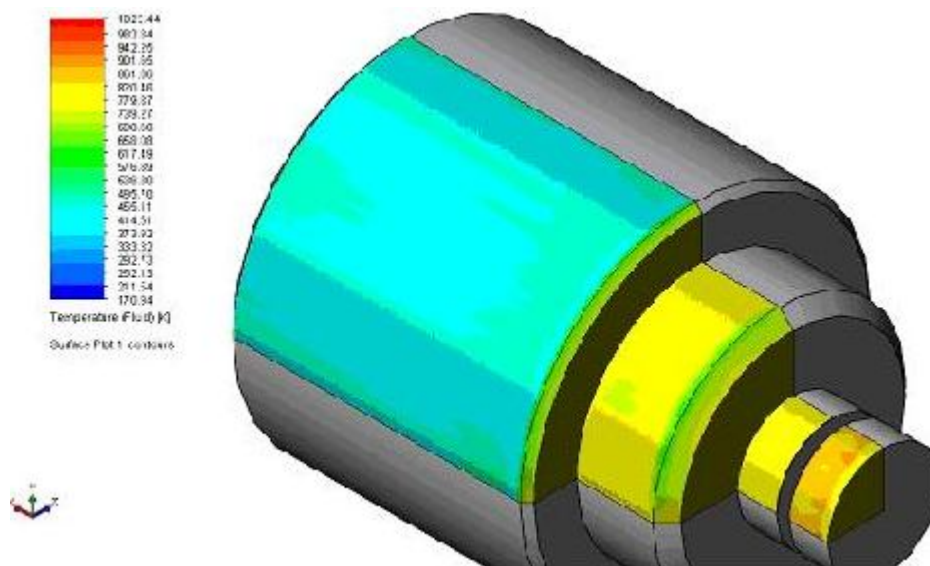


Рис. 9. Распределение полей температур (К) на поверхности видеокамеры при обтекании с начальной скоростью $M=3$.

Аналогичные расчеты произведены для светочувствительного элемента. При моделировании сверхзвукового обтекания светочувствительного элемента из условий симметрии использовалась четверть общего расчетного домена, имеющего размеры $400 \times 280 \times 280$ мм (рис. 10).

Исходная расчетная и дважды адаптированная сетка в процессе расчета после 500 и 1000 итераций приведены на рис. 11. Исходная сетка состояла из 127568 ячеек, а дважды адаптированная сетка 913682.

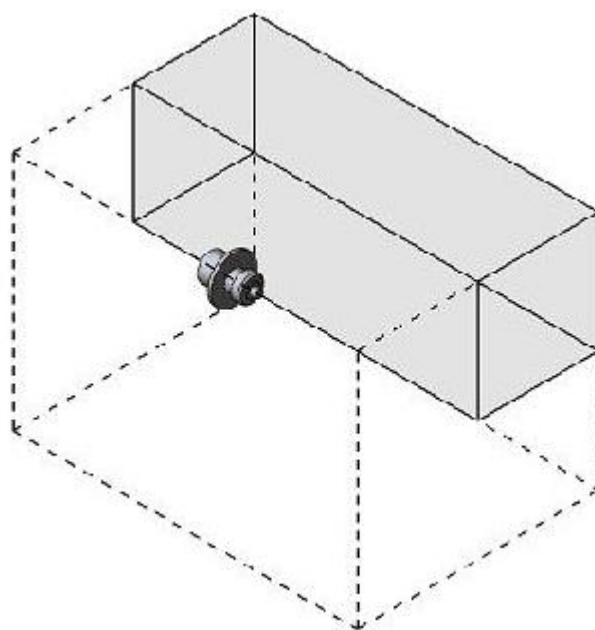


Рис. 10. Расчетный домен, принятый при моделировании обтекания модели светочувствительного элемента со скоростью $M=3$.

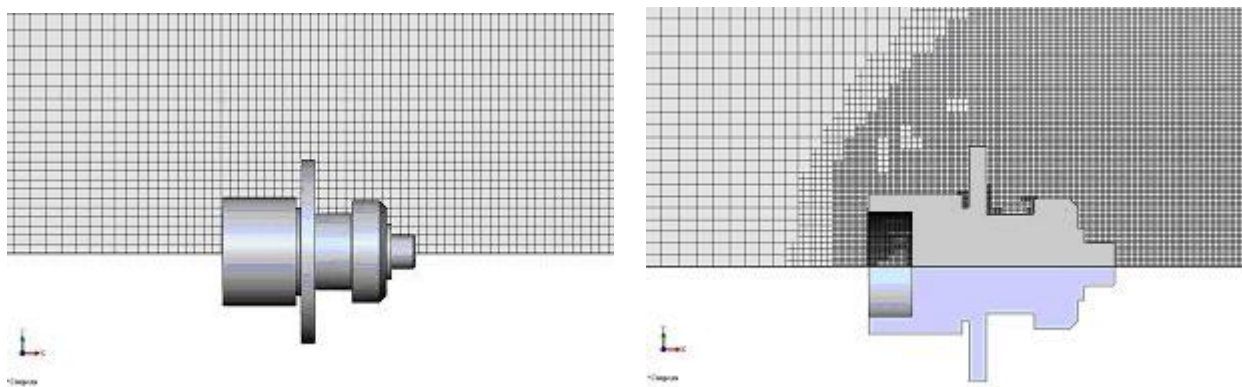


Рис. 11. Часть расчетной сетки при моделировании обтекания модели светочувствительного элемента со скоростью $M=3$.

Характер распределения давления и температуры в среде и на фронтальных поверхностях светочувствительного элемента приведен на рис. 12 – 15.

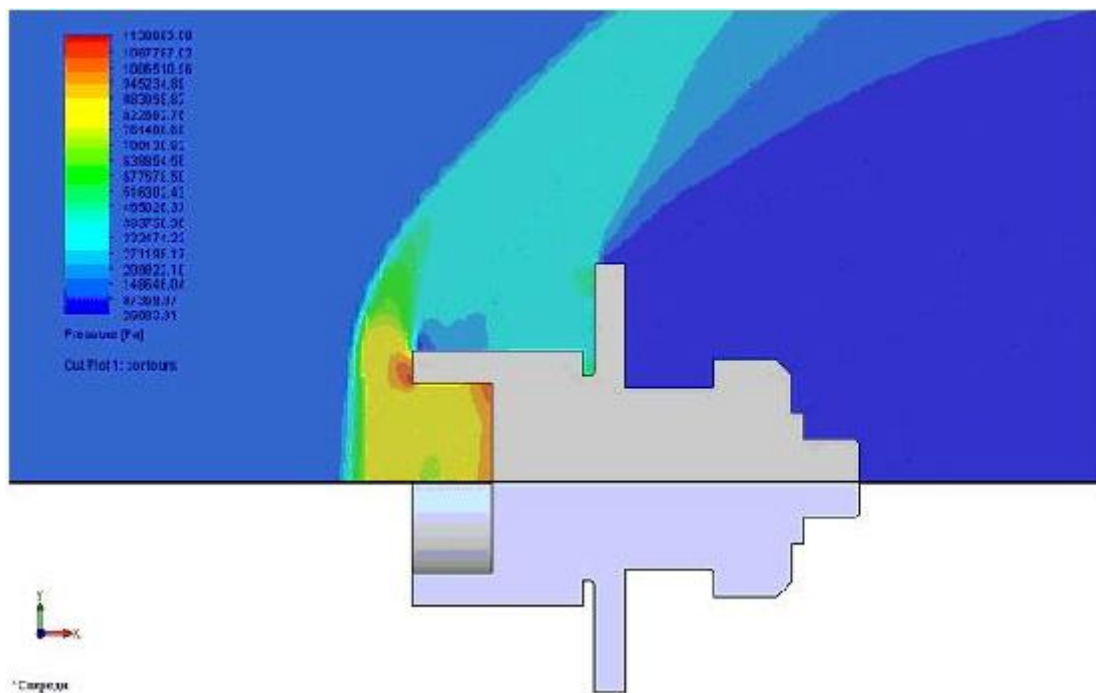


Рис. 12. Распределение полей давлений (Па) при обтекании светочувствительного элемента с начальной скоростью $M=3$.

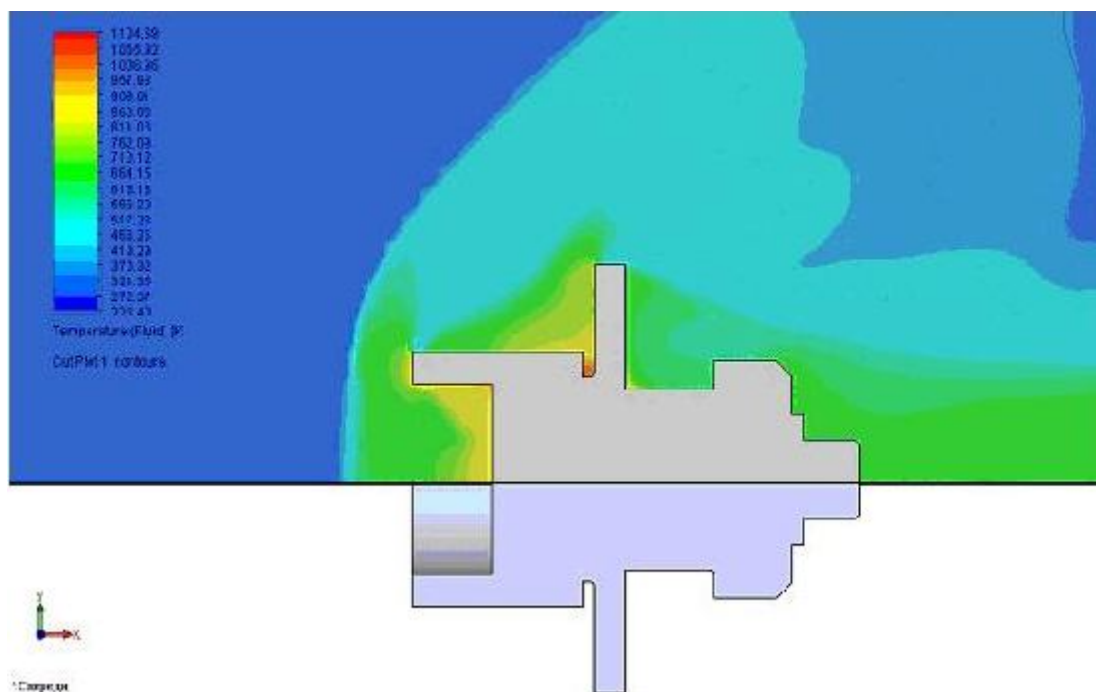


Рис. 13. Распределение полей температур (K) при обтекании светочувствительного элемента с начальной скоростью $M=3$.

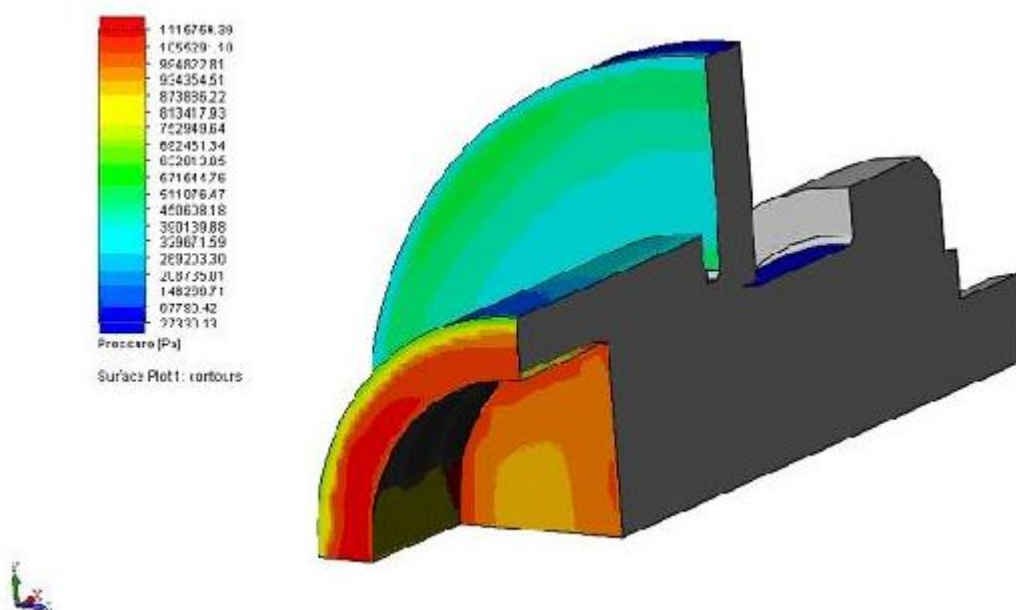


Рис. 14. Распределение полей давлений (Па) на поверхности светочувствительного элемента при обтекании с начальной скоростью $M=3$.

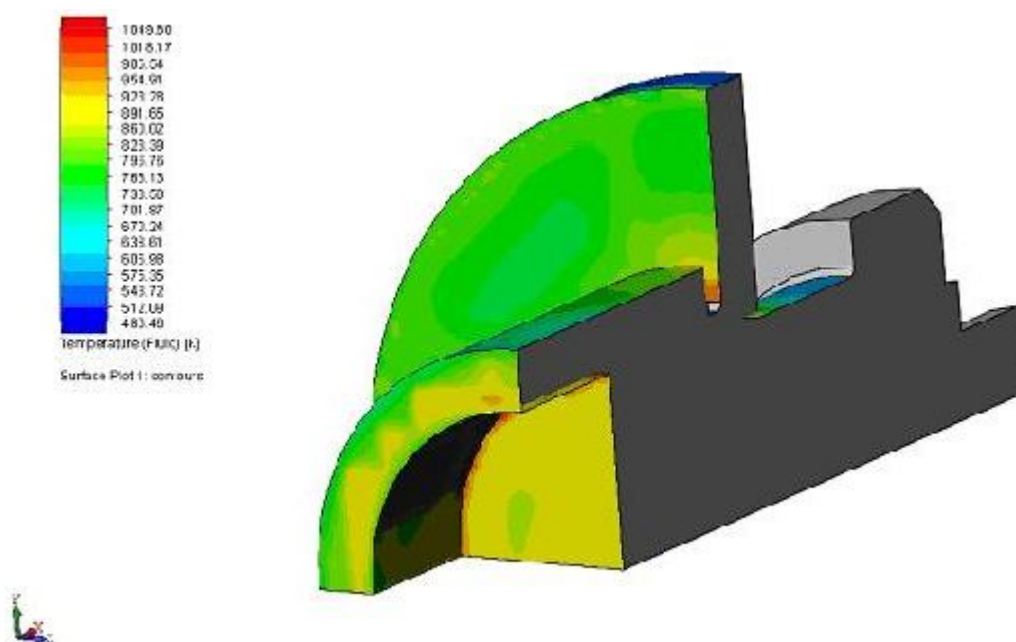


Рис. 15. Распределение полей температур (К) на поверхности светочувствительного элемента при обтекании с начальной скоростью $M=3$.

В результате произведенных расчетов получены поля давлений, температур, плотностей в газовой среде и характер распределения данных параметров на поверхностях модели при начальной скорости обтекания $M=3$.

2. Прочностной расчет с помощью метода конечных элементов

Полученные значения давлений, температур могут использоваться как начальные данные для решения прочностной задачи при аэродинамическом воздействии на регистрирующую аппаратуру. Данная задача может быть решена рядом методов, одним из наиболее распространенных на данный момент является метод конечных элементов (МКЭ).

Одной из наиболее популярных и развивающихся универсальных программных систем конечно-элементного (МКЭ) анализа является продукт ANSYS, известный в сфере автоматических инженерных расчётов (CAE, Computer-Aided Engineering) и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей.

Для построения конечно-элементной модели светочувствительного элемента использовался элемент SOLID 185 из библиотеки конечных элементов ANSYS. Данный тип конечного элемента имеет три степени свободы (перемещения) в узлах и поддерживает пластичность, гиперупругость ползучесть и учет больших деформаций.

Конечно-элементная сетка модели светочувствительного элемента, используемая в расчетах показана на рис. 16. Ограничения по перемещениям прикладывались в местах крепления датчика к блоку видеорегистрации (четыре отверстия под болты). Значения давления, приложенного на фронтальные плоскости деталей взято из результатов аэродинамического анализа, проведенного ранее при аэродинамическом обтекании на скорости 119 м/с.

Контурные изображения полей напряжений и суммарного вектора перемещений показаны на рис. 17 и 18.

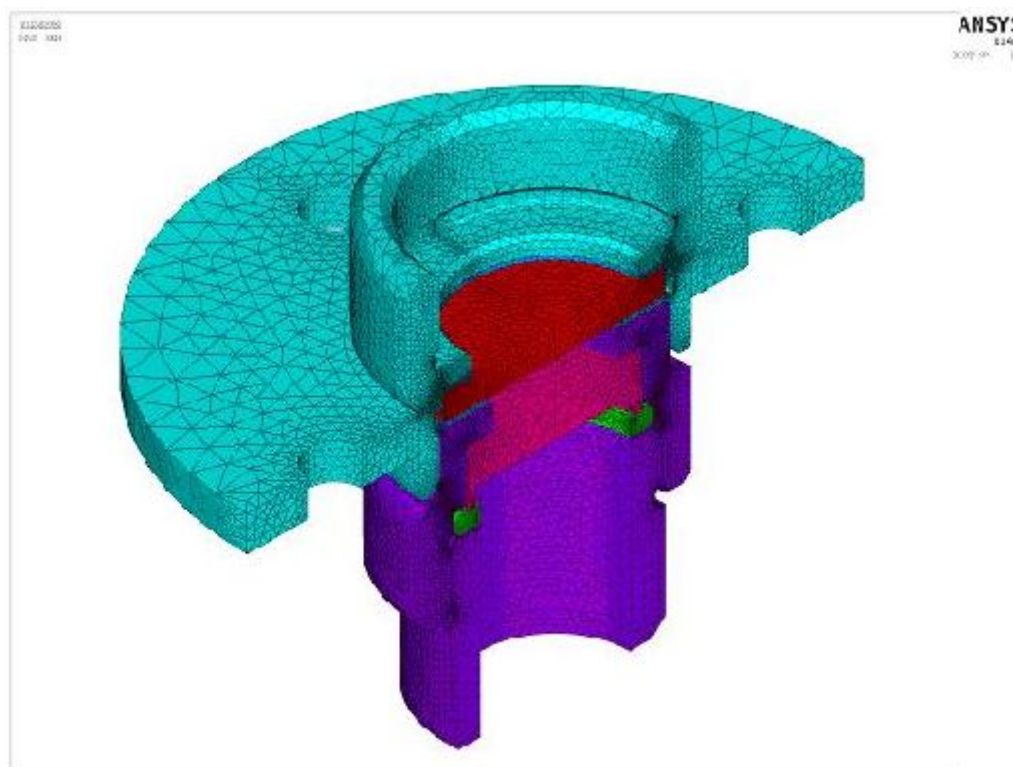


Рис. 16. Конечно-элементная сетка модели светочувствительного элемента.

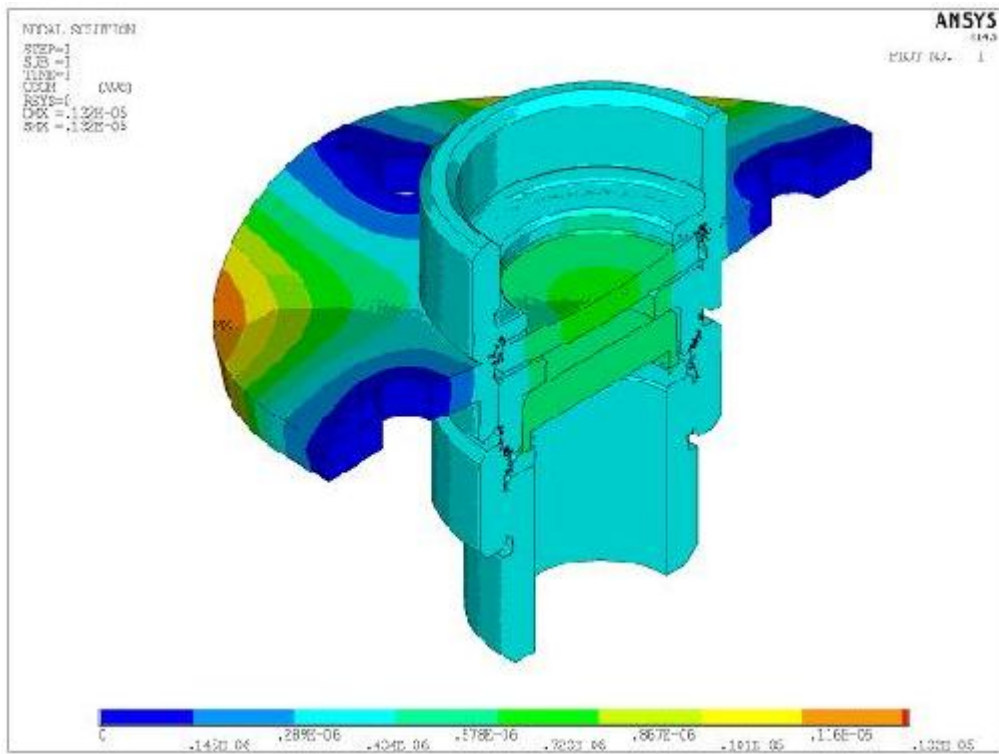


Рис. 17. Суммарный вектор перемещений модели светочувствительного элемента.

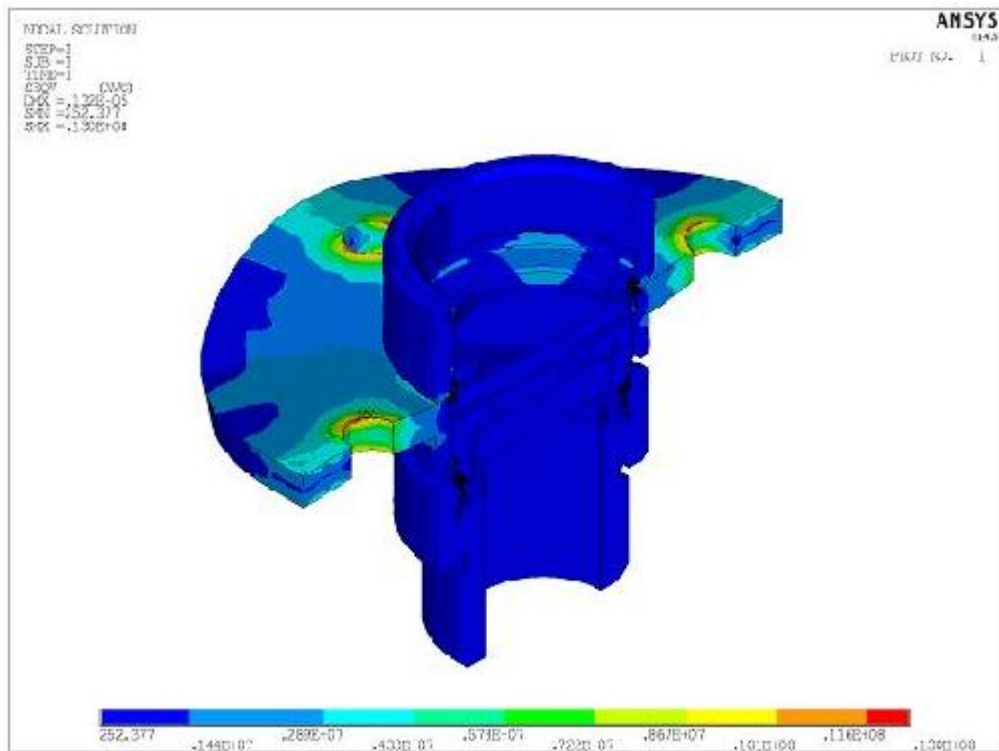


Рис. 18. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в модели светочувствительного элемента.

С целью получения значений первых собственных частот конструкции производился модальный анализ КЭМ светочувствительного элемента. Закрепления в узлах модели при модальном анализе были приняты идентично прочностному анализу. В результате анализа получены и проиллюстрированы (рис. 19 – 21) первые три моды собственных колебаний конструкции. Первая собственная частота (10,33 кГц) соответствует продольному смещению задней части корпуса датчика, вторая частота (10,35 кГц) – поперечному. Третья собственная частота (13,52 кГц) соответствует вертикальному смещению корпуса датчика относительно заделки.

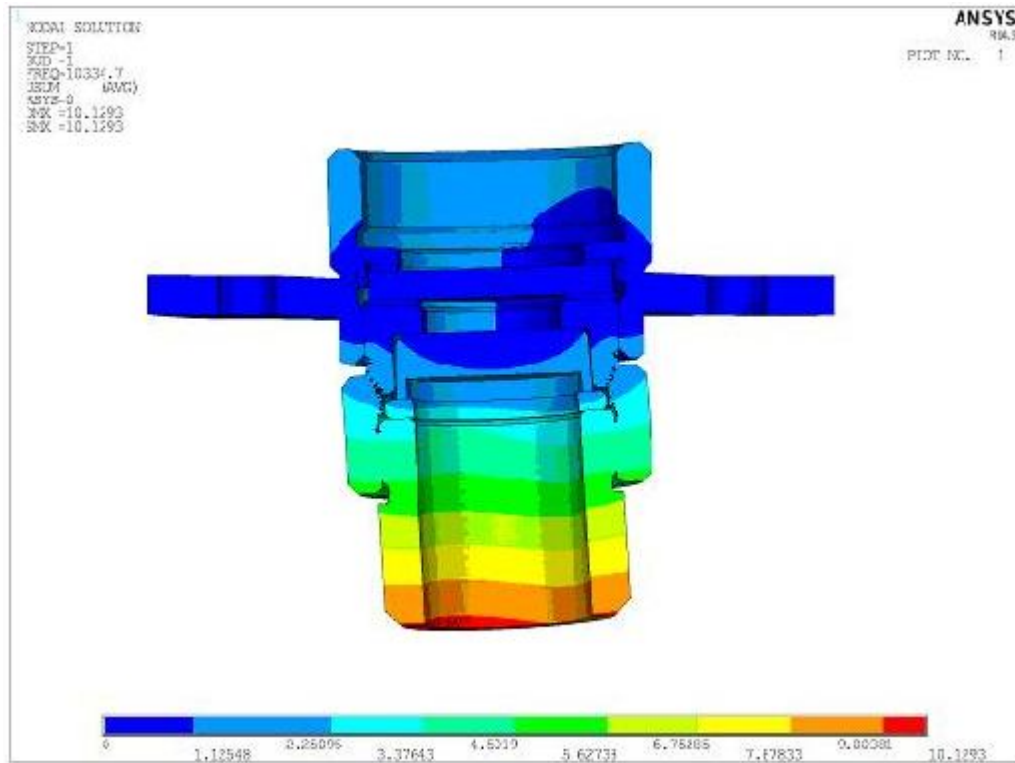


Рис. 19. Первая форма колебаний (10,34 кГц) датчика.

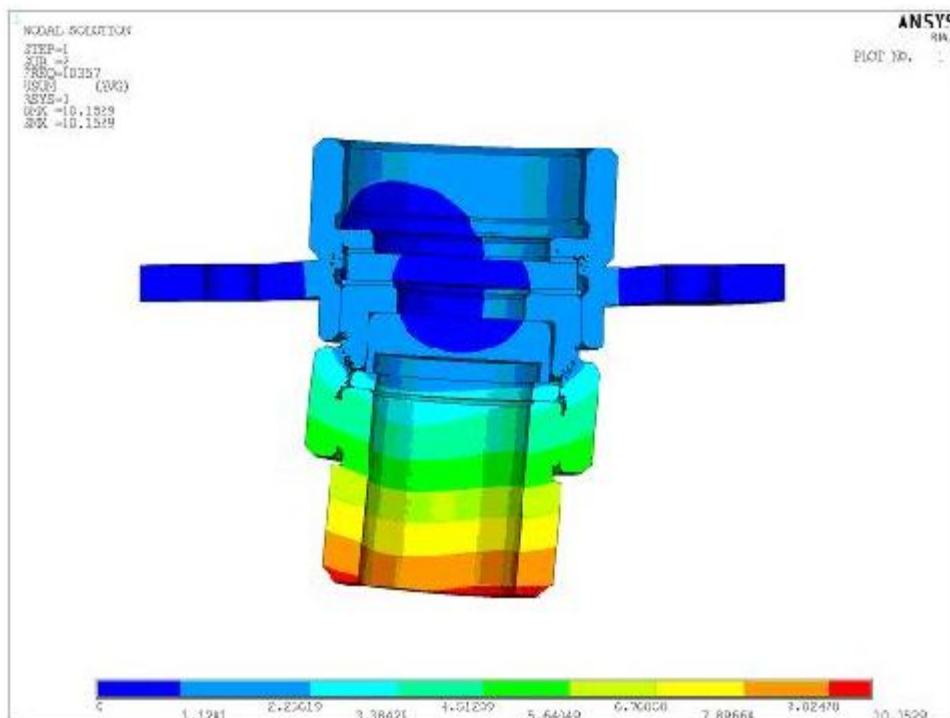


Рис. 20. Вторая форма колебаний (10,35 кГц) датчика.

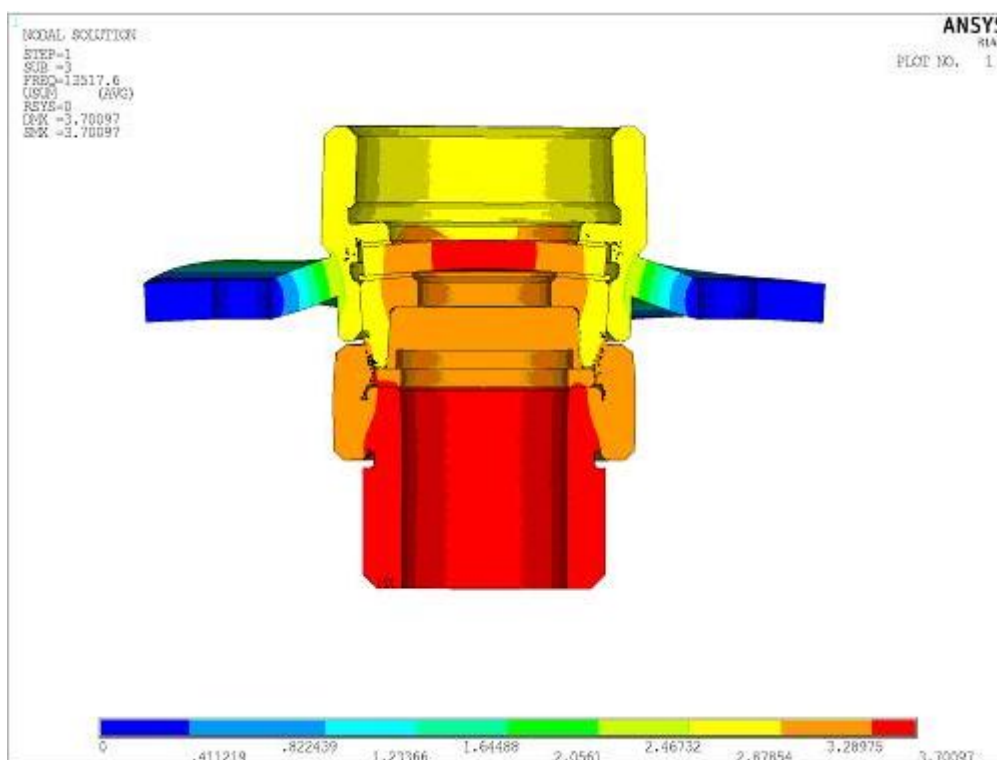


Рис. 21. Третья форма колебаний (13,52 кГц) датчика.

В результате произведенных расчетов можно с уверенностью заключить, что уровень эквивалентных напряжений в конструкции (максимум 13 МПа) не представляет опасности для работоспособности датчика.

Для построения конечно-элементной модели светочувствительного элемента использовался элемент SOLID 185 из библиотеки конечных элементов ANSYS. Данный тип конечного элемента имеет три степени свободы (перемещения) в узлах и поддерживает пластичность, гиперупругость ползучесть и учет больших деформаций.

Конечно-элементная сетка, используемая в аналогичных расчетах видеокамеры показана на рис. 22. Ограничения по перемещения прикладывались в местах крепления камеры к фундаменту блока видеорегистрации (по контуру корпуса). Давление, приложенное на фронтальные плоскости деталей взято из результатов аэродинамического анализа, проведенного ранее.

Контурные изображения полей напряжений и суммарного вектора перемещений показаны на рис. 23 и 24.

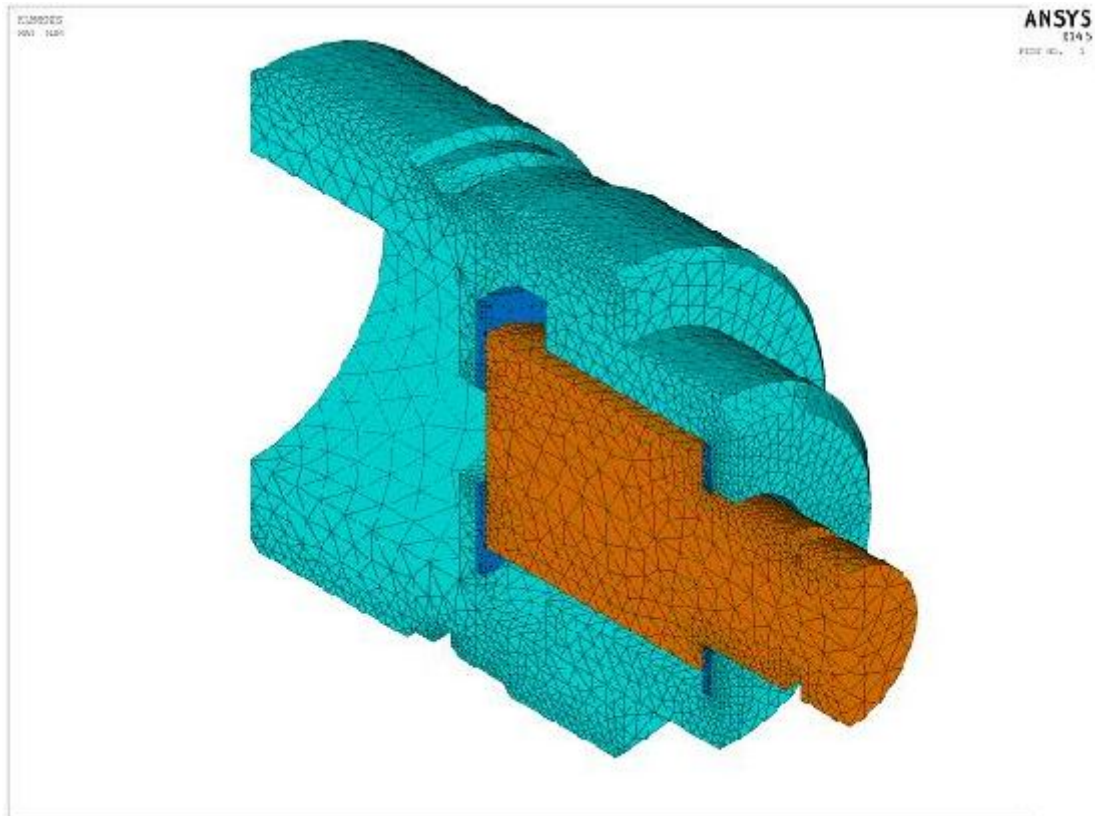


Рис. 22. Конечно-элементная сетка модели видеокамеры.

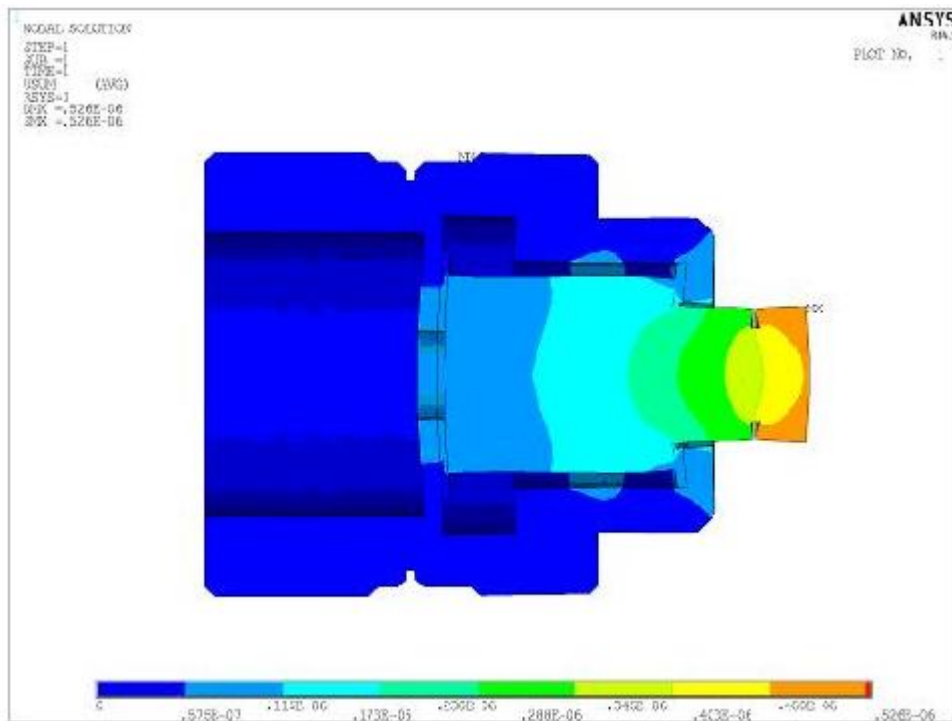


Рис. 23. Суммарный вектор перемещений модели видеокамеры.

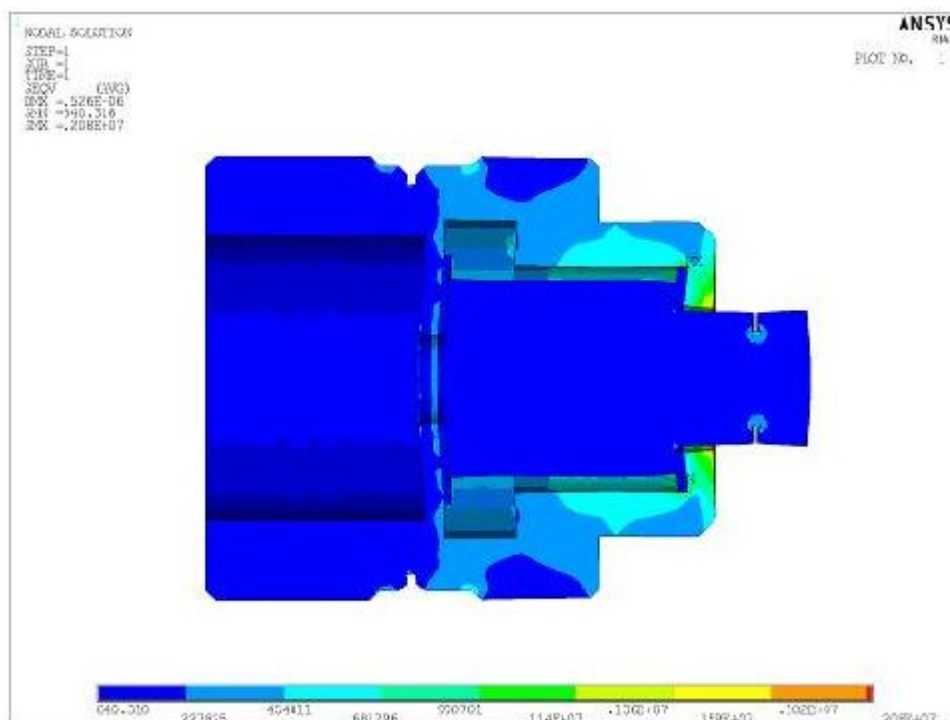


Рис. 24. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в модели видеокамеры.

С целью оценки значений первых собственных частот конструкции производился модальный анализ КЭМ камеры. Закрепления узлов при модальном анализе были приняты идентично прочностному анализу. В результате анализа получены и проиллюстрированы (рис. 25 – 27) первые моды собственных колебаний конструкции. Первая собственная частота (10,44 кГц) соответствует вертикальному перемещению задней части камеры, вторая частота (10,52 кГц) – поперечному. Третья собственная частота (10,86 кГц) соответствует повороту корпуса камеры относительно продольной оси.

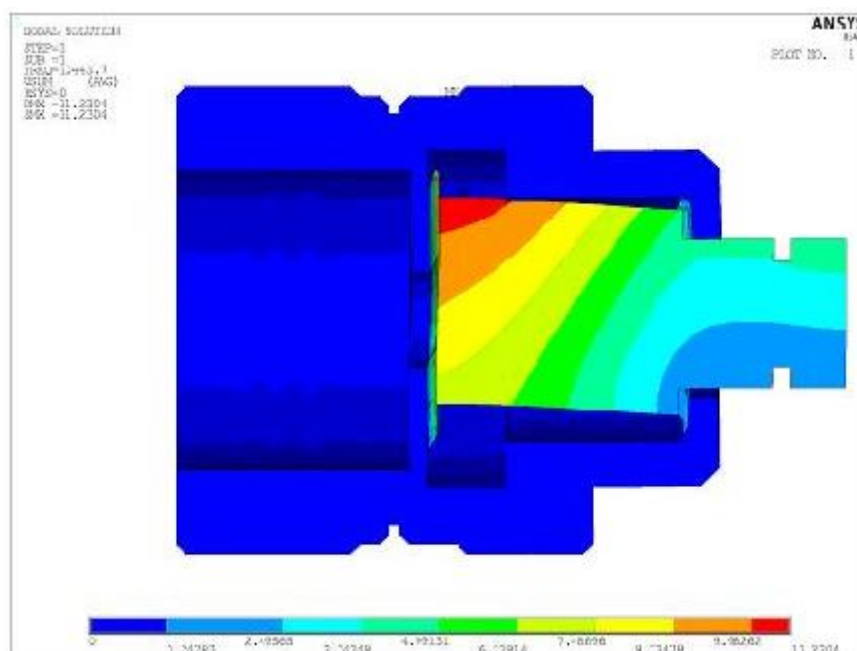


Рис. 25. Первая форма колебаний (10,44 кГц) камеры.

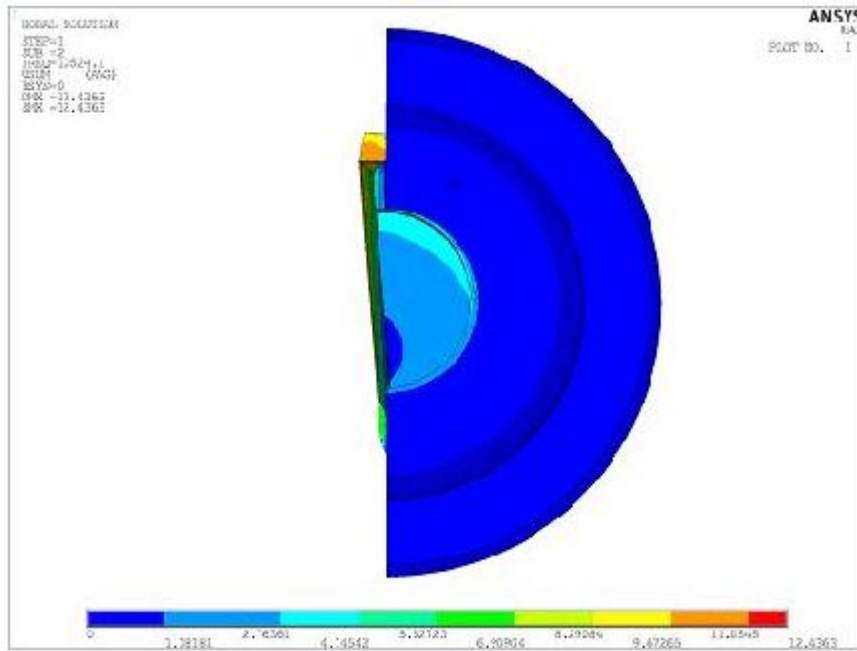


Рис. 26. Вторая форма колебаний (10,52 кГц) камеры.

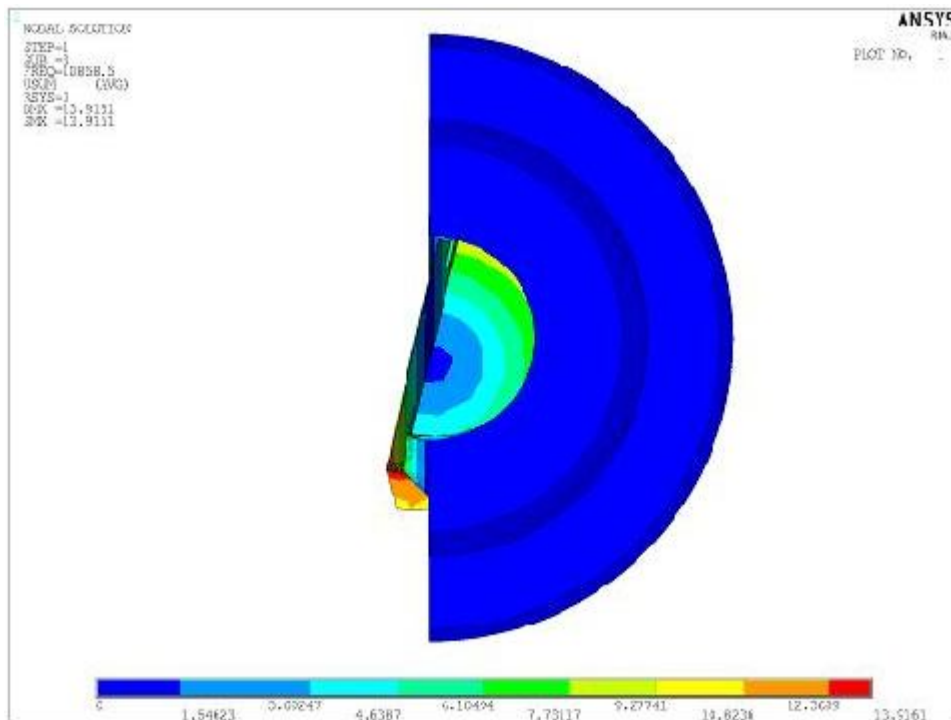


Рис. 27. Третья форма колебаний (10,86 кГц) камеры.

Выводы

В результате произведенных расчетов аэродинамического обтекания при разгоне блока видеорегистрации с установленной регистрирующей аппаратурой получены значения параметров аэродинамического воздействия на регистрирующую аппаратуру при

сверхзвуковом обтекании и при обработке испытаний транспортных упаковочных комплектов на ракетном треке. Произведен расчет прочности при разгоне блока видеорегистрации до 119 м/с, в результате можно заключить, что уровень эквивалентных напряжений в элементах конструкции не достигает «опасных» значений, для материалов, используемых в конструкции блока, работоспособность регистрирующей аппаратуры обеспечена. Произведен модальный анализ элементов блока, получены первые три значения собственных частот и соответствующие им формы колебаний.

*Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда
(Грант № 14-19-01637).*

Список литературы

1. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов: НП-053-04.-М., 2004.-70 с.
2. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Требования безопасности: TS-R-1.-МАГАТЭ, Вена, 2009. -196 с.
3. Герасимов С.И., Файков Ю. И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света: Монография. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. – 344 с.
4. Герасимов С.И., Файков Ю. И., Холин С.А. Кумулятивные источники света. Монография. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. – 327 с.
5. Бате К. Д., Вилсон Е. Л. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 44 8с.
6. Вержбицкий В. М. Основы численных методов: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 2005.- 840 с.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
8. Норри Д., Де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
9. Образцов И. Ф., Савельев Л. М., Хазанов Х. С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов: Учебное пособие для студентов авиац. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985.- 392 с.
10. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
12. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 349 с.