

УДК 629.735.33

А.В. АМБРОЖЕВИЧ<sup>1</sup>, И.П. БОЙЧУК<sup>1</sup>, К.В. МИГАЛИН<sup>2</sup>, В.А. СЕРЕДА<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*<sup>2</sup> *ООО НПФ «РОТОР», Россия*

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОЦЕССОВ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ОБТЕКАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ЭЖЕКТОРНЫМ ПВРД

*Представлено решение задачи обтекания планера вместе с двигателем с учетом обтекания внешних поверхностей, течения в воздухозаборнике, процессов в камере сгорания, истечения, интерференции реактивной струи с элементами планера, процессов в системе тепловой защиты с учетом условий динамики полета. Приведен пример использования визуализации в аэродинамическом проектировании. Показана достаточность информативного обеспечения, предоставляемого численным экспериментом, для проведения начальных стадий проектных работ по системе «планер–двигательная установка с эжекторным прямоточным воздушно реактивным двигателем».*

**Ключевые слова:** комплексная аэрогазодинамическая модель, внешние и внутренние течения, эжекторный прямоточный воздушно реактивный двигатель

### Введение

Традиционный инструментарий ранних стадий аэродинамического и газодинамического проектирования летательных аппаратов (ЛА) ориентирован на освоенный типаж объектов со стационарным режимом внешнего и внутреннего обтекания на основе факторной декомпозиции. Такого рода модели и методы не адекватны задачам проектирования ЛА с двигательными установками на основе ВРД новых схем с пульсационным рабочим процессом, как не отображают факторы струйного взаимодействия и крупномасштабные вихревые явления в трактах и внешнем пространстве.

Решение задачи обтекания планера вместе с двигателем в общем виде влечет за собой необходимость создания комплексных методов с расширенной факторной матрицей, отображающей обтекание внешних поверхностей, течения в воздухозаборнике, процессы в камере сгорания, истечение, интерференция реактивной струи с элементами планера, процессы в системе тепловой защиты и др. с учетом условий динамики полета.

Комбинация прямоточного воздушно реактивного двигателя (ПВРД) с эжекторным компрессором (ЭПВРД) [1], позволяющая получать тягу в стартовых условиях, может служить основой для создания многорежимного двигателя без подвижных частей, т.е. способного составить конкуренцию пульсирующему ВРД по линии достижения высокого массового совершенства двигательных установок (ДУ) специфических классов беспилотных ЛА (БЛА).

Наиболее привлекательны многорежимные ЭПВРД для высоких крейсерских скоростей (более  $M = 0,5$ ), при которых пульсирующие воздушно реактивные двигатели (ПуВРД) вырождаются.

### 1. Постановка задачи

В корректной постановке предполагается сопряженное решение задач о нестационарном течении газа и тепловом взаимодействии элементов конструкции ЛА со струей [2], а также поведения аппарата на траектории [3]. В данной статье представлены результаты исследований траекторных фаз БЛА с ЭПВРД (рис. 1) – запуска (рис. 2 – 4) и свободного полета (рис. 5 – 11).

Численное моделирование нестационарного внешнего и внутреннего течения вязкой сжимаемой среды проводилось согласно [3,4]. Горение в ДУ моделировалось на основании [5].

### 2. Результаты расчетов

Частичная замена натурального эксперимента численным неизбежно сопряжена со значительным усложнением задач внешнего и внутреннего обтекания за счет внедрения нестационарных пространственных моделей, заданных в контрольных объемах со сложной геометрией. Феноменологический анализ результатов решения подобных задач невозможен без проведения визуализации параллельно с численным расчетом. Визуализация вычислений проводилась согласно [6, 7].



Рис. 1. Объект исследования

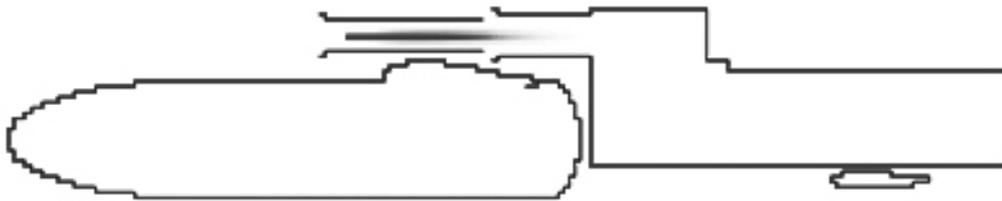


Рис. 2. Импульсная синхронная подача воздуха и пропана (в струе пропана налету активируется реакция окисления в самом начале внешнебаллистического участка)



Рис. 3. Поступление ТВС на вход в теплообменник и синхронное ее воспламенение



Рис. 4. Мерцающие очаги горения в падающей струе пропана и струе пропана в сопле

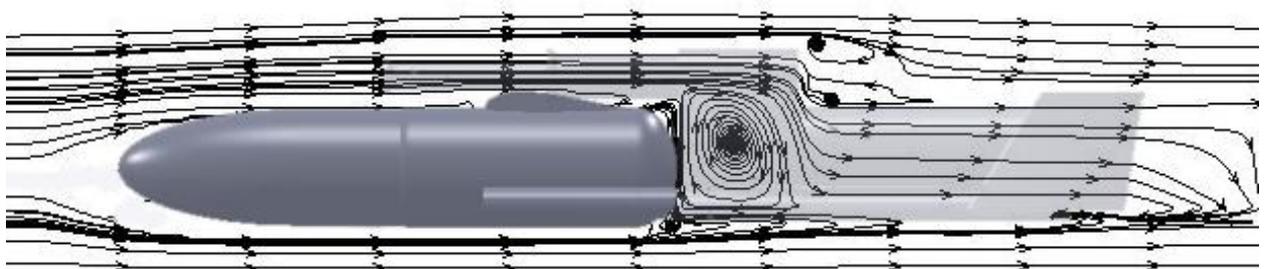


Рис. 5. Вихревые структуры в плоскости симметрии

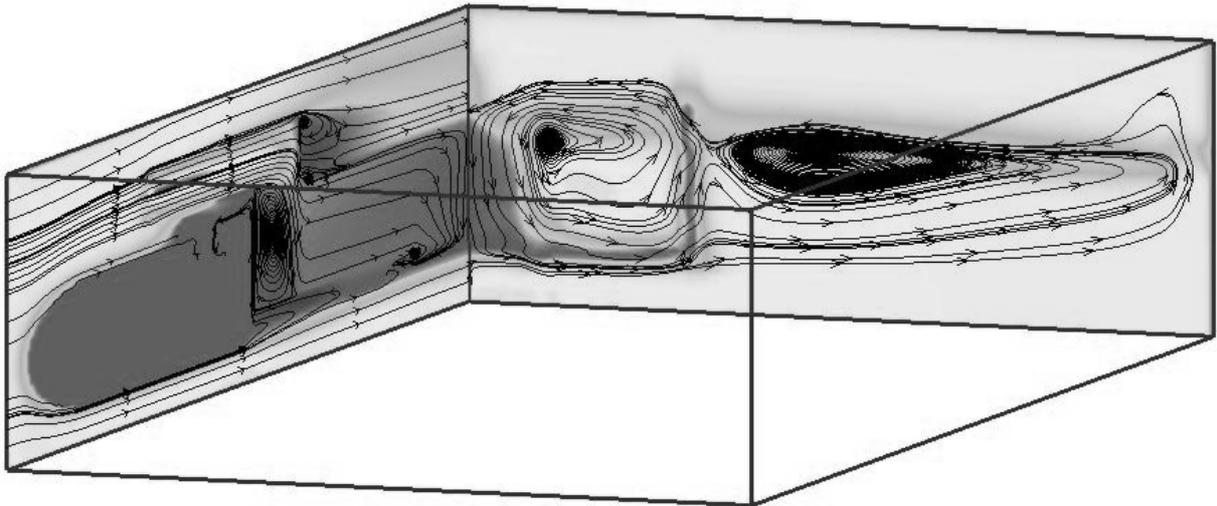


Рис. 6. Линии тока в плоскости симметрии БЛА с ЭПВРД и одним из поперечных сечений

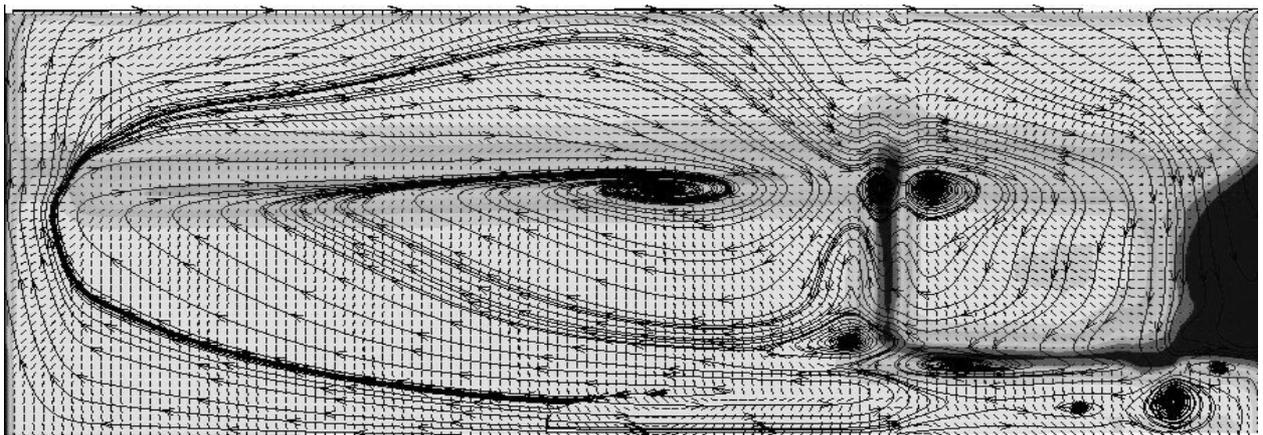


Рис. 7. Поле скоростей и линий тока в плоскости, расположенной позади аппарата

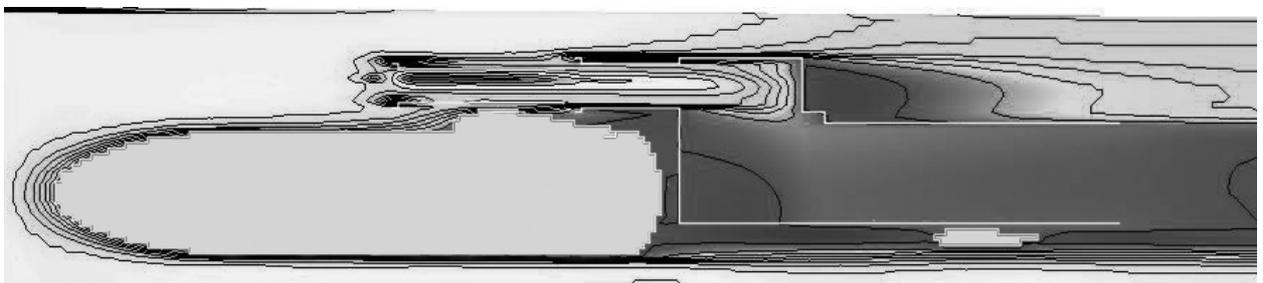


Рис. 8. Изолинии скорости внешнего и внутреннего течений

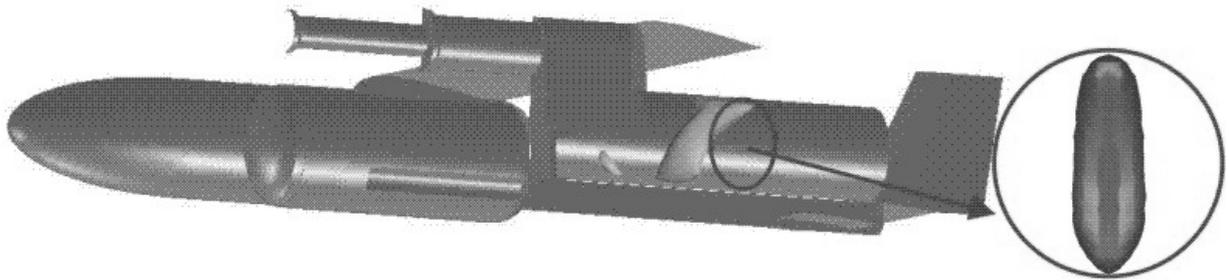


Рис. 9. Изоповерхность горения

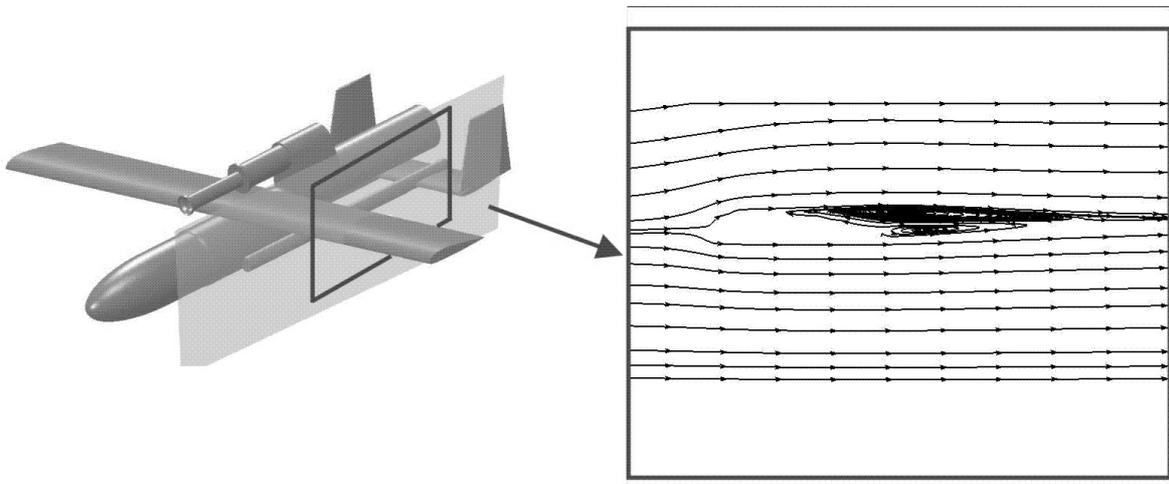


Рис. 10. Сходящие с крыла вихри

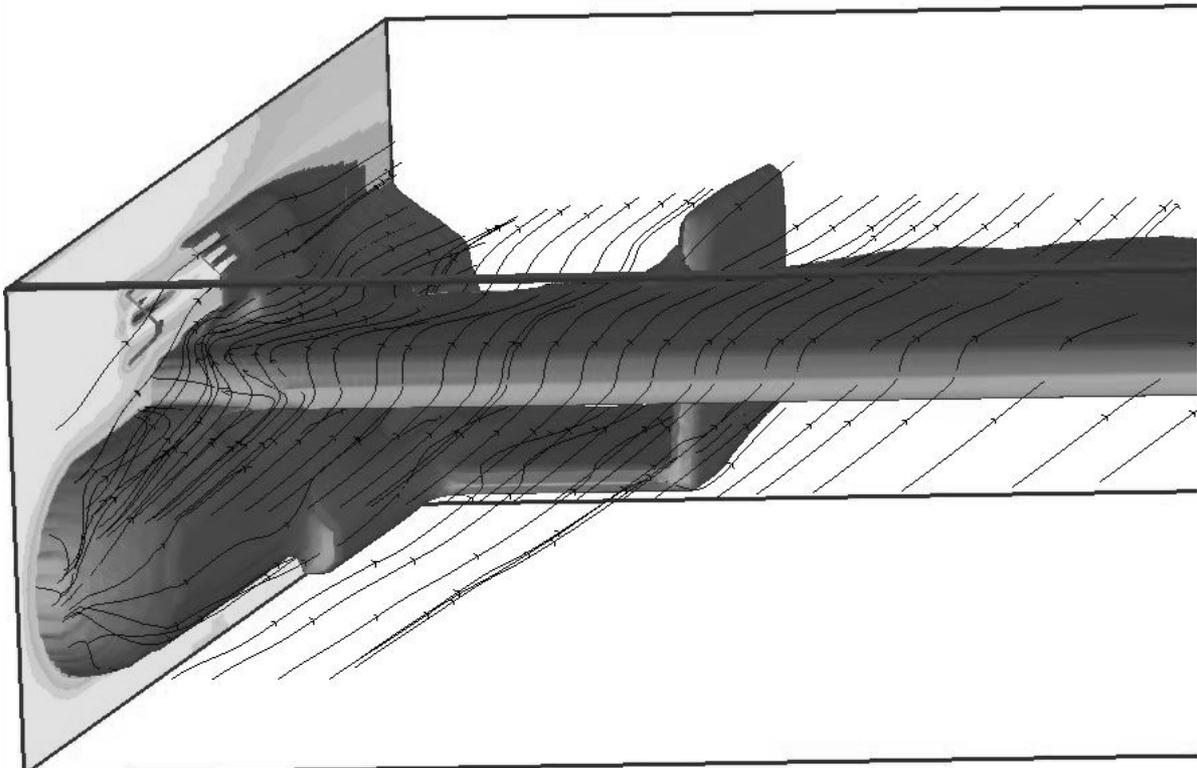


Рис. 11. Изоповерхности скорости с линиями тока

Условиями запуска являются импульсная синхронная подача воздуха наддува и активной струи предварительно нагретого и газифицированного пропана (рис. 2). Далее поток топливовоздушной смеси (ТВС) поступает на вход в теплообменник с синхронным воспламенением (рис. 3). Продолжение развитого горения по мере заполнения рабочим телом проточной части осуществляется в виде мерцающих очагов горения в падающей струе пропана и в зоне теплообменника (рис. 4).

Основной режим работы ЭПВРД сопровождается вспышками в струе пропана с центром инициализации, локализованным в зоне падения на вертикальную стенку (рис. 3). В торце камеры образуется застойная зона (рис. 5).

Средства визуализации позволяют обнаружить интенсивные вихревые структуры на выходе из сопла в плоскости симметрии аппарата и в поперечной плоскости (рис. 5 – 7). Такого рода вихревые структуры обуславливают интенсивное тепловое воздействие горячей струи на хвостовую часть БЛА. Застойные зоны за третьей ступенью эжектора и возвратные течения, возникающие в нижней части аппарата, а также между фюзеляжем и двигателем, приводят к увеличению силы сопротивления.

Задачи вычислительной аэрогазодинамики предъявляют принципиально новые требования к роли визуализации. Визуализация становится не только иллюстративным средством, но и полноценным инструментом проектирования.

На рис. 8 представлено поле скоростей внешнего и внутреннего течений с изолиниями скорости. На рис. 9 показана изоповерхность зоны горения. Поле горения отображено на рис. 4.

Анализ приведенных результатов и вихревых структур (застойных зон) внутри двигателя (рис. 5) позволяет провести коррекцию геометрии камеры двигателя.

Анализ картины линий тока (рис. 5) на выходе из сопла позволяет оценить возможность реализации заданных скоростных характеристик БЛА.

Построение линий тока и векторов скорости, как в плоскости симметрии аппарата, так и в поперечных сечениях (см. рис. 5 – 7, 10 – 11) служит основанием для выработки мероприятий по улучшению условий внешнего и внутреннего обтекания и тепловой защите элементов конструкции.

## Заключение

Проведенная выше демонстрация некоторых возможностей технологии численных исследований не является исчерпывающей. Тем не менее, приведенный материал позволяет сделать вывод о достаточности информативного обеспечения, предоставляемого численным экспериментом, для проведения начальных стадий проектных работ по системе «планер–ДУ с ЭПВРД».

## Литература

1. № 2010117779, рег. вх. № 025323. РОСПАТЕНТ. Мигалин К.В. Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель / К.В. Мигалин, А.И. Сиденко // Заявка на изобр.: уведомл. о поступлении и рег. заявки от 04.05.2010 г.
2. Амброжевич, А.В. *Опережающие исследования процесса внешнего и внутреннего обтекания беспилотного летательного аппарата с пульсирующим воздушно-реактивным двигателем на основе комплексной газотермодинамической модели* [Текст] / А.В. Амброжевич, И.П. Бойчук, А.С. Карташев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 1 (48). – С. 11 – 16.
3. Амброжевич, А.В. *Обобщенные аэрогазодинамические траекторные модели беспилотных летательных аппаратов* [Текст] / А.В. Амброжевич, И.П. Бойчук // *Аэрогидродинамика и аэроакустика: проблемы и перспективы*. – 2009. – С. 11 – 18.
4. Амброжевич, А.В. *Малоресурсный метод численного моделирования течений в геометрических областях сложной формы* / А.В. Амброжевич, И.П. Бойчук, С.Н. Ларьков, В.А. Серета [Текст] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 6 (53). – С. 5 – 10.
5. Амброжевич, А.В. *Модель многорежимного горения в тепловых машинах* [Текст] / А.В. Амброжевич, С.Н. Ларьков, К.Н. Мигалин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 1 (58). – С. 76 – 79.
6. Бондарев, А.Е. *Функции визуализации в вычислительной аэрогазодинамике* [Текст] / А.Е. Бондарев, Е.Н. Бондарев // *Полет*. – 2000. – № 10. – С. 53 – 60.
7. Бойчук, И.П. *Визуализация численного решения задач аэрогазодинамики* [Текст] / И.П. Бойчук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 1 (78). – С. 59 – 62.

Поступила в редакцию 1.12.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСА ПРОЦЕСІВ  
ВНУТРІШНЬОГО ТА ЗОВНІШНЬОГО ОБТІКАННЯ  
БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ  
З ЕЖЕКТОРНИМ ППРД**

*О.В. Амброжевич, І.П. Бойчук, К.В. Мігалин, В.О. Серєда*

Подано вирішення задачі обтікання планера спільно з двигуном з урахуванням обтікання зовнішніх поверхонь, течій у повітрязбірнику, процесів у камері згоряння, витікання, інтерференції реактивного струменя з елементами планера, процесів у системі теплового захисту з урахуванням умов динаміки польоту. Наведено приклад використання візуалізації у аеродинамічному проектуванні. Показана достатність інформативного забезпечення, що надається чисельним експериментом, для проведення початкових стадій проектних робіт з системи «планер – рушійна установка з ЕППРД».

**Ключові слова:** комплексна аерогазодинамічна модель, зовнішні та внутрішні течії, ежекторний ППРД.

**NUMERAL RESEARCHES OF THE COMPLEX PROCESSES OF EXTERNAL  
AND INTERNAL FLOWING AROUND OF UNMANNED AERIAL VEHICLE  
WITH EJECTOR AIR JET ENGINE**

*O.V. Ambrozhevich, I.P. Boychuk, K.V. Migalin, V.O. Sereda*

The decision of task of flowing around of glider is presented together with an engine taking into account flowing around of external surfaces, flow in an air scoop, processes in a combustion chamber, expiration, interference of reactive stream with the elements of glider, processes in the system of thermal defence taking into account the terms of dynamics of flight. The example of the use of visualization is resulted in the aerodynamic planning. Is sufficientness of the informing providing, given a numeral experiment, for the leadthrough of the initial stages of project works on the system «glider – motive setting with ejector AJE».

**Key words:** complex aerogas dynamics model, external and internal flows, ejector AJE.

**Амброжевич Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры ракетных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов факультета ракетно-космической техники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Бойчук Игорь Петрович** – ассистент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем факультета авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: igor\_boichuk@mail.ru.

**Мигалин Константин Валентинович** – канд. техн. наук, директор ООО НПФ «РОТОР», Россия, Тольятти, e-mail: MigalinK@mail.ru.

**Серєда Владислав Александрович** – канд. техн. наук, ассистент кафедры ракетных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов факультета ракетно-космической техники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sereda\_vlad@ukr.net.