

УДК 629.7.036.73

Г.А. ПАРАХИН, Н.Н. КОШЕЛЕВ, А.В. ЛОЯН, О.П. РЫБАЛОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина*

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ СИЛЬНОТОЧНЫХ КАТОДОВ МОЩНЫХ ЭРД

*Обоснована необходимость создания конечноэлементной модели для прогнозирования распределения температур по конструктивным элементам сильноточных катодов. Рассмотрены особенности моделирования радиационного теплообмена между тонкостенными конструкциями с использованием метода конечных элементов. Описана методика расчётно-экспериментального определения теплового потока, используемого в конечноэлементной модели в качестве нагрузки. Приведен пример применения оптимизированной конечноэлементной модели для определения работоспособности опытного образца катода.*

**Ключевые слова:** численная модель, сильноточный полый катод, теплообмен, распределение температур.

### Введение

В рамках европейской программы High Power Electric Propulsion: a Roadmap to the future (HIPER) в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского был создан опытный образец безнакального полого катода с номинальным рабочим током до 50 А. Такой катод смог бы надёжно обеспечить работу мощного СПД или ПИД.

ХАИ имеет достаточно большой опыт в создании подобных изделий, однако высокие значения тока разряда а также стремление уменьшить вес и габариты конструкции сделали её достаточно теплонапряжённой (при первых испытаниях на стенде температура диафрагмы достигала 1000 °С уже при токе разряда 20 А). Многие узлы катода имеют определённую максимально допустимую рабочую температуру, которая определяется механическими и физическими свойствами материалов. Очевидно, что наиболее оптимальной с точки зрения теплонапряжённости будет такая конструкция катода, при которой на номинальном режиме работы температура каждого элемента будет немного ниже максимально допустимой.

Известно, что существуют три механизма передачи тепла: конвекция, теплопроводность и излучение, и доля энергии, передаваемая каждым из этих механизмов, зависит как от свойств материалов, так и от геометрической формы элементов, участвующих в теплообмене. Таким образом, изменяя геометрию и материалы деталей и имея представление о том, как это изменение влияет на распределение температур, можно методом последовательного приближения найти наиболее оптимальную конструкцию, а также оценить её работоспособность на более интенсивных режимах. К сожалению, экспе-

риментальное определение температуры большинства деталей внутри катода является невозможным, поэтому для получения представления о распределении температур по элементам конструкции катода было принято решение построить его конечноразностную модель в программном пакете ANSYS.

### 1. Разработка конечноэлементной модели

Вычислительная машина, производящая расчёт, имеет некоторые ограничения по своим возможностям, поэтому была поставлена задача создать такую конечноэлементную модель, которая потребляла бы наименьшее количество ресурсов.

В программном пакете ANSYS возможно создание как 3D так и 2D моделей. С целью уменьшения необходимого для расчёта объёма оперативной памяти, а также с учётом осесимметричности конструкции было принято решение строить двухмерную геометрию. Осесимметричность при этом задавалась в программе опционально.

Метод конечных элементов основан на том, что конструкция разбивается на элементы, размеры которых значительно меньше геометрических размеров самой конструкции (создаётся сетка), при этом, чем меньше размеры элементов, тем точнее расчёт, но также с увеличением числа элементов значительно возрастает необходимый для расчёта объём оперативной памяти ЭВМ.

Общий вид конечноэлементной модели с сеткой представлен на рис. 1. Для удобства описания модели и полученных результатов на этом же рисунке показано разбиение модели на две условные области: область металлокерамического узла (МКУ) и область диафрагмы.

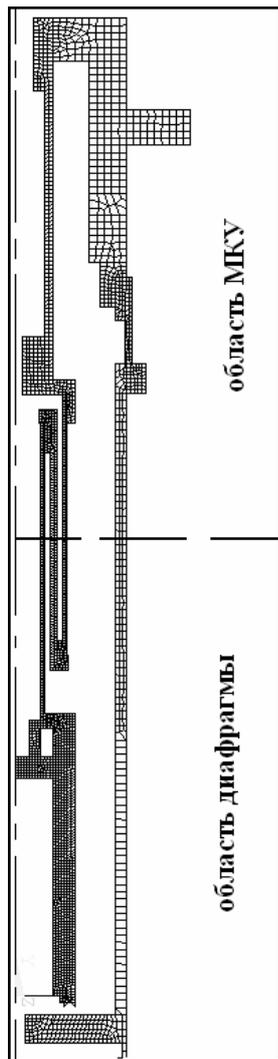


Рис. 1. Модель катода с созданной сеткой и указанием условного разбиения

В рассматриваемом случае, большинство деталей катода имеют длину и диаметр значительно больше, чем толщина стенок детали, поэтому при построении сетки размер элемента может быть равен толщине стенки или являться величиной такого же порядка (рис. 2). Поскольку теплопроводность материалов достаточно высока то градиент температуры по толщине деталей будет незначительным. Теплообмен в модели осуществляется в основном излучением, и количество передаваемого тепла зависит от площади поверхности детали, а не от её объёма. Поверхности в 2D модели представлены линиями, а эти линии разбиваются на большое количество элементов, размеры которых много меньше размеров линий, т.е. требование теории о том, что размеры элемента сетки должны быть значительно меньше размеров моделируемого объекта выполняется. Поэтому небольшое число элементов по толщине детали не окажет значительного влияния на точность результатов. Данное утверждение

было проверено и на практике: действительно при уменьшении размеров элементов сетки в 1,5 раза температура в контрольных точках изменилась не более чем на 2 °С.

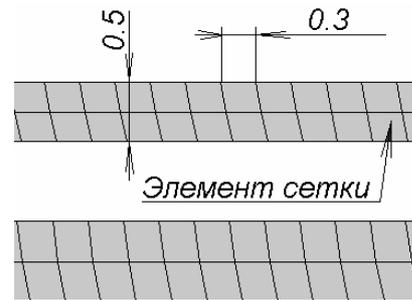


Рис. 2. Сравнение размеров элемента сетки и толщины стенки одной из деталей катода

Расход газа через катод достаточно малый, поэтому в расчётах конвективный теплообмен не учитывается.

В задачах на построение поля температур программой используются следующие зависимости (без учёта конвективного теплообмена) [1].

1) описание теплового баланса с учётом теплоёмкости, теплопроводности, теплового потока через поверхность и генерации тепла в объёме твёрдого тела:

$$\int_V \left( \rho c \delta T \frac{\partial T}{\partial t} + \{L\}^T (\delta T) ([D] \{L\} T) \right) dV = \int_S \delta T q^* dS + \int_V \delta T \ddot{q} dV,$$

где  $V$  – объём элемента;  $\rho$  – плотность материала;  $c$  – удельная теплоёмкость материала;  $\delta T = \delta T(x, y, z, t)$  – допустимая действительная температура;  $T = T(x, y, z, t)$  – температура;  $t$  – время;

$$\{L\} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}; [D] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \text{ – матрица теп-}$$

лопроводности;  $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$  – теплопроводности материала по соответствующим осям;  $S$  – площадь элемента, через которую проходит тепловой поток;  $q^*$  – удельный тепловой поток через поверхность  $S$ ;  $\ddot{q}$  – генерация тепла в объёме элемента;

2) описание теплообмен излучением:

$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{\delta_{ij} - F_{ij}}{\varepsilon_i} - F_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ij} - F_{ij}) \sigma T_i^4,$$

где  $N$  – число поверхностей участвующих в теплообмене;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\varepsilon_i$  – коэффициент

черноты поверхности;  $F_{ij}$  – фактор видимости;  $A_i$  – площадь  $i$ -ой поверхности;  $Q_i$  – энергия отдаваемая  $i$ -й поверхностью;  $\sigma$  – константа Стефана-Больцмана;  $T_i$  – абсолютная температура  $i$ -й поверхности;

В связи с этим, в созданной конечноэлементной модели заданы такие теплофизические свойства материалов, как, плотность, теплопроводность, теплоёмкость, коэффициент черноты поверхности (остальные величины заданы в программе или рассчитываются автоматически). В реальности все эти коэффициенты зависят от температуры. С учётом того, что на данном этапе работ был необходим расчёт поля температур в установившемся режиме работы катода, в модели эти величины являются постоянными (и заданы для того диапазона температур, в котором предполагается работа той или иной детали). Это вносит некоторые погрешности в расчёт, но в дальнейшем они будут устранены посредством табличного или функционального задания зависимостей свойств материалов от температуры.

На границе расчётной области расположена условная «стенка», имеющая постоянную температуру поверхности 30 °С и коэффициент черноты поверхности 1, что соответствует условиям в вакуумной камере (при первых экспериментах температура стенок вакуумной камеры после часа работы катода не превышала 25 °С, а большой по сравнению с испытуемой конструкцией объём и большое число оборотов в камере практически исключает отражение).

За начальные условия расчёта принята температура всех элементов конструкции 20 °С. Далее конструкция нагружалась следующим образом: на внутреннюю поверхность эмиттера направлялся интегральный тепловой поток, величина которого определялась расчётно-экспериментальным методом. На внутреннюю поверхность диафрагмы также направлялся интегральный тепловой поток, вычисленный с использованием того же метода, но с использованием других исходных данных (методика определения тепловых потоков будет описано ниже). Между различными поверхностями катода, а также между наружной поверхностью и условной «стенкой» задавался теплообмен излучением.

После создания модели, была проверена её адекватность с использованием баланса подведенной и отведенной мощности. В качестве примера, при подведении 200 Вт тепловой мощности (100 Вт на эмиттер и 100 Вт на диафрагму), излучение с поверхности составило 190 Вт, т.е. погрешность составила 5%. Эту погрешность можно объяснить ошибками при проверке (элементарная поверхность с которой по закону Стефана-Больцмана рассчитывался тепловой поток была в несколько раз больше элемента сетки, созданной ANSYS).

Также для проверки адекватности было проведено сравнение расчётных и экспериментальных температур в трёх контрольных точках (рис. 3) поверхности и при различных токах 5, 10 и 15 А. Результаты сравнения при токе 10 А показаны в табл. 1.

В целом, по результатам проверки модель была признана адекватной.

Таблица 1

Температура в контрольных точках катода, полученная экспериментальным и расчётным путём с помощью конечноэлементной модели при работе катода на токе 15 А

	Т эксперим, К	Т расч, К
КТ 1	1151	1132
КТ 2	795	783
КТ 3	772	759
КТ - контрольная точка		

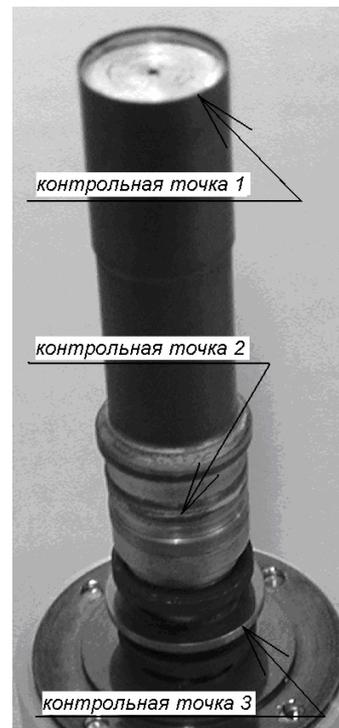


Рис. 3. Общий вид опытного образца катода с номинальным рабочим током до 50 А

## 2. Расчётно-экспериментальное определение тепловых потоков

После построения и проверки адекватности модели при задании некоторого произвольного нагружения, появился вопрос о действительном значении теплового потока направленного на эмиттер. Вначале была предпринята попытка рассчитать эту величину аналитически (без учёта эмиссионного охлаждения):

$$N = U_{i \delta \delta \delta} \cdot I_{\delta},$$

где  $U_{i \delta \delta \delta}$  – прикатодное падение потенциала,  $I_{\delta}$  – ток разряда.

Однако после получения первых экспериментальных данных стало ясно, что они значительно отличаются от данных, полученных из расчёта в ANSYS.

Следовательно, в аналитической зависимости не были учтены какие-то неизвестные нам физические процессы, происходящие на эмиттере. С другой стороны, было выдвинуто предположение, что на диафрагму также направлен тепловой поток, но аналитические зависимости для его определения нам не известны. В связи с этими обстоятельствами было принято решение подбора тепловых потоков расчётно-экспериментальным методом, суть которого заключается в следующем: при различных параметрах работы катода измерялась температура некоторой контрольной точки катода, а затем подбирался такой тепловой поток на ту или иную поверхность модели, чтобы достигалась такая же температура соответствующей точки модели.

Для определения теплового потока, направленного на эмиттер использовался катод с прозрачным корпусом (рис. 4), состоящий из трубки, на которой закреплён эмиттер, диафрагмы и прозрачного корпуса. Вся конструкция закреплена снаружи вакуумной камеры и позволяет измерять температуру эмиттера.

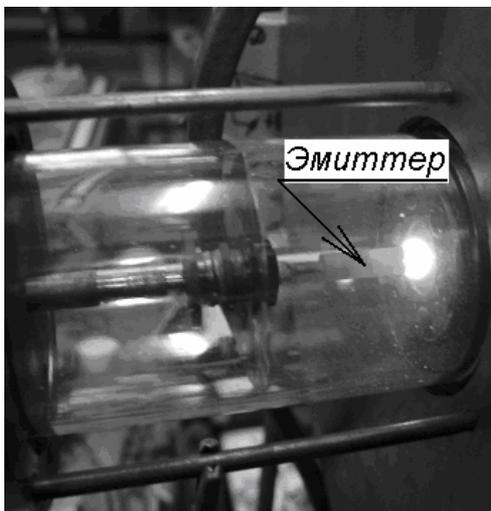


Рис. 4. Катод с прозрачным корпусом в работе

Температура была измерена при различных значениях тока через катод с помощью пирометра (табл. 2). Так как конструктивно данный катод отличается от реального, то была отдельно создана его модель в ANSYS (рис. 5). После этого подобранный таким образом тепловой поток прикладывался к поверхности основной конечноэлементной модели

катода и проводился расчёт. Схема установки и результаты измерений приведены ниже.

Таблица 2  
Температура эмиттера катода с прозрачным корпусом при некоторых значениях тока

$I_p, A$	$U_d, B$	$T_{эм}, K$
5,8	7,87	1179
10	5,6	1193
15	4,46	1195

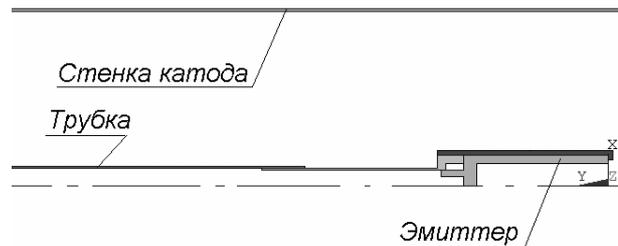


Рис. 5. Модель катода с прозрачным корпусом в ANSYS

Аналогичным образом был определён тепловой поток на диафрагму (табл. 3). В этом случае замеры температуры производились во время первых экспериментов с опытным образцом катода. Контрольная точка располагалась на срезе корпуса вблизи места крепления диафрагмы (контрольная точка 1 на рис. 3). Логика расчётно-экспериментального определения теплового потока схематически показана на рис. 6.



Рис. 6. Последовательность определения теплового потока с использованием конечноэлементной модели катода с прозрачным корпусом (вспомогательной модели)

Таблица 3  
Температура диафрагмы опытного образца при некоторых значениях тока

$I_p, A$	$U_p, B$	$T_{диафр}, K$
9,2	17	1040
12,7	16,2	1103
14,4	16,34	1145
16,9	16,37	1226
20	16,4	1290
22,1	18,44	1336

Такая методика определения нагрузок при численном моделировании, по мнению авторов, может также быть применена для решения других задач в тех случаях, когда не удаётся аналитически рассчитать требуемые величины с необходимой точностью. Однако она имеет и свои минусы, связанные в первую очередь с необходимостью проведения экспериментов на режимах близких к тем, на которые необходимо сделать прогноз.

### 3. Прогноз работоспособности катода БНК М50 для работы на токе 50 А

В дальнейшем конечноэлементная модель катода использовалась для прогноза распределения температур по деталям катода при его работе на токе 50 А. Для этого режима тепловой поток на эмиттер был выбран 100 Вт и такой же тепловой поток был задан на диафрагму (стоит отметить что эти потоки выбирались несколько большими чем полученные с использованием расчётно-экспериментального метода, чтобы исключить влияние неучтённых факторов). Было построено поле температур, и сделан вывод о том что данный опытный образец не может работать на токе 50А, т. к. температура в некоторых «критических» точках превысила предельно допустимые значения. Это же было доказано экспериментально (образец вышел из строя при токе 20 А).

Затем были рассмотрены различные способы оптимизации конструкции. Целью оптимизации являлось установление температур в «критических» точках на таком уровне, чтобы они не превышали предельно допустимого значения для каждой точки, но при этом были близкими к такому значению.

На рис. 7, 8, показаны результаты расчётов различных конфигураций геометрии катода. В некоторых точках указаны значения температуры в градусах Цельсия.

#### Выводы

1. Создана адекватная конечноэлементная модель безнакального полого катода с номинальным рабочим током до 50 А, позволяющая моделировать установившиеся тепловые состояния.
2. Описан алгоритм расчётно-экспериментального определения тепловых потоков, которые в дальнейшем использовались в качестве нагрузок для конечноэлементной модели. Описанный метод может быть применён при решении других задач, в тех случаях, когда все физические особенности того или иного процесса до конца неизвестны.
3. Приведен пример применения созданной модели для прогнозирования работоспособности опытной модели катода на токе 50 А.

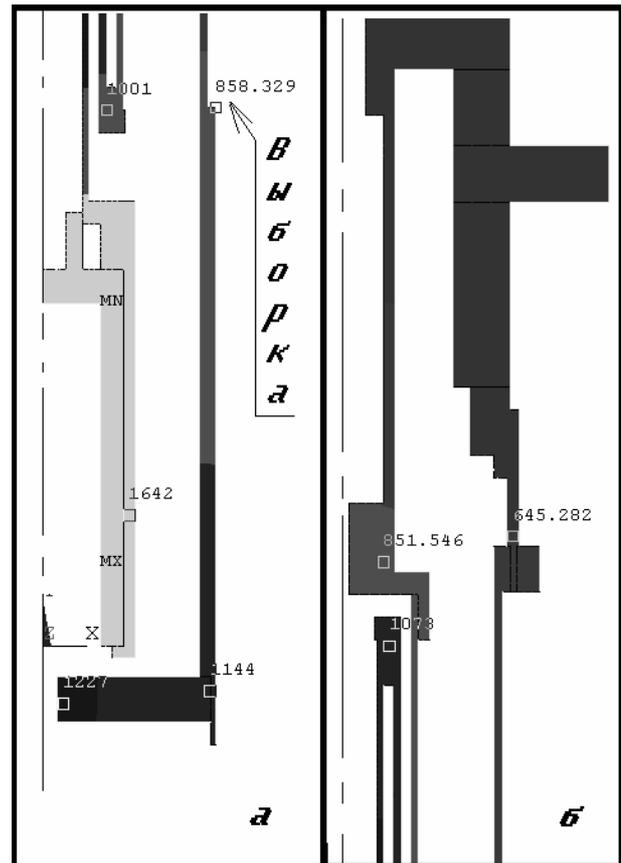


Рис. 7. Геометрия с выборкой на корпусе:  
а – область диафрагмы;  
б – область МКУ

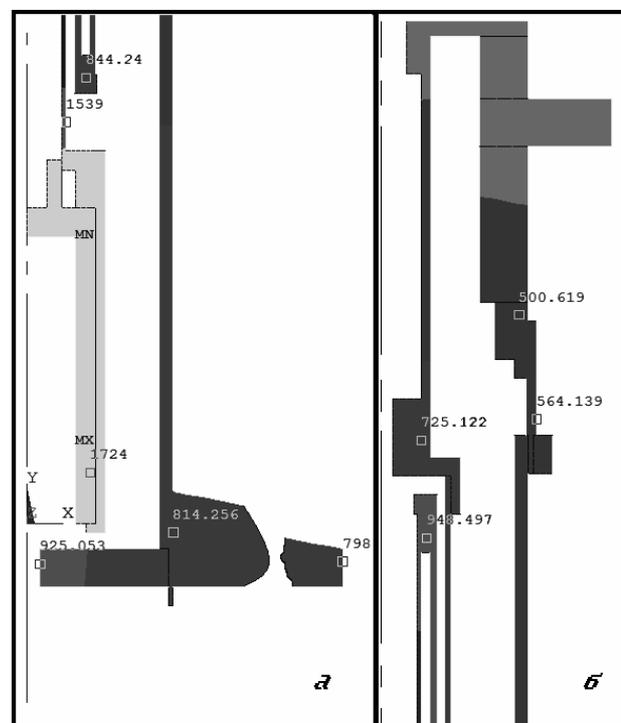


Рис. 8. Геометрия с молибденовым радиатором:  
а – область диафрагмы;  
б – область МКУ

4. Созданная модель может быть использована для моделирования динамических задач, если задать зависимостей свойств материалов от температуры таблично.

Авторы выражают благодарность Максименко Т. А. и Титову М.Ю. за ценные советы в ходе создания модели.

### Литература

1. *Электронная версия руководства к ANSYS – ANSYS – Core, 001252, Fifth Edition, ANSYS Release 5.6, Published November 1999, ANSYS, Inc., ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001: 1994 Company.*

2. *Конюхов А. В. Основы анализа конструкций в ANSYS : учебное пособие / А. В. Конюхов. – Казань: КГУ, 2001. – 202 с.*

3. *Белан Н. В. Катоды электрореактивных двигателей (Рабочие процессы, конструкции, расчёт) : учебное пособие / Н. В. Белан, А. И. Оранский, Г. К. Бахмет, С. Ю. Нестеренко. – Х.: Харьковский авиационный институт, 1984. – 105 с.*

4. *Мухачёв Г. А. Термодинамика и теплопередача: учебник для авиационных вузов / Г. А. Мухачёв, В. К. Щукин. – М.: Высш. шк., 1991. – 480 с.*

5. *Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов / П. Т. Андреева, С.И. Ипатова и др. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.*

Поступила в редакцию 31.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры № 402 А. И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского, «ХАИ», Харьков, Украина.

### РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ СИЛЬНОТОЧНИХ КАТОДІВ ПОТУЖНИХ ЕРД

*Г.О. Парахін, М.М. Кошелев, А.В. Лоян, О.П. Рыбалов*

Обґрунтована необхідність створення кінцевоелементної моделі для прогнозування розподілу температур по конструктивних елементах сильнострумових катодів. Розглянуті особливості моделювання радіаційного теплообміну між тонкостінними конструкціями за допомогою метода кінцевих елементів. Описана методика розрахунково-експериментального визначення теплового потоку, який використовується в моделі в якості навантаження. Наведено приклад застосування числової моделі для визначення працездатності експериментального екземпляру катода.

**Ключові слова:** чисельна модель, сильнострумовий порожнистий катод, теплообмін, розподіл температур.

### THE RESULTS OF THERMAL PROCESSES ANALYSIS OF HIGH CURRENT CATHODES FOR POWERFUL ELECTRIC PROULSION THRUSTERS

*G.A. Parahin, N.N. Koshelev, A.V. Loyan, O.P. Ribalov*

The necessity of finite element thermal model for high current hollow cathode was validated. The features of finite element models with radiative heat exchange and thin-walled elements are reviewed. The procedure of numerically-experimental fitting of heat flow, used as loading for model, is shown. The case of numerical model using for determination of first cathode's model operability is displayed.

**Key words:** finite element model, high current hollow cathode, heat exchange, temperatures distribution.

**Парахін Григорій Александрович** – студент факультета ракетно-космічної техніки Національного аэрокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна. e-mail: grif1988@mail.ru.

**Кошелев Николай Николаевич** – ст. научний співробітник каф. 402 Національного аэрокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна.

**Лоян Андрей Витальевич** – канд. техн. наук, ст. научний співробітник каф. 402, начальник відділу ЕРДУ Національного аэрокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна.

**Рыбалов Олег Петрович** – мл. научний співробітник каф. 402 Національного аэрокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна.