

УДК 533.9.07

А. В. ЛОЯН, А. И. ЦАГЛОВ, А. И. ПИСАНЫЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОДРОССЕЛЯ

В статье представлен анализ конструкции термодросселя под действием стартовых и тепловых нагрузок, а именно гармонической и широкополосной случайной вибрации, ударных нагрузок и температурных напряжений во время работы. Приведены результаты предварительных расчетов на собственные резонансные частоты (модальный анализ), которые показали наличие резонансных частот в области ниже 2000 Гц, входящих в диапазон широкополосной случайной вибрации ракетоносителя. Также определены напряжения, возникающие вследствие температурных расширений в процессе работы. Показано, что напряжения и деформации в элементах конструкции термодросселя не превышают допустимых значений для материалов, из которых изготовлены данные детали.

Ключевые слова: электроракетный двигатель, модальный анализ, температурные напряжения, вибрационные нагрузки, термодроссель.

Введение

Термодроссель – устройство, позволяющее регулировать массовый расход рабочего тела (РТ), используя зависимость вязкости газа от температуры.

Массовый расход РТ зависит от газового сопротивления магистрали, которая определяется геометрическими размерами трубопровода и динамической вязкостью газа. Термодроссель представляет собой капилляр, нагреваемый протекающим через него электрическим током. Капилляр отделен от остальных частей газовой магистрали при помощи диэлектрических вставок. Электрический ток подводится к капилляру при помощи электродов. Изменение температуры капилляра приводит к изменению динамической вязкости газа и как следствие, изменению массового расхода через капилляр. Предел регулировки расхода определяется площадью сечения, длиной и диапазоном рабочих температур капилляра.

При старте ракеты термодроссель подвергается вибрационным и ударным нагрузкам, которые могут повредить его еще до вывода на орбиту. Во время работы капилляр нагревается и из-за разных коэффициентов линейного расширения материалов капилляра, токоподводов и диэлектрических вставок, при нагреве в местах контактов деталей возникают температурные напряжения.

При выходе из строя термодросселя вся двигательная установка придет в негодность, следовательно, термодросселю необходимы тщательные проверки на прочность. Для уменьшения времени проектирования термодросселя перед изготовлением и физическими

испытаниями необходимы теоретические расчеты прочности термодросселя, которые производились методом конечных элементов в среде ANSYS Workbench [2][3].

Цель работы

Рассчитать напряжения, возникающие в термодросселе во время старта ракеты-носителя и в процессе работы. На основе полученных данных найти опасные участки в конструкции термодросселя и определить необходимые конструктивные модификации термодросселя.

Расчет геометрических параметров термодросселя

Расчетной деталью в термодросселе являются геометрические размеры капилляра. Длина капилляра зависит от массового расхода газа, площади поперечного сечения газового канала и разницы давлений на концах капилляра, и рассчитывается по формуле [1]:

$$l = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot P \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot \dot{m} \cdot R \cdot T}; \quad (1)$$

где, d - диаметр газового канала капилляра;
 P - среднее давление в капилляре;
 ΔP - перепад давления в капилляре;
 μ - динамическая вязкость газа;
 \dot{m} - массовый расход газа;
 R - газовая постоянная;
 T - температура газа.

Рабочим телом является ксенон с минимальным массовым расходом 3,8 мг/с. Капилляр представляет собой трубку из стали 12Х18Н9Т с диаметром проходного канала 0,2 мм. Гранич-

ными условиями для расчета являются: давление на входе в термодроссель 0,1МПа, давление на выходе из термодросселя 500Па, и рабочая температура капилляра при минимальном расходе равна 200 °С. При данных условиях длина капилляра равна 40 мм.

Геометрические размеры остальных деталей термодросселя задаются исходя из технологических и конструкторских соображений. В нашем случае термодроссель представляет паяный металлокерамический узел (рис. 1), состоящий из 2-х штуцеров (1, 2), стоящих на опоре (6), к которым крепятся трубки подвода и отвода газа, и двух токоподводов (5), к которым крепится капилляр (4) и провода. Все металлические детали разделены диэлектрическими вставками (3). На входе в термодроссель в штуцере (1) предусмотрен фильтр.

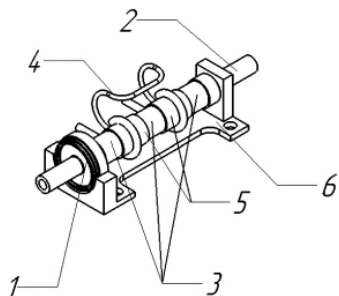


Рис. 1. Конструкция термодросселя

Расчет конструкции термодросселя на стартовые нагрузки

Входными данными для расчетов нагрузок являются данные, представленные в документации ракеты-носителя Днепр [4]. Данные собраны в таблице 1.

При первом расчете были найдены резонансные частоты термодросселя, на основе анализа которых производились дальнейшие исследования.

Нахождение собственных частот термодросселя было выполнено при помощи модуля modal. Значения первых шести резонансных частот представлены в табл. 2.

Таблица 1
Стартовые нагрузки РН «Днепр»

Вид нагрузки	Частота, Гц	Нагрузка
Синусоидальная вибрация	5-10	0,5g
	10-15	0,6g
	15-20	0,5g
Широкополосная случайная вибрация	20-160	0,007g ² /Гц
	160-320	0,022-0,035 g ² /Гц
	320-640	0,035 g ² /Гц
	640-1280	0,035-0,017 g ² /Гц
	1280-2000	0,017-0,005 g ² /Гц
Ударные нагрузки	30	5 g
	1000	1000 g
	5000	1000 g

Таблица 2
Значения первых шести резонансных частот

1	1373,6Гц
2	2070,1Гц
3	2229,3Гц
4	4223,9Гц
5	4840,2Гц
6	7440,8Гц

Таким образом только 1 резонансная частота имеет значение менее 2000 Гц.

Форма колебаний трубки на частоте 1373,6 Гц отображена на рис. 2.

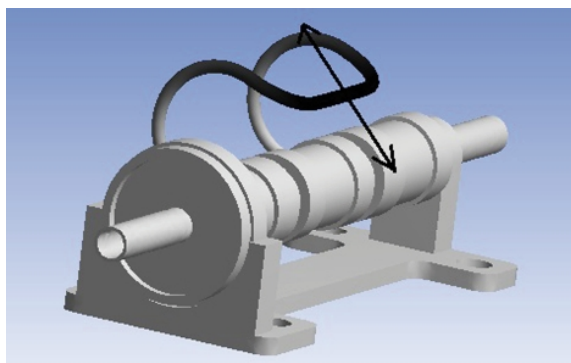


Рис. 2. Колебания на частоте 1373,6 Гц

Как видно на рис. 1, в резонанс вступает только капилляр, остальные элементы термодросселя в резонанс не вступают.

Далее был произведен расчет на ударные нагрузки. Входными данными является зависимость величины ускорения от частоты. Расчет производился в модуле Response spectrum. В результате расчета получены результаты распределения напряжений, которые представлены на рис. 3.

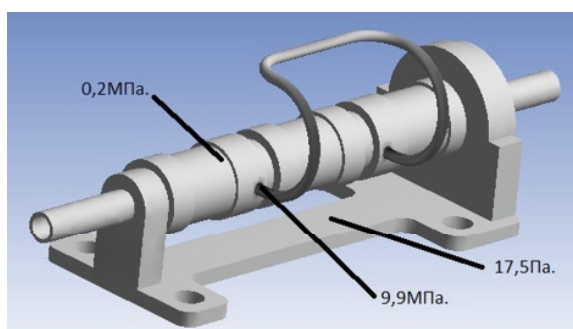


Рис. 3. Распределение напряжений при ударных нагрузках

В результате расчета на ударные нагрузки видно, что максимальные напряжения равны 9,9 МПа и находятся в местах крепления капилляра. Полученное значение значительно ниже предела выносливости для стали 12Х18Н10Т, который равен 279МПа [4].

Следующим параметром при расчете являются широкополосные случайные нагрузки, возникающие во время полета. Расчет производился в модуле Random vibration. В результате расчета получены результаты распределения напряжений, которые представлены на рис. 4.

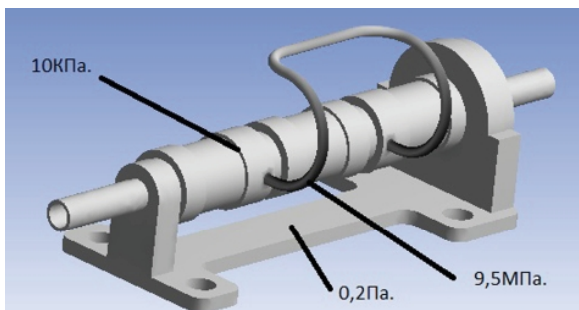


Рис. 4. Распределение напряжений при случайных вибрационных нагрузках

В результате расчета на случайные вибрации были получены напряжения значительно меньше, чем при расчете на ударные нагрузки. Максимальные напряжения составили 10 КПа. Зона максимальных напряжений также располагалась в месте крепления капилляра.

Третьим по счету являлся расчет на вибрационные нагрузки в условии синусоидальных гармонических колебаний, произведенный в модуле Harmonic response. Исходя из данных, представленных для расчета (табл. 1), была произведена проверка для 3-х режимов. После расчета был выбран случай с наибольшими напряжениями. В результате расчета получен результат распределения напряжений (рис. 5).

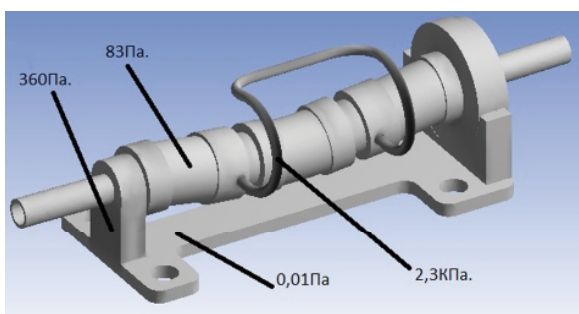


Рис. 5. Распределение напряжений при постоянных вибрационных нагрузках

Расчет на гармонические вибрации показал максимальные напряжения, значения которых равны 2,3 КПа, что также меньше предела выносливости. Наиболее нагруженным элементом конструкции является капилляр. Напряжения, возникающие в остальных элементах конструкции незначительны.

Таким образом расчет на предстартовые нагрузки не выявил «слабых» мест в конструкции термодросселя. Коэффициент запаса прочности

капилляра определяется исходя из максимальных напряжений, которые возникают при ударных нагрузках:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma} = \frac{279}{9,9} = 28,2; \quad (2)$$

где: $[\sigma]$ – предел выносливости;
 σ – напряжения в конструкции.

Тепловое состояние термодросселя

Далее были рассчитаны тепловые деформации, возникающие при условии максимального температурного перепада. Капилляр термодросселя разогревается во время работы до 200 °С, в то время как температура платформы, на которой он установлен может падать до -60 °С. Исходя из этого при помощи модуля Steady-State Thermal было найдено распределение температур в термодросселе, указанное на рис. 6.

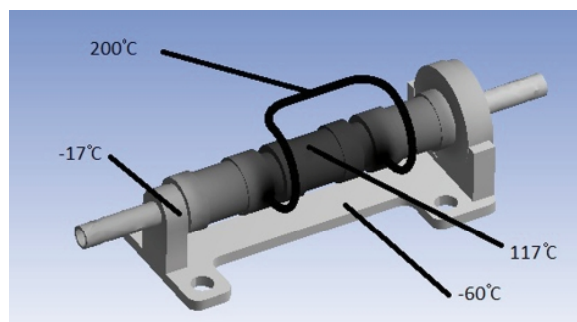


Рис. 6. Распределение температур в термодросселе во время работы

На основе результатов распределения температур в модуле Static Structural были найдены напряжения, возникающие во время работы вследствие температурных деформаций (рис. 7).

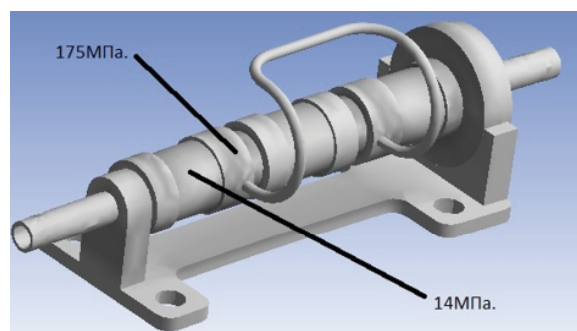


Рис. 7. Распределение напряжений, возникающих вследствие температурных деформаций

Исходя из расчета, максимальные напряжения составили 175 МПа. Напряжения распределены в местах контактов керамики со сталью. Данные напряжения являются наибольшими из всех, которые испытывал термодроссель

во время расчета. И в отличие от стартовых нагрузок, температурные деформации будут возникать во время работы двигательной установки. Следовательно, температурные напряжения являются опаснейшей угрозой термодросселю и вследствие большого числа запусков двигателя могут вызвать усталостное разрушение деталей.

Коэффициент запаса прочности при тепловых нагрузках составляет:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma} = \frac{279}{175} = 1.6, \quad (3)$$

где: $[\sigma]$ – предел выносливости;
 σ – напряжения в конструкции.

Выводы и дальнейшие перспективы

Таким образом напряжения, возникающие при стартовых нагрузках, не достигают опасных значений. Из проведенного расчета видно, что напряжения при температурных деформациях значительно выше напряжений, возникающих во время стартовых нагрузок. Это обусловлено тем, что металлические детали термодросселя изготовлены из стали 12Х18Н9Т, керамические части термодросселя изготовлены из керамики марки ВК94[5]. Это связано с тем, что данные материалы имеют различный коэффициент температурного расширения. Для решения данной проблемы рекомендуется замена материала металлических деталей на металл с меньшим

коэффициентом линейного расширения таких как титан или сплавы на его основе. Вследствие уменьшения разницы значений коэффициентов температурного расширения значительно снизятся значения напряжений, возникающих в термодросселе во время работы.

Литература

1. Матылев Н. А. Электрореактивные двигательные установки [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. А. Матылев, Ю. А. Шепетов, Л. А. Базыма – Национальный аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2010. - 340 с.
2. Бруяка В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Ч. 1 [Текст] / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Я. В. Курвева. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.
3. Бруяка В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Ч. 2. [Текст] / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Я. В. Курвева. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 73 с.
4. Space Launch System Dnepr User's guide [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://snebulos.mit.edu/projects/crm/DNEPR/Dnepr_User_Guide.pdf - 10.06.2016 г.
5. Андреева Р. Т. Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов: справочное пособие [Текст] / Р. Т. Андреева, С. И. Ипатова, Н. С. Розина. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.

Поступила в редакцию 16.06.16

А. В. Лоян, О. І. Цаглов, А. І. Писаний. Дослідження міцностних властивостей термодросселя

У статті представлений аналіз конструкції термодросселя під дією стартових і теплових навантажень, а саме гармонійної і широкопasmової випадкової вібрації, ударних навантажень і температурних напружень під час роботи. Наведено результати попередніх розрахунків на власні резонансні частоти (модальний аналіз), які показали наявність резонансних частот в області нижче 2000 Гц, що входять в діапазон широкопasmової випадкової вібрації ракетноносія. Також визначено напругу, що виникає в результаті температурних розширень в процесі роботи. Показано, що напруги і деформації в елементах конструкції двигуна не перевищують допустимих значень для матеріалів, з яких виготовлені дані деталі.

Ключові слова: електроракетний двигун, модальний аналіз, температурні напруги, вібраційні навантаження, термодроссель.

A.V. Loyan, A.I. Tsaglov, A.I. Pysanuy. Study of strength properties thermo-throttle

The article presents an analysis of the thermo-throttle construction under the influence of starting and thermal loads, namely broadband harmonic and random vibration, shock and pace-temperature-voltage during operation. The results of preliminary calculations of own resonant frequencies (modal analysis), are shown the presence of the resonance frequencies in the region below 2000 Hz, within the range of broadband random vibration rocket. Also it is defined strain arising as a consequence of thermal expansion during operation. It is shown that stress and strain in structural elements of the engine do not exceed the allowable values for the materials of which these parts are made.

Keywords: electric propulsion, modal analysis, thermal stress, vibration loads, thermo-throttle.