

**С.И. Герасимов<sup>1</sup>, В.И. Ерофеев<sup>2</sup>, В.А. Кикеев<sup>2</sup>, М.Р. Турусов<sup>3</sup>, А.Н. Ганичев<sup>3</sup>**  
**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ БЛОКАВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ**  
**В УСЛОВИЯХ ИСПЫТАНИЙ НА РАКЕТНОМ ТРЕКЕ**

*<sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики*

*<sup>2</sup>Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБУН Федеральный  
исследовательский научный центр Институт прикладной физики РАН*

*<sup>3</sup>Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ «МИФИ»*

Выполнена оценка аэродинамического воздействия на элементы регистрирующей аппаратуры в условиях испытаний на ракетном треке при сверхзвуковой скорости движения поезда. Построена конечно-элементная модель элементов аппаратуры, проведен расчет прочности светочувствительного датчика и видеокамеры исходя из условий разгона и торможения ракетного поезда. Получено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в элементах блока видеорегистрации.

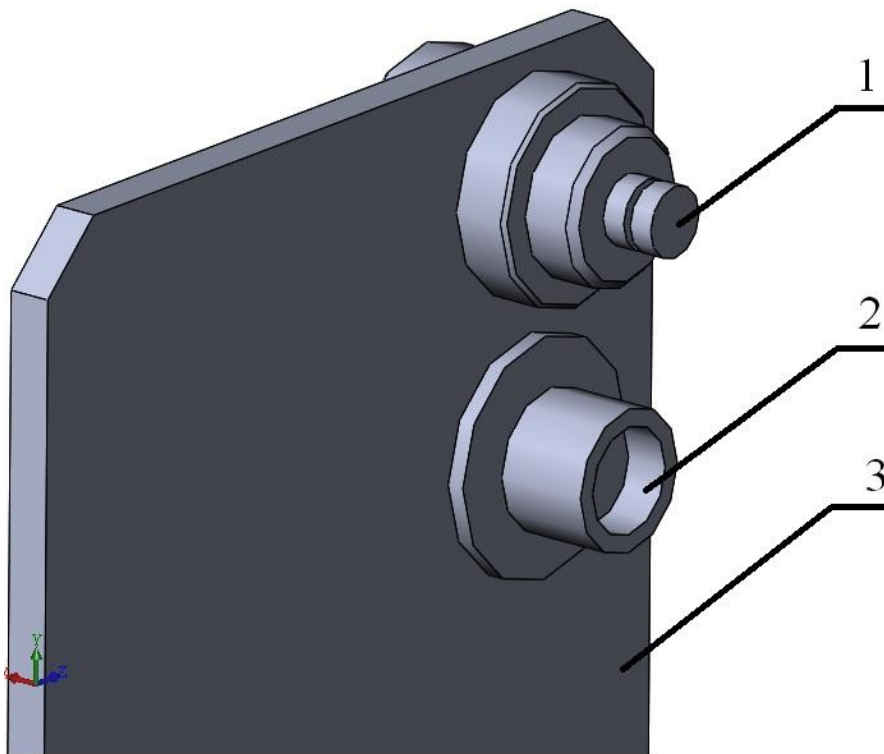
**Ключевые слова:** *аэробаллистические испытания, сверхзвуковое обтекание, ракетный трек, численное моделирование аэродинамических процессов, визуализация аэродинамических процессов.*

### **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. 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, действующих 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.

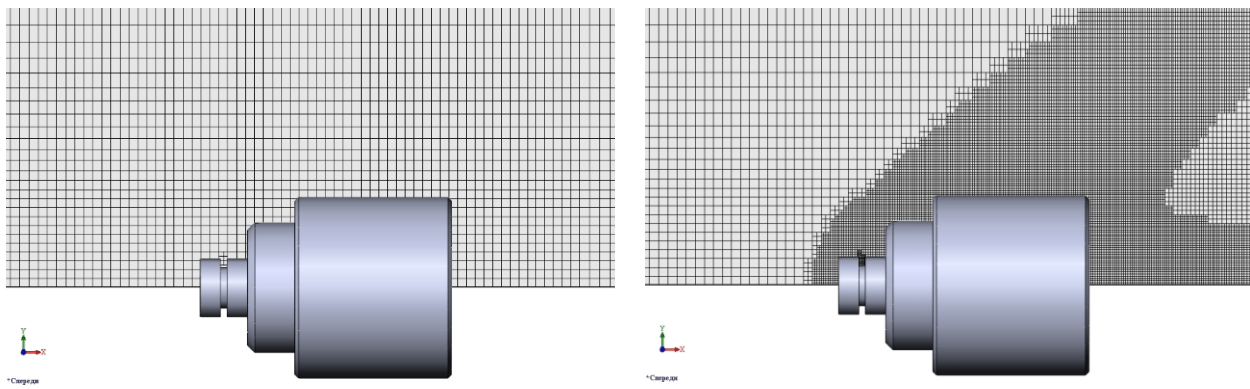


**Рис.1. Схема блока видеорегистрации:**  
**1 – видеокамера; 2 – светочувствительный элемент; 3 – фундамент**

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  $0,9 \times 0,9 \times 0,5$  м. Трехмерный расчет внешнего обтекания сверхзвуковым потоком сжимаемого газа проводился с учетом соответствующих условий на границе расчетного домена и поверхностях модели. Решались полные, усредненные 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. Расчетная сетка для расчетов обтекания модели дважды адаптировалась 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.

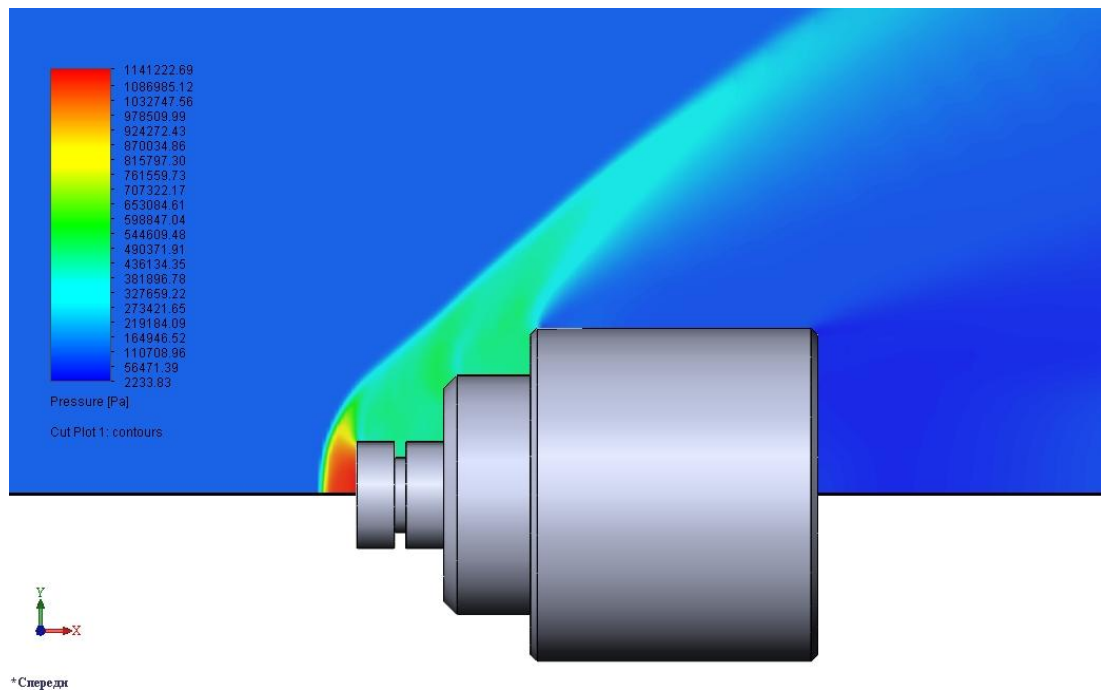
В результате произведенных расчетов получены поля давлений и температур на поверхностях видеокамеры и светочувствительного элемента. Полученные данные необходимы для дальнейшего анализа прочности регистрирующей аппаратуры. На схеме, приведенной на рис.1, регистрирующая аппаратура располагается непосредственно на фундаменте блока видеорегистрации. В некоторых случаях, например, при невозможности расположения аппаратуры на фундаменте, либо при необходимости изменения ракурса съемки аппаратура 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.

Исходная расчетная и дважды адаптированная сетка в процессе расчета после 500 и 1000 итераций приведены на рис.2. Исходная сетка состояла из 138495 ячеек, а дважды адаптированная сетка 647251.

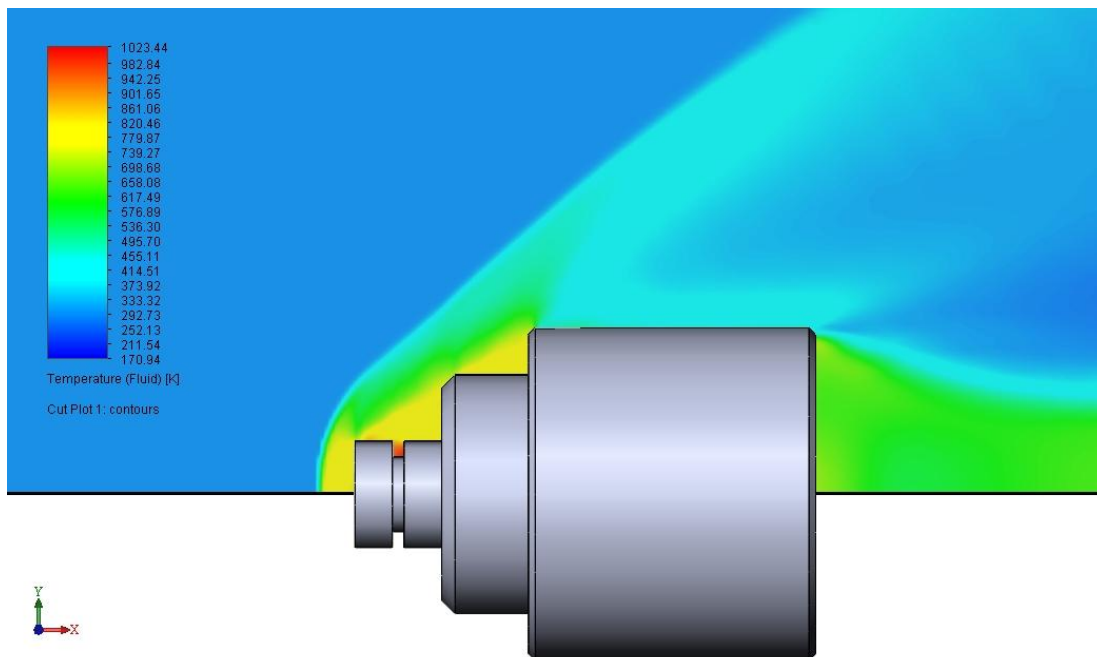


**Рис. 2. Часть расчетной сетки при моделировании обтекания модели видеокамеры со скоростью  $M=3$**

Характер распределения давления и температуры в среде и на фронтальных поверхностях видеокамеры приведен на рисунках 3-6.

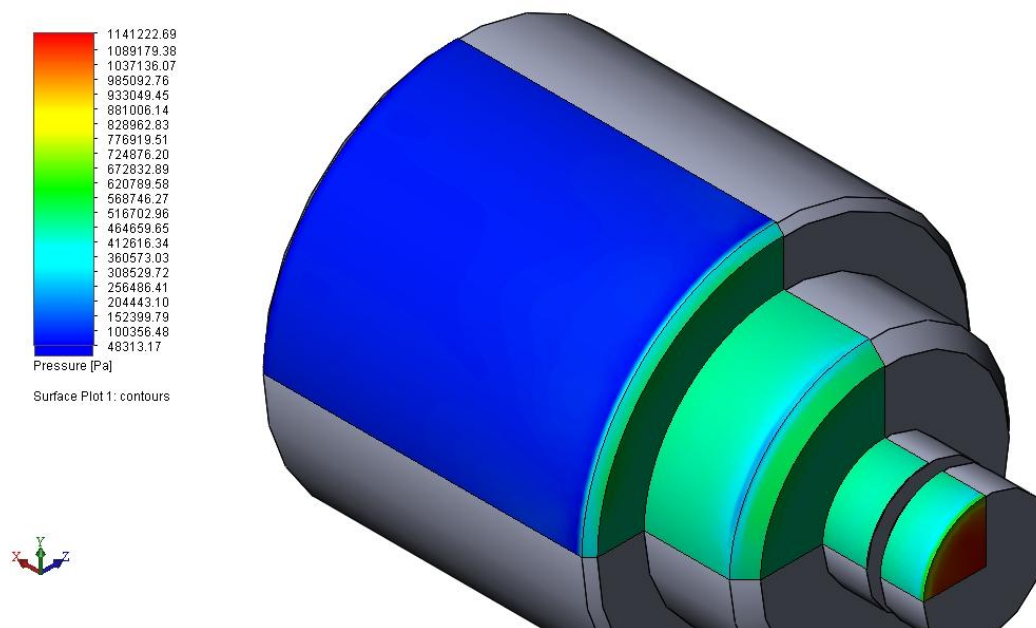


**Рис. 3. Распределение полей давлений (Па) в среде при обтекании видеокамеры с начальной скоростью  $M=3$**

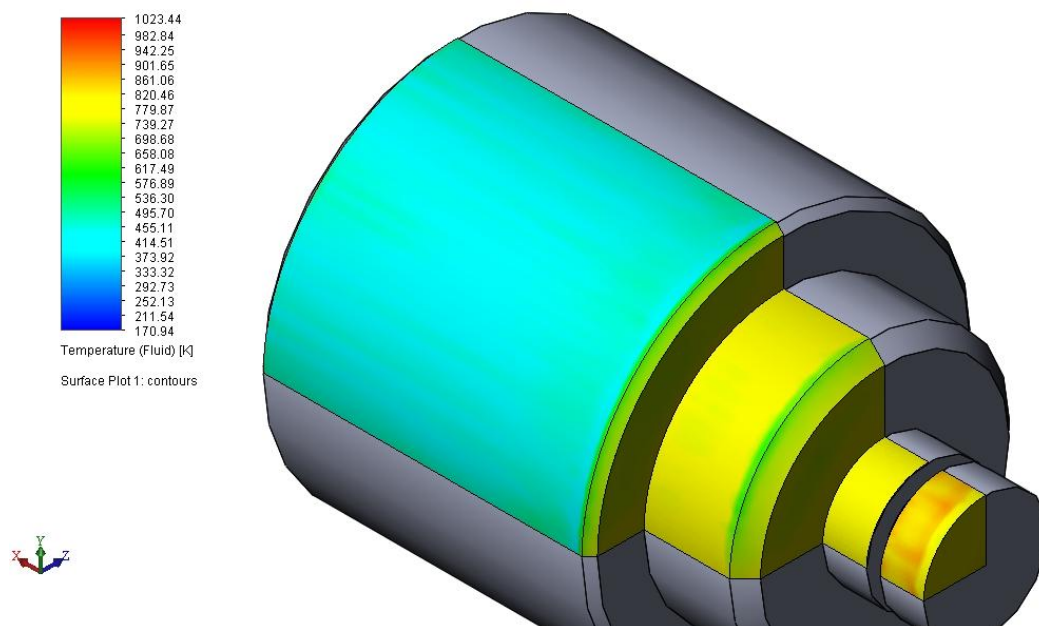


\* Спереди

**Рис.4. Распределение полей температур (К) в среде при обтекании видеокамеры с начальной скоростью  $M=3$**



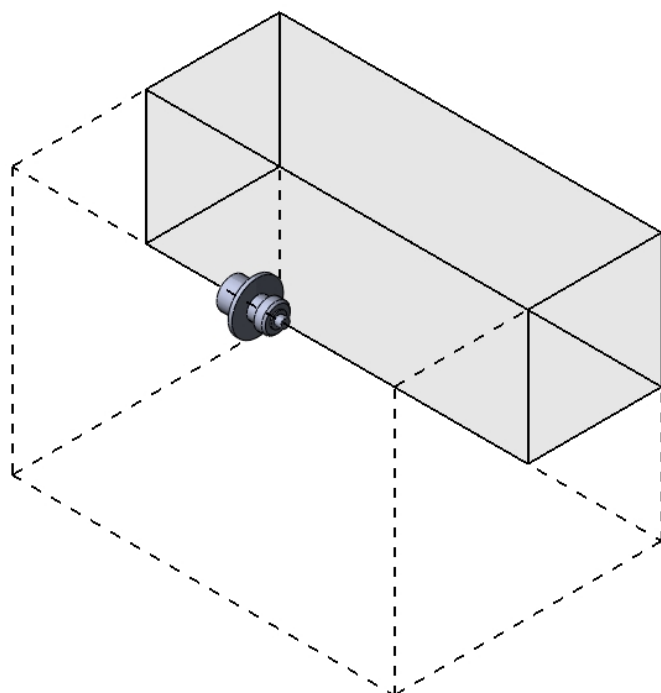
**Рис.5. Распределение полей давлений (Па) на поверхности видеокамеры при обтекании с начальной скоростью  $M=3$**



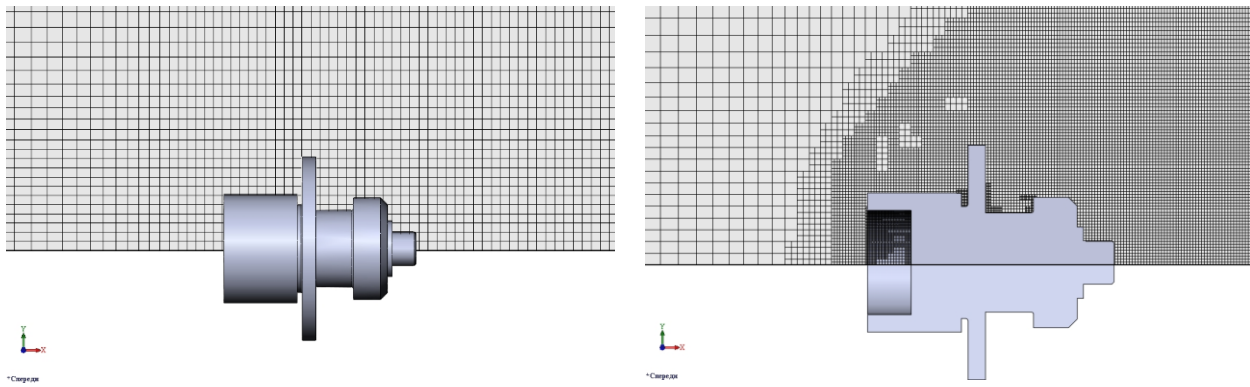
**Рис 6. Распределение полей температур (К) на поверхности видеокамеры при обтекании с начальной скоростью  $M=3$**

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. 7).

Исходная расчетная и дважды адаптированная сетка в процессе расчета после 500 и 1000 итераций приведены на рис.8. Исходная сетка состояла из 127568 ячеек, а дважды адаптированная сетка 913682.

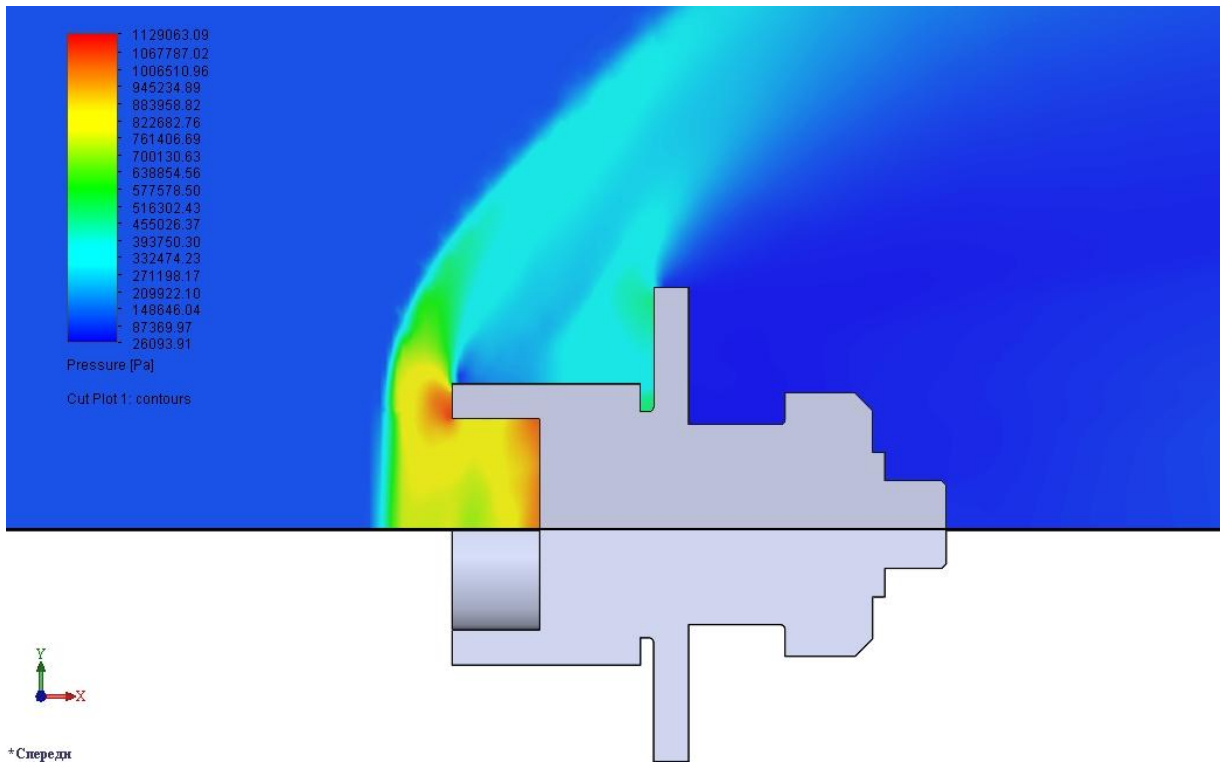


**Рис.7. Расчетный домен, принятый при моделировании обтекания модели светочувствительного элемента со скоростью  $M=3$**



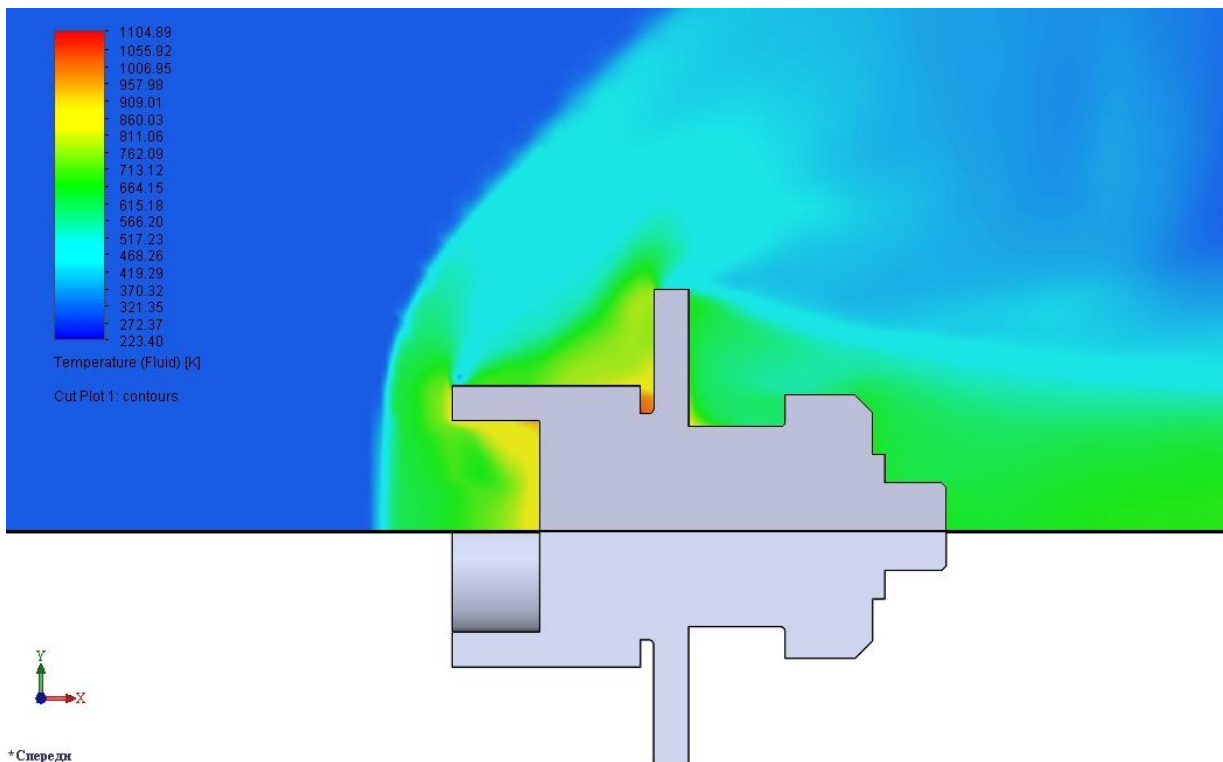
**Рис. 8. Часть расчетной сетки при моделировании обтекания модели светочувствительного элемента со скоростью  $M=3$**

Характер распределения давления и температуры в среде и на фронтальных поверхностях светочувствительного элемента приведен на рис. 9-10.

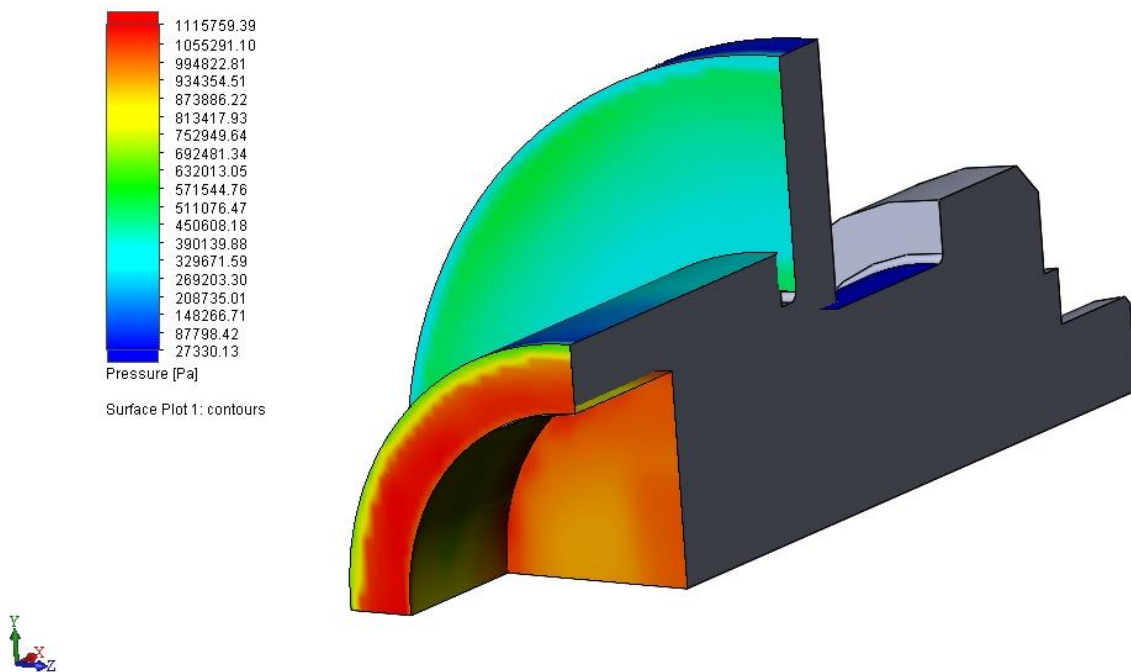


**Рис. 9. Распределение полей давлений (Па) при обтекании светочувствительного элемента с начальной скоростью  $M=3$**

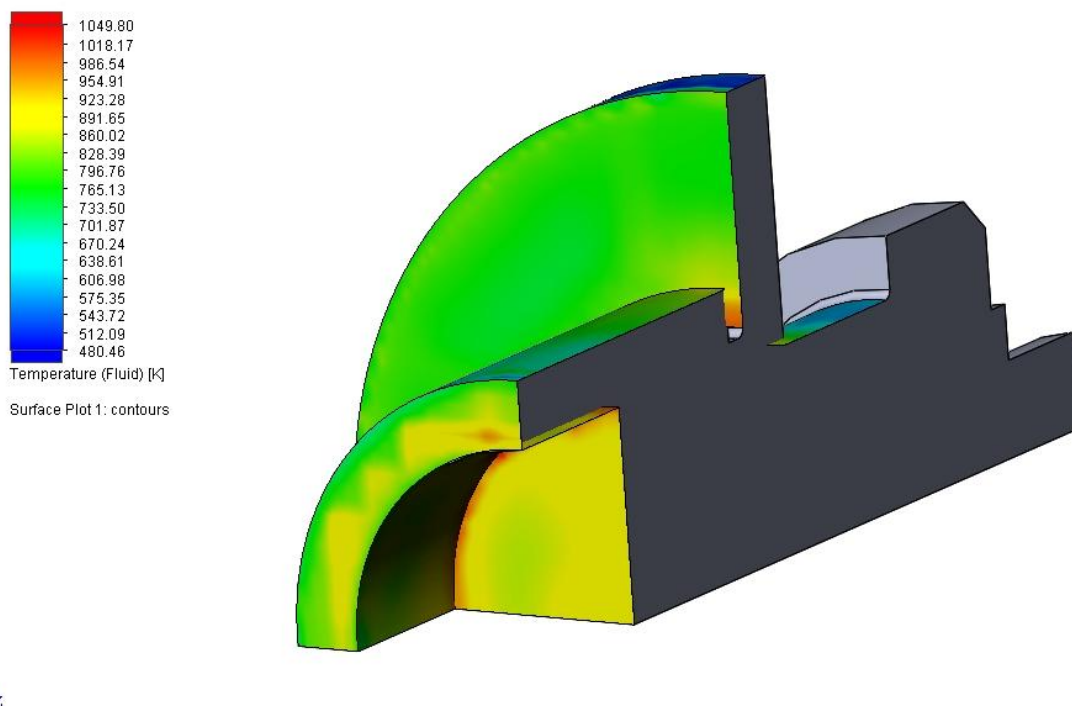




**Рис. 10.** Распределение полей температур (K) при обтекании светочувствительного элемента с начальной скоростью  $M=3$



**Рис. 11.** Распределение полей давлений (Pa) на поверхности светочувствительного элемента при обтекании с начальной скоростью  $M=3$



**Рис. 12. 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  $M=3$ . Полученные значения давлений и 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 расчетов (CAE, Computer-Aided Engineering) и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого 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.13. 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.14-15.



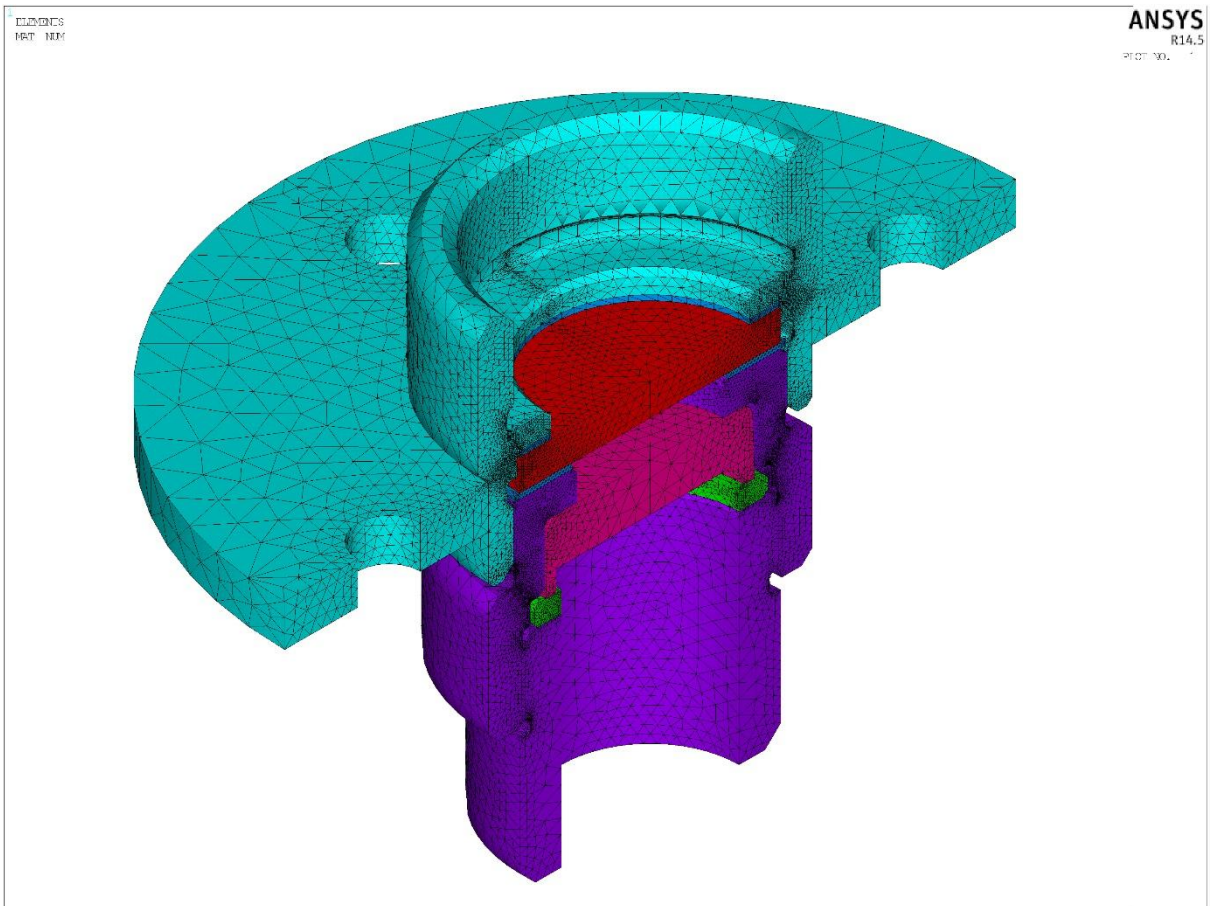


Рис. 13. Конечно-элементная сетка модели светочувствительного элемента

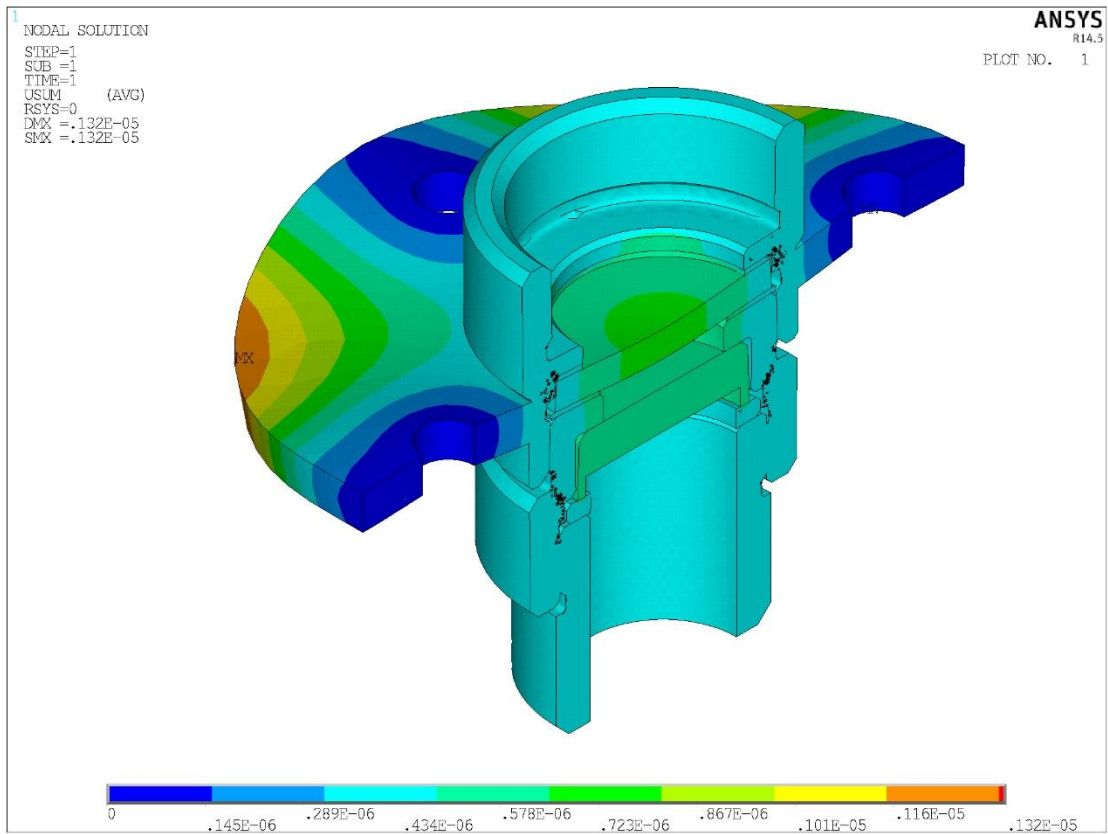
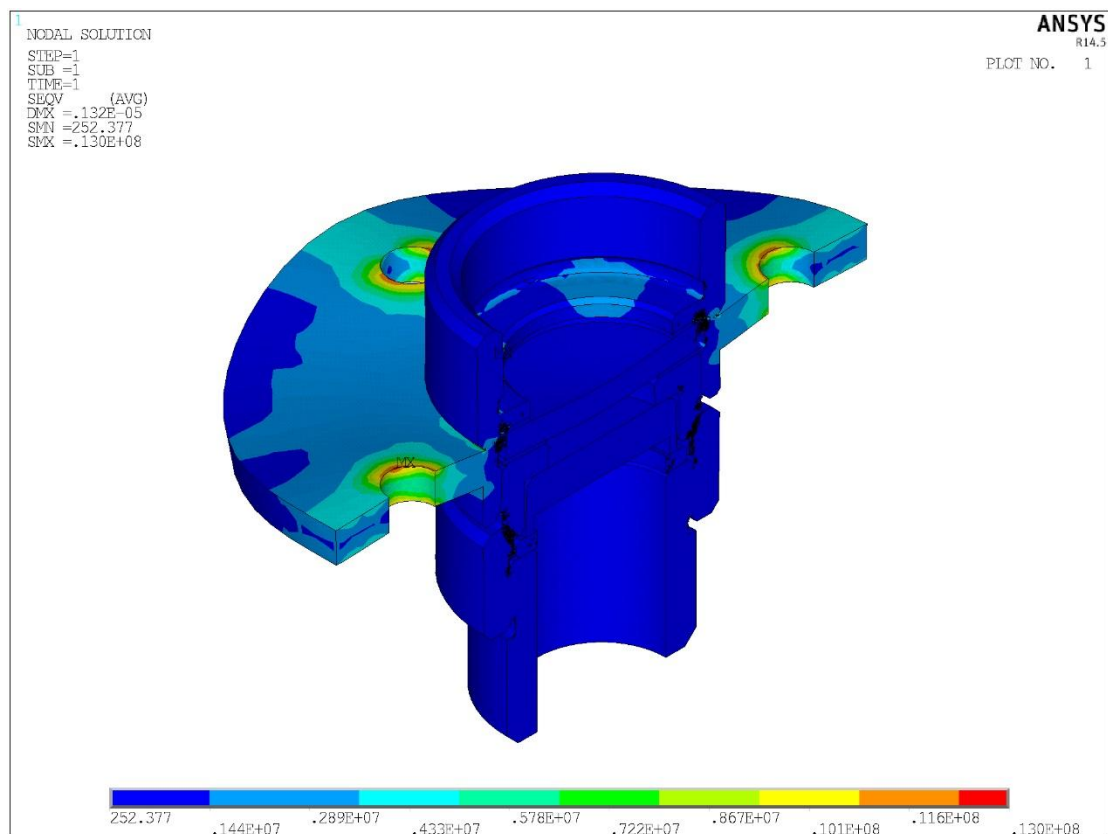


Рис. 14. Суммарный вектор перемещений модели светочувствительного элемента



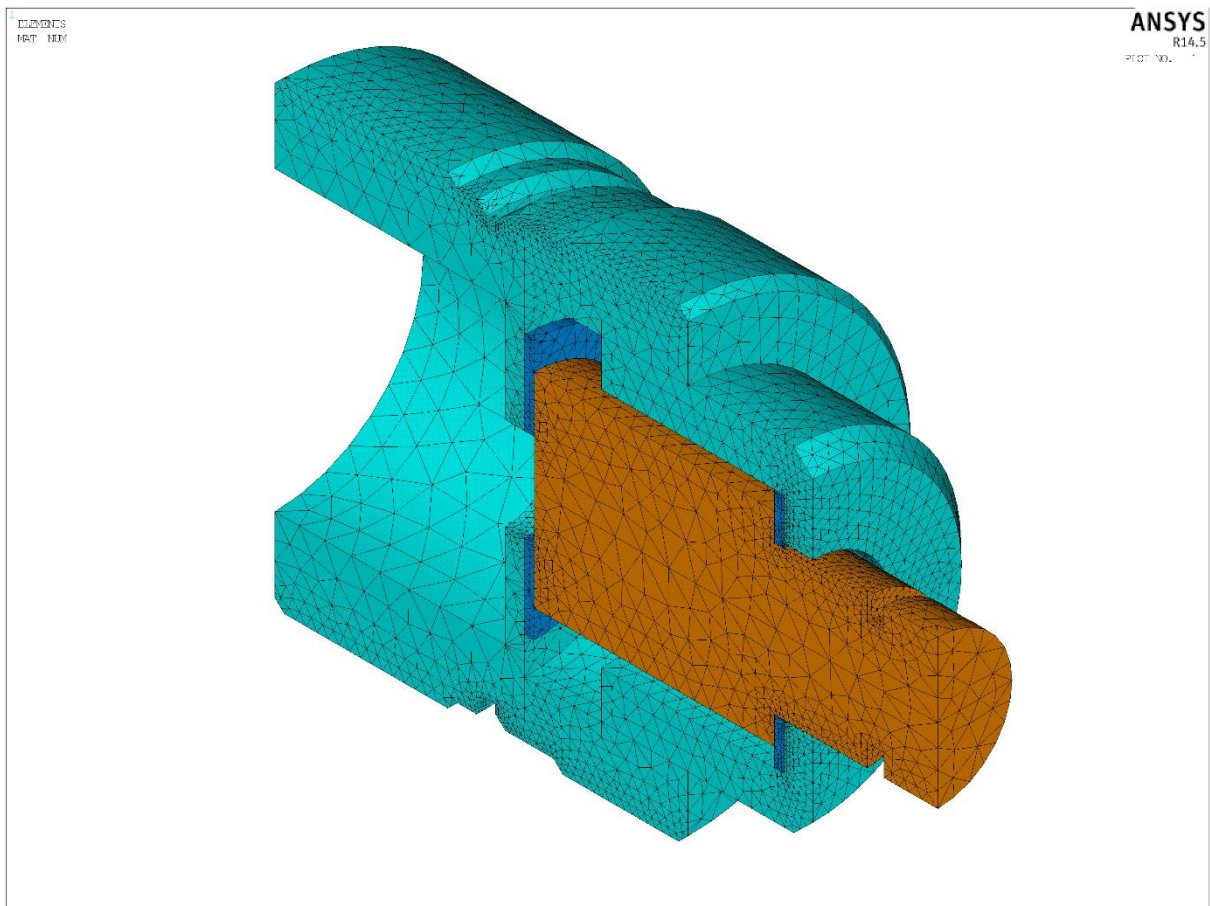
**Рис. 15. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в модели светочувствительного элемента**

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

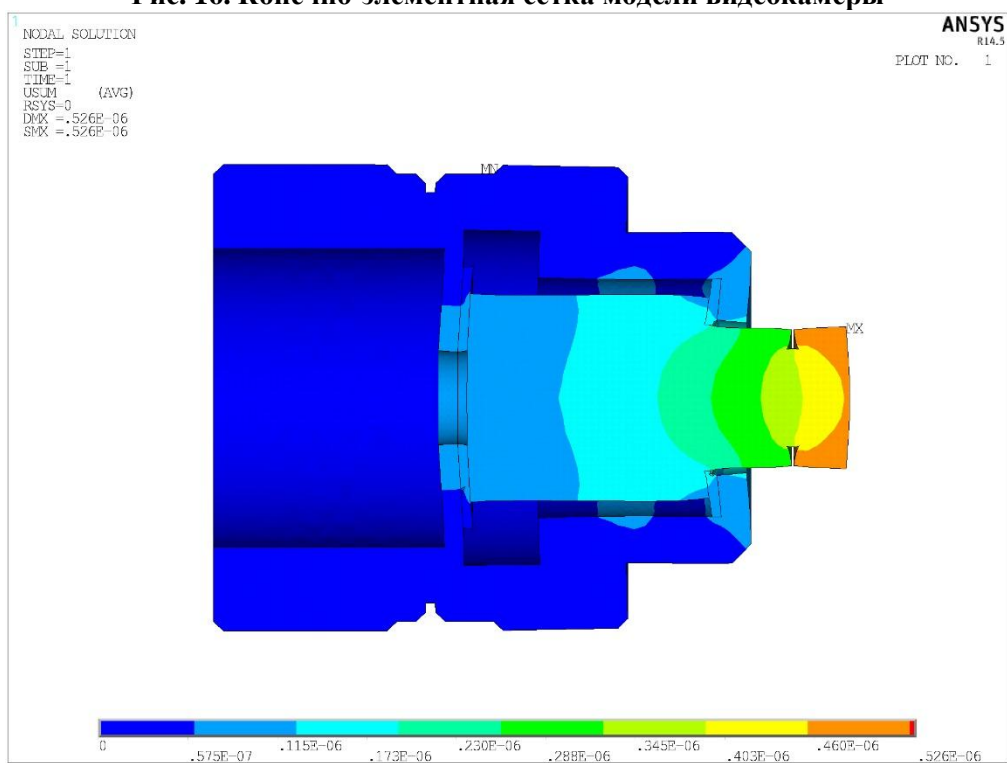
Для построения конечно-элементной модели светочувствительного элемента использовался элемент SOLID 185 из библиотеки конечных элементов ANSYS. Данный тип конечного элемента имеет три степени свободы (перемещения) в узлах и поддерживает пластичность, гиперупругость ползучесть и учет больших деформаций.

Конечно-элементная сетка, используемая в аналогичных расчетах видеокамеры показана на рис.16. 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.

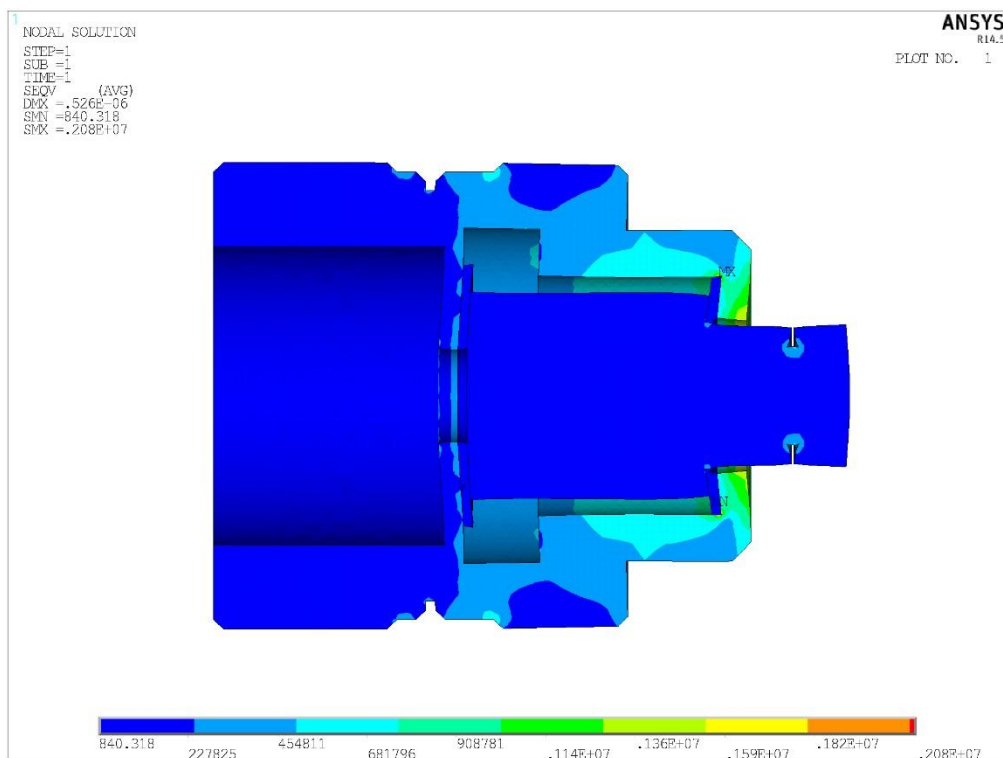
Контурные изображения полей напряжений и суммарного вектора перемещений показаны на рис.17-18.



**Рис. 16. Конечно-элементная сетка модели видеокамеры**



**Рис.17. Суммарный вектор перемещений модели видеокамеры**



**Рис.18. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в модели видеокамеры**

### **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 отработке 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.

### **Библиографический список**

1. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов: НП-053-04 [Текст]. – М., 2004. – 70 с.
2. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Требования безопасности: TS-R-1 [Текст]. – МАГАТЭ, Вена, 2009. – 196 с.
3. Герасимов, С.И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света [Текст] / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. – 344с.
4. Герасимов, С.И. Кумулятивные источники света [Текст] / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков, С.А. Холин. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. – 327с.
5. Бате, К.Д. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К.Д. Бате, Е.Л. Вилсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 448с.
6. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов [Текст] / В.М. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2005. – 840 с.
7. Зенкевич, О. Метод конечных элементов. Основы [Текст] / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
8. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов [Текст] / Д. Норри, Ж. де Фриз. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
9. Образцов, И.Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных

- аппаратов[Текст] / И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Х.С. Хазанов. – М.: Высшая школа, 1985. – 392 с.
10. **Оден, Дж.** Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред [Текст] / Дж. Оден. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
11. **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов [Текст] / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
12. **Стренг, Г.** Теория метода конечных элементов [Текст] / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М.: Мир, 1977. – 349 с.