

УДК 621.793.7

С.В. СЕРГЕЕВ, К.А. ДАНЬКО

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ПРИ НАНЕСЕНИИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

*Рассматривается процесс ускорения порошкового материала в сверхзвуковом сопле газопламенной горелки для нанесения газотермических покрытий и в пространстве между срезом сопла и обрабатываемой деталью. Целью анализа является установление зависимости между размером твердой фазы двухфазного потока и распределением толщины наносимого покрытия в поперечном сечении. Основное внимание уделено вопросу определения минимального размера частиц твердой фазы, которые способны сформировать покрытие на обрабатываемой поверхности. Определены необходимые условия образования соединения между частицей и подложкой. В работе применен метод конечноэлементного анализа газодинамики двухфазных сред и вероятностно-статистические методы анализа данных. Установлен минимальный размер частиц, при котором происходит формирование покрытия.*

**Ключевые слова:** газотермическое покрытие, двухфазный поток, сверхзвуковое сопло, кинетическая энергия, метод конечных элементов, авиационный газотурбинный двигатель.

### Введение

Проблема повышения ресурса авиационных газотурбинных двигателей продолжает оставаться актуальной проблемой на протяжении многих лет. Это вызвано необходимостью поиска способа эффективной защиты деталей авиационного ГТД в условиях непрерывного повышения технических характеристик двигателя. При этом существующие технологии защиты и упрочнения перестают быть эффективными. Одним из путей повышения ресурса деталей проточной части ГТД, в первую очередь лопаток компрессора и турбины, является нанесение защитных покрытий, предотвращающее эрозионный и коррозионный износ лопаток компрессора, а также обеспечивающее тепловую и коррозионную защиту лопаток турбины. Среди известных методов нанесения защитных покрытий одним из перспективных является метод сверхзвукового газопламенного нанесения покрытий из порошковых материалов.

Однако для получения покрытий с высокой адгезией и усталостной прочностью необходимо обеспечить максимально возможные энергетические параметры потока частиц порошкового материала в момент формирования покрытия, тем более что энергетические возможности химических источников энергии, в данном случае углеводородных топлив, ограничены. Известным фактом является то, что кинетическая энергия частиц имеет преобладающее значение при формировании газотермического покрытия. Скорость и температура частиц существенно зависят от их размера, поэтому для

получения оптимальных по свойствам покрытий необходимо не только обеспечить ряд технологических параметров, но и подобрать оптимальный размер фракции порошкового материала.

Поскольку частица малого размера разгоняется и прогревается в потоке значительно быстрее крупной частицы, уместно предположить, что частицы малого размера предпочтительнее для нанесения покрытий. Однако при взаимодействии двухфазного потока с поверхностью детали поток тормозится. Если частица имеет малый размер, она также теряет скорость и изменяет направление движения. При этом возможна ситуация, когда при малом размере частиц порошка формирование покрытия становится невозможным.

Вопрос поиска оптимального размера частиц порошкового материала при нанесении защитных покрытий является сложной многофакторной задачей и до конца не изучен. В то же время для успешного применения технологии упрочнения лопаток авиационного ГТД методом сверхзвукового газопламенного нанесения покрытий изучение этого вопроса является актуальной задачей.

### Постановка задачи исследования

В решаемой задаче рассматривается процесс нагрева и ускорения частиц наносимого материала в двухфазном потоке, истекающем из сопла сверхзвуковой газопламенной горелки.

Систему уравнений, описывающую газодинамику стационарного двухфазного потока в проекции

ях на оси  $x$  и  $y$  декартовой системы координат с осевой симметрией вдоль оси  $x$  можно записать в виде:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\rho v}{y} = 0; \quad (1)$$

$$\rho_s \frac{\partial u_s}{\partial x} + \rho_s \frac{\partial v_s}{\partial y} + u_s \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial \rho_s}{\partial y} + \frac{\rho_s v_s}{y} = 0; \quad (2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial p}{\partial x} - P_x + \frac{\rho_s}{\rho} f_x = 0; \quad (3)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial p}{\partial y} - P_y + \frac{\rho_s}{\rho} f_y = 0; \quad (4)$$

$$u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial u_s}{\partial y} + \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial x} - P_{sx} - f_x = 0; \quad (5)$$

$$u_s \frac{\partial v_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial y} + \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial y} - P_{sy} - f_y = 0; \quad (6)$$

$$u \frac{\partial i}{\partial x} + v \frac{\partial i}{\partial y} - \frac{u}{\rho_g} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{v}{\rho_g} \frac{\partial p}{\partial y} - Q +$$

$$+ \frac{\rho_s}{\rho} \left[ (\bar{V}_s - \bar{V}_g) \bar{f} + q \right] = 0 \quad (7)$$

$$u_s \frac{\partial e_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial e_s}{\partial y} - q - Q_s = 0, \quad (8)$$

где  $u, v$  – проекции скорости на оси  $x$  и  $y$ ;  
индексы  $s$  и  $g$  относятся к частицам и к газу соответственно;

$e_s$  – внутренняя энергия частиц;

$i$  – энтальпия;  $Q$  – внешнее тепло, подводимое к твердой или газовой фазе;

$f$  и  $q$  – соответственно сила, обусловленная вязкостью и тепловой поток, отнесенные к единице массы частиц и вызванные взаимодействием частиц с газом;

$\bar{V}_g, \bar{V}_s$  – векторы скоростей газовой и твердой фазы.

В задаче приняты следующие допущения:

– среда является двухскоростной и двухтемпературной. Совокупность частиц считается непрерывно распределенной по всему объему с условной плотностью  $\rho_s$ ;

– давление создается только газом;

– массовые расходы газа и частиц вдоль по течению постоянны;

– частицы являются сферами равного диаметра;

– система теплоизолирована, отвод тепла в стенки сопла отсутствует, теплообмен между частицами и газом происходит за счет конвекции;

– объемом, занимаемым частицами, можно пренебречь;

– температура частиц по всему объему постоянна.

Целью расчетов является моделирование тече-

ния газовой фазы в сопле, пространстве за соплом и в области, граничащей с подложкой. Необходимо установить влияние стоячей ударной волны на течение твердой фазы в потоке, ее торможение и рассеивание, угол падения частицы на подложку, определяющие в конечном итоге форму пятна покрытия, коэффициент использования материала, а также критически важные для формирования покрытия параметры: величины тепловой и кинетической энергий частицы в момент контакта с подложкой.

Для моделирования двухфазного потока применено программное обеспечение COMSOL Multiphysics V4.1.0.185, интерактивная среда для моделирования и расчетов научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE) методом конечных элементов. Базовый модуль системы Fluid Dynamics был расширен приведенными выше уравнениями (1) – (8).

В качестве горючей смеси в горелке используется стехиометрическая смесь МАФ (метилацетилен-алленовая фракция) и кислорода. Для исследования принимался режим течения, при котором давление за камерой сгорания составляло 16 бар, температура продуктов сгорания составляла 2468 К, а массовый расход газа равнялся 0,245 кг/сек. Параметры сопла определялись предварительно при помощи газодинамических функций и принимались равными: диаметр на входе в сопло – 0,022 м; диаметр критического сечения – 0,0149 м; диаметр среза сопла – 0,04 м.

Расчетная область представлена на рис. 1. Здесь принято, что для газового потока стенки сопла, внешняя поверхность горелки и подложка являются газонепроницаемыми теплоизолированными стенками с идеальной поверхностью.

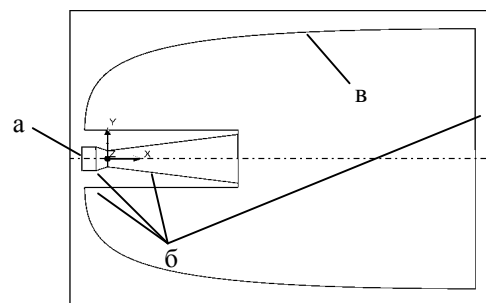


Рис. 1. Расчетная область модели:

а – входной массовый расход газа и частиц;

б – теплоизолированная идеальная стенка;

в – параметры окружающей среды  
( $P = 101325$  Па,  $T = 293$  К)

На рис. 2 изображена сетка конечных элементов, которая использовалась для моделирования.

Расчеты проводились для частиц размером  $10^{-4}$ ,

$10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  и  $10^{-7}$  м. В расчете принимался материал частиц 12X18H10T с плотностью  $8100 \text{ кг/м}^3$ . Теплофизические характеристики материала представлены на рис. 3.

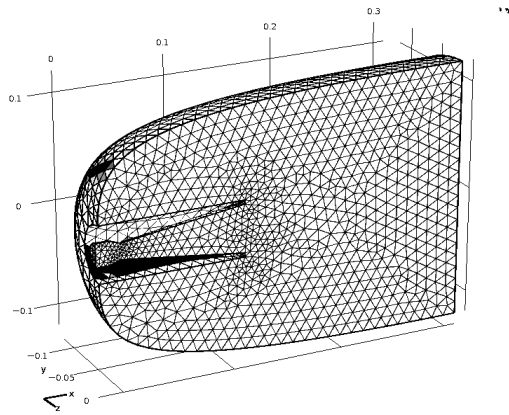
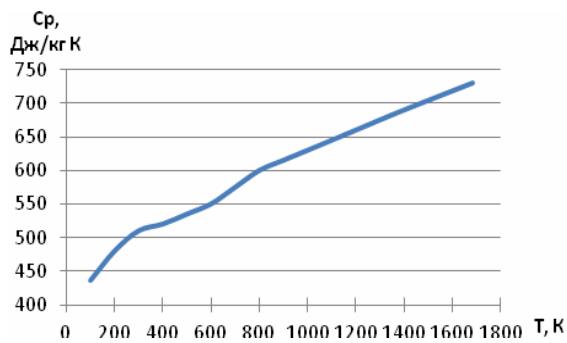
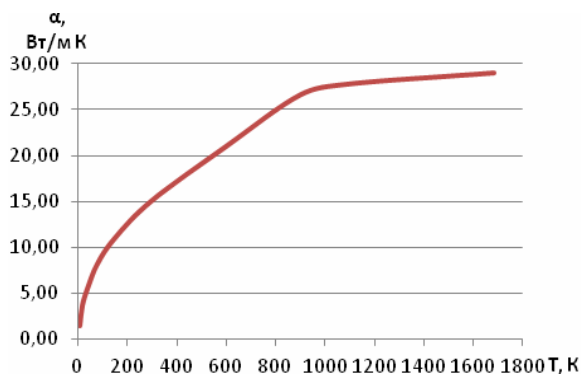


Рис. 2. Расчетная сетка конечных элементов для моделирования течения



а



б

Рис. 3. Теплофизические свойства материала: а – теплоемкость; б – теплопроводность

### Анализ результатов моделирования

В результате проведенных расчетов получены распределения скоростей, давлений и температур газа по всей расчетной области (рис. 4).

Для частиц размером  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  и  $10^{-7}$  м

рассчитаны траектории движения с шагом 1 мм по сечению потока, что позволило изучить картину течения в зоне контакта частиц с подложкой. Результаты представлены на рис. 5, где стрелками показаны векторы скорости газового потока, цветом – изменение давления в ударной волне, а линиями – траектории частиц.

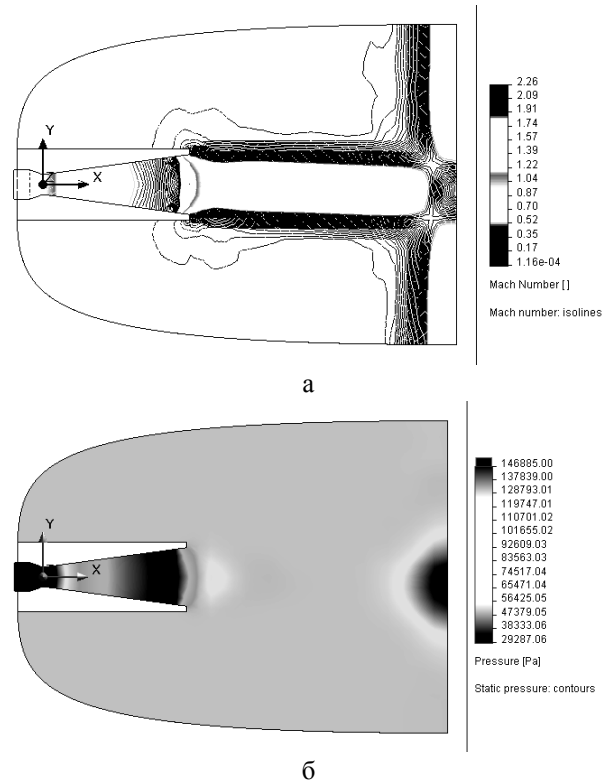
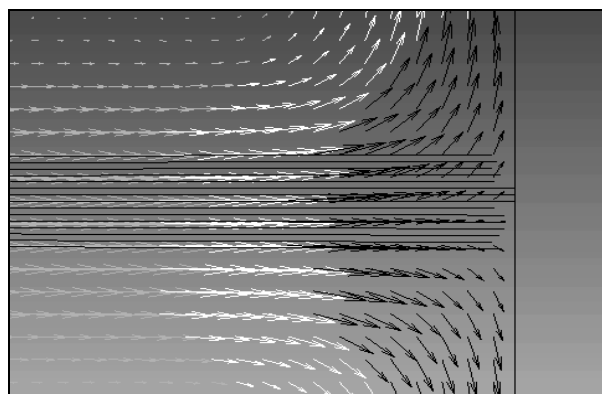


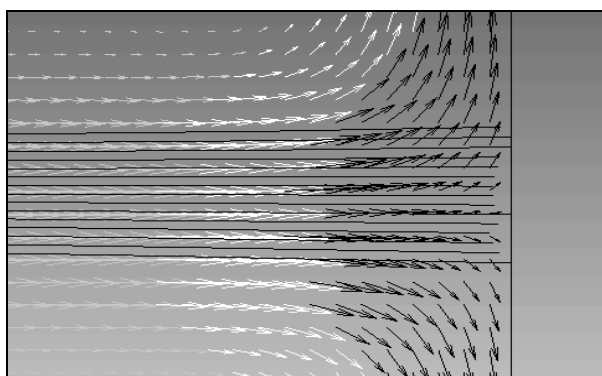
Рис. 4. Распределение числа Маха (а) и статического давления (б) в расчетной области.

На рис. 5, а видно, что частицы диаметром  $10^{-4}$  м практически не отклоняются от оси сопла. Частицы диаметром  $10^{-5}$  м имеют пятно контакта диаметром 1,5 диаметра критического сечения сопла вследствие незначительного разлета (рис. 5, б). Для частиц диаметром  $10^{-6}$  м разлет составляет более 3 критических диаметров сопла, причем угол падения частиц на периферии потока превышает  $25^\circ$  от нормали к поверхности (рис. 5, в). По этой причине частицы, имеющие угол падения менее  $45^\circ$  к нормали, не будут сцепляться с подложкой, и будут унесены потоком газа.

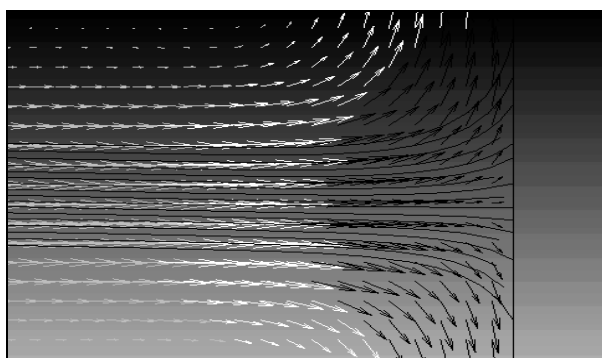
При размере частиц  $10^{-7}$  м картина движения частиц качественно меняется (рис. 5, г). Наблюдается глобальное воздействие газового потока на траектории движения частиц. Частицы твердой фазы изменяют свою траекторию, следуя линиям тока газа. Только сердцевина потока, составляющая около 15% от общего потока частиц, имеет потенциальную возможность для сцепления с подложкой.



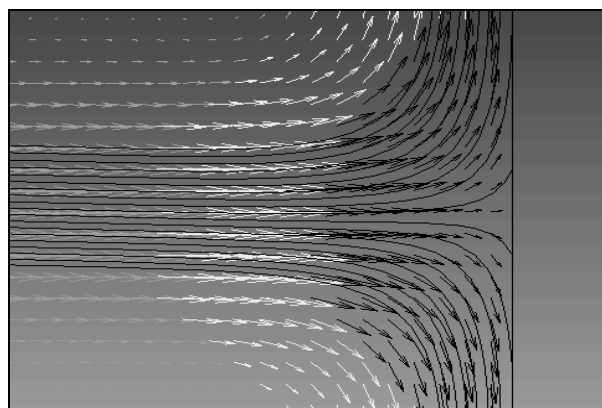
а



б



в

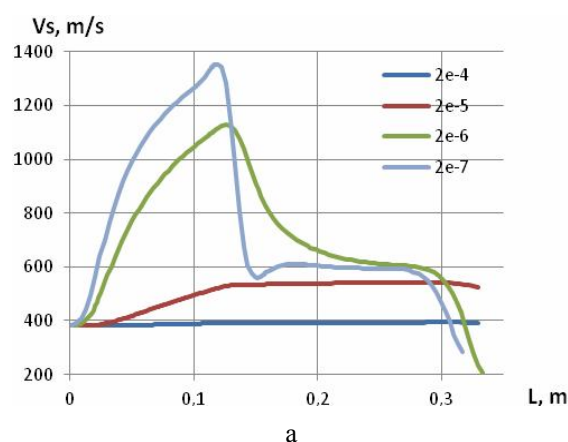


г

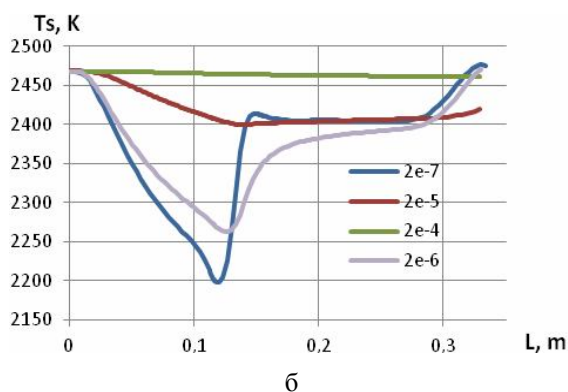
Рис. 5. Траектории движения частиц твердой фазы в потоке:  
а – частицы размером  $10^{-4}$  м; б – частицы размером  $10^{-5}$  м; в – частицы размером  $10^{-6}$  м; г – частицы размером  $10^{-7}$  м

Помимо траекторий частиц рассчитаны их скорости и температуры. Результаты представлены на рис. 6. Из рис. 6, а следует, что частицы малого размера интенсивно разгоняются, но так же интенсивно теряют скорость в ударной волне. Частицы большого размера разгоняются до значительно меньших скоростей, хотя и сохраняют инерцию вдоль всей траектории движения.

Профили температур частиц, представленные на рис. 6, б, позволяют сделать вывод, что с уменьшением размера частиц их температура вдоль траектории изменяется подобно температуре газа. Также наблюдается вторичный нагрев частиц в ударной волне. Падение температуры частиц большого размера незначительно в силу большого количества запасенной тепловой энергии.



а



б

Рис. 6. Профили скоростей (а) и температур (б) частиц вдоль траектории

## Заключение

Основываясь на результатах проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Основным фактором, снижающим кинетическую энергию частиц порошка при сверхзвуковом газопламенном нанесении покрытий, является ударная волна, образующаяся перед подложкой.

2. Уменьшение размера частиц порошка приводит к размытию пятна покрытия. При этом коэффициент использования материала и прочность по-

крытия снижаются по той причине, что частицы падают на подложку под острым углом, превышение критического значения которого приводит к невозможности образования покрытия.

3. Нанесение покрытий частицами с размером менее  $10^{-7}$  м невозможно, поскольку частицы вблизи подложки меняют свою траекторию, двигаясь вдоль поверхности подложки. Центральная часть потока частиц может закрепиться на подложке, но ее доля составляет не более 10 – 15% от всего потока.

4. С энергетической точки зрения, учитывая преобладающее значение кинетической энергии, наиболее эффективными для нанесения покрытий с высокой прочностью и минимальной пористостью являются частицы размером  $10^{-5}$  –  $10^{-6}$  м.

## Литература

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
2. Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров: пер. с англ. / З. Брандт. – М.: Мир, 1998. – 686 с.
3. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах / Л.Е. Стернин. – М.: Машиностроение, 1974. – 212 с.
4. Расчет процесса формирования детонационных покрытий по толщине/ А.И. Долматов, С.В. Сергеев, А.Ф. Горбачев, П.Д. Жеманюк, В.М. Добышев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 1996. – № 1 (27). – С. 121-126.

Поступила в редакцию 18.05.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, зам. директора по научной работе НПП «Оснастка», Харьков, Украина.

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ ДВОФАЗНОГО СТРУМУ ПРИ НАНЕСЕННІ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

*С.В. Сергеев, К.А. Данько*

Розглядається процес прискорення порошкового матеріалу в надзвуковому соплі газополум'яного пальника для нанесення газотермічних покриттів і в просторі між зрізом сопла і деталлю, що обробляється. Метою аналізу є встановлення залежності між розміром твердої фази двофазного струму і розподілом товщини покриття, що наноситься, в поперечному перерізі. Основна увага приділена питанню визначення мінімального розміру часток твердої фази, які здатні сформувати покриття на оброблюваній поверхні. Визначені необхідні умови утворення з'єднання між часткою і підкладкою. У роботі застосований метод кінцево-елементного аналізу газодинаміки двофазних середовищ і ймовірно-статистичні методи аналізу даних. Встановлений мінімальний розмір часток, при якому відбувається формування покриття.

**Ключові слова:** газотермічне покриття, двофазний потік, надзвукове сопло, кінетична енергія, метод кінцевих елементів, авіаційний газотурбінний двигун.

## MODELLING OF TWO-PHASE STREAM FLUXION AT THERMAL SPRAY COATING

*S.V. Sergeyev, K.A. Danko*

Process of acceleration of a powdered material in the supersonic nozzle of a gas-flame gun for thermal spray coating and in space between a shearing of a nozzle and the workpiece is observed. The analysis purpose is dependence determination between a size of a particles phase of a two-phase stream and distribution of a thickness of a put coating in a cross-section. The basic attention is given a question of definition of the minimum size of particles which are capable to generate a coating on a processed surface. Necessary conditions of formation of the joint between a particle and substrate been defined. The FEM analysis of gas kinetics of two-phase stream and is probability-statistical methods of the analysis of the data is in-process applied. The minimum size of particles at which there is a coating formation is observed.

**Key words:** thermal spray coating, a two-phase stream, the supersonic nozzle, a kinetic energy, finite elements method, the aviation gas-turbine engine.

**Сергеев Сергей Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры 204, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Данько Константин Анатольевич** – младший научный сотрудник каф. 204, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.