

Использование визуализации в аэродинамическом проектировании

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,
ГНПП «Объединение Коммунар», Украина, ООО НПФ «РОТОР», Россия*

Рассмотрены аспекты визуализации физических полей в целях исследования режимов свободного полета системы «планер–двигатель» численным экспериментом. На примере беспилотного летательного аппарата с бесклапанным пульсирующим воздушно-реактивным двигателем продемонстрированы возможности технологий визуализации применительно к задачам установления характера взаимодействия нестационарных реактивных струй с элементами планера, вихревых структур и других факторов процесса внешнего и внутреннего обтеканий в интересах последующей выработки адекватных технических решений на этапе аэродинамического проектирования.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, внешние и внутренние обтекания, численный эксперимент, визуализация физических полей.

Введение

Процесс внешнего и внутреннего обтекания аэродинамических летательных аппаратов (ЛА) неизбежным образом включает в себя сложные вихревые структуры, наличие которых необходимо учитывать при проектировании. Выявление и исследование подобного рода факторов в натурном эксперименте – вещь малодоступная. В связи с этим не вызывает сомнения резонность широкого внедрения вычислительного эксперимента в качестве необходимой компоненты цикла аэрогазодинамического проектирования ЛА в современных условиях. Тем самым на качественно новом уровне решаются задачи информатизации НИОКР и снижаются затраты на опытную доводку за счет частичного вытеснения дорогостоящих натурных испытаний опережающими численными исследованиями. При этом нестационарные модели третьего ранга не оставляют альтернатив применению специальных средств визуализации физических полей, отображенных на пространственно-временные сетки с общим числом узлов порядка $10^{10} \dots 10^{12}$ и более.

Визуализация, таким образом, становится не только иллюстративным средством, но и полноправным инструментом проектирования. В настоящей статье в качестве примера использования визуализации в составе вычислительного эксперимента представлены результаты исследований процесса внутреннего и внешнего обтеканий беспилотного летательного аппарата (БЛА) с бесклапанным ПуВРД «Эникс» Е-95М (рис.1, а) в процессе запуска и свободного полета, проведенных с целью оценки совершенства серийного образца с позиций аэродинамики.

Модель и метод исследования

Математическая модель свободнолетающего БЛА основывается на консервативной форме записи системы уравнений пространственного течения среды в декартовых координатах, состоящей из уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии, замкнутой системой уравнений динамики полета [1], с исполь-

зованием подмодели горения на базе эйлерово-лагранжевого отображения химической кинетики [2].

Для отображения условий газодинамического взаимодействия БЛА с телами, вовлеченными в траекторный процесс (пусковым устройством, поверхностью земли), в контрольном объеме (КО) задается система твердотельных масок, кинематика которых определяется решением уравнений динамики. В общем случае движение БЛА по траектории описывается уравнениями динамики тела переменной массы, движущегося в поле сил земного тяготения и несбалансированных газодинамических сил, приложенных к наружным и внутренним поверхностям, а также моментов, действующих относительно центра масс [1].

Геометрическая подобласть решения отображается на сетку с гексаэдральными ячейками. Переменная топология геометрической подобласти решения задается импортированной из среды проектирования твердотельной маской (рис. 1, б) [1, 3]. Для обеспечения адекватного отображения направляющих свойств поверхностей ЛА на прямоугольной сетке использован метод отображения направляющих свойств твердотельных границ [3]. Для решения эволюционной задачи используется конечно-разностный метод, реализованный на регулярной временной сетке [1].

Результаты численных исследований представлены отображениями переменных фазовых срезов физических полей. Линии тока построены согласно работе [4].

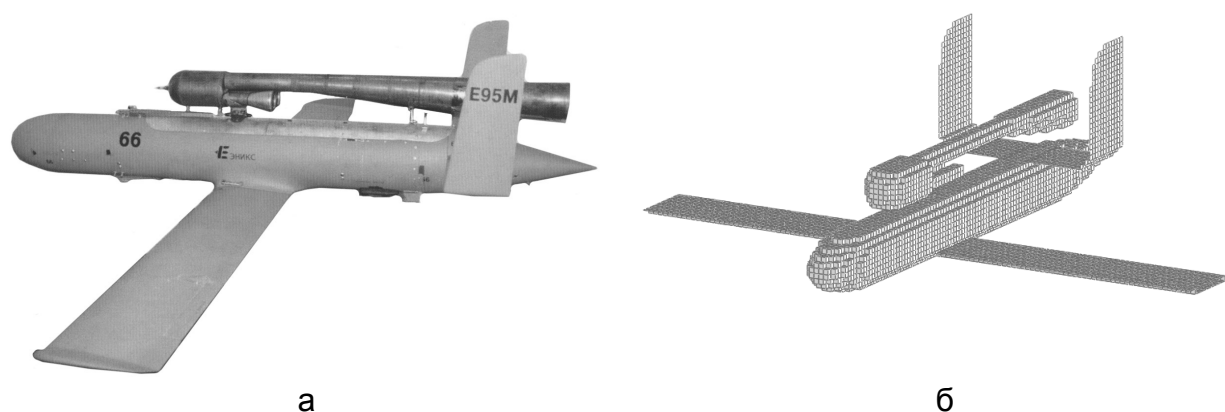


Рис. 1. БЛА с бесклапанным ПуВРД «Эникс» Е-95М:
а – физический оригинал; б - сеточное отображение

Результаты численного моделирования

Для получения представлений о пространственно-временном характере течения при вводе в полет БЛА с синхронно запускаемым ПуВРД заданы отдельные сечения КО, где в отдельных окнах показаны срезы физических полей (рис. 2), где отчетливо просматривается образование тороидальных вихревых структур. Обращает на себя внимание пространственный характер взаимодействия реактивной струи, выходящей из сопла, и реверсированного потока из входных патрубков.

Численный эксперимент дает следующую картину взаимодействия горячей струи с элементами конструкции (таблица 1). По окончании сгорания в выпускной и впускной трубах устанавливается течение в сторону сопел (рис. 2—5, где по на-

правлению сверху вниз – линии тока в плоскости симметрии; линии тока в горизонтальной плоскости, проходящей через впускные патрубки; плотность среды).

Таблица 1 – Фазовые состояния процесса запуска бесклапанного ПуВРД

1	Начало течения в сторону срезов сопла и патрубков ($t=0,001$ с).
2	Образование вихря между впускными патрубками и верхней частью фюзеляжа ($t=0,002$ с)
3	Образование вихря в плоскости впускных патрубков ($t=0,003$ с)
4	Воздействие струи, вытекающей из впускного патрубка, на хвостовую часть ($t=0,004$ с). Во впускной трубе поток тормозится. В выпускной трубе силы инерции обуславливают высокую скорость продуктов сгорания
5	Торможение в тракте сопла и реверсирование во впускных патрубках. В тракте сопла сохраняется зона прямого потока и проявляется вихрь в начальной ее части ($t=0,005$ с)
6	С натеканием свежей топливо-воздушной смеси (ТВС) и продуктов сгорания (ПС) из тракта сопла в момент, когда давление в камере сгорания (КС) приблизительно равно атмосферному, здесь зарождаются вихревые структуры. Заряд ТВС поступает в КС двумя струями, слабо взаимодействующими друг с другом и с внутренними течениями ($t=0,007$ с)
7	По мере роста давления в КС вследствие натекания ТВС и ПС зона вихревых структур захватывает весь объем КС и начальную часть тракта сопла. Обратный поток в тракте сопла тормозится. Происходит интенсивное перемешивание ТВС с ПС по всей длине поступившего заряда с последующим воспламенением смеси. Тракт сопла охвачен интенсивными вихревыми структурами (рис. 6) ($t=0,010 - 0,03$ с)

Из рассмотрения рис. 2–6 и таблицы 1 очевидно, что главными факторами теплового воздействия на хвостовую часть фюзеляжа являются реверсивный поток из входных патрубков и эжекция реактивной струи из основного сопла двигателя. Судя по известным конструктивным исполнениям БЛА с ПуВРД, в т.ч. и «глубоко» серийных, как в данном примере, разработчики не подозревают о пространственных эффектах взаимодействия, но сталкиваются с их последствиями. Термическое воздействие струй на фюзеляж БЛА, по-видимому, трактуется ими как тепловое излучение, от которого можно защитить конструкцию жаровой накладкой, что, в принципе, срабатывает универсальным образом. Однако применяемый далее для защиты сужающегося участка хвостовой части экран, с небольшим зазором закрепленный на растровой части резонатора, представляется средством неадекватным и малоэффективным в данных условиях.

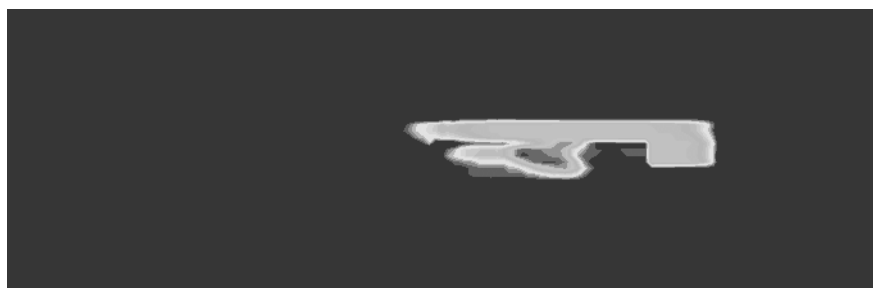
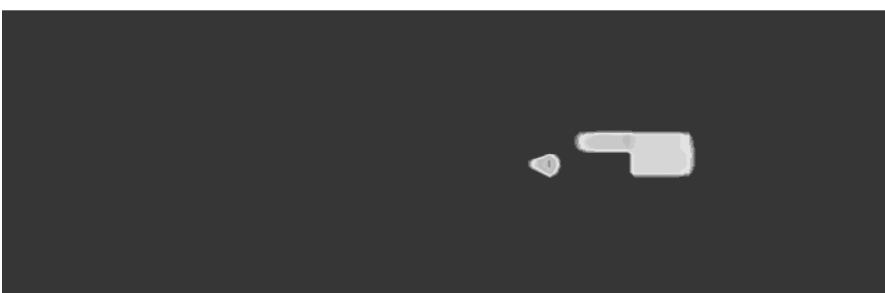
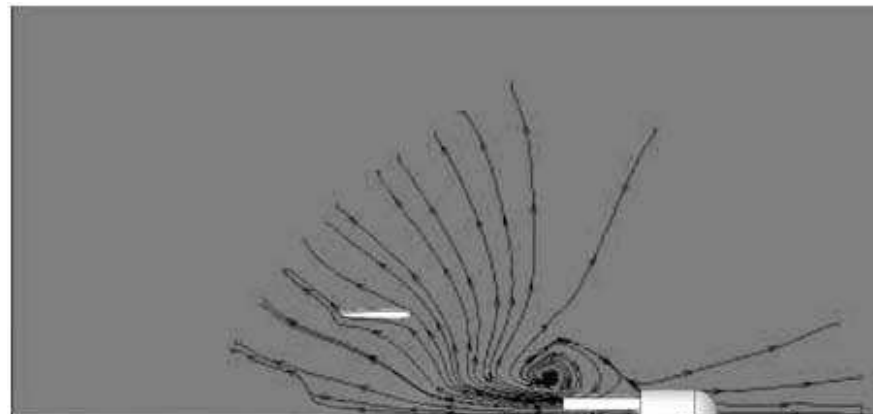
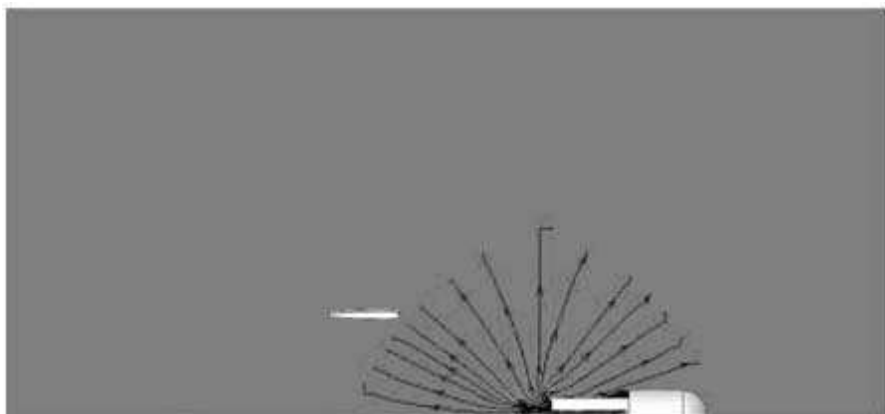
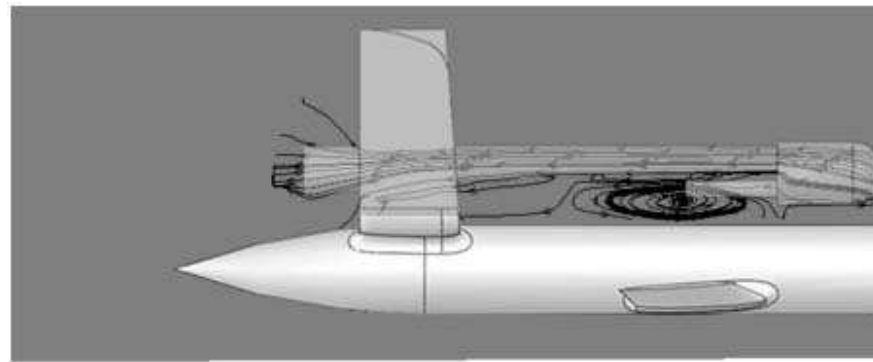
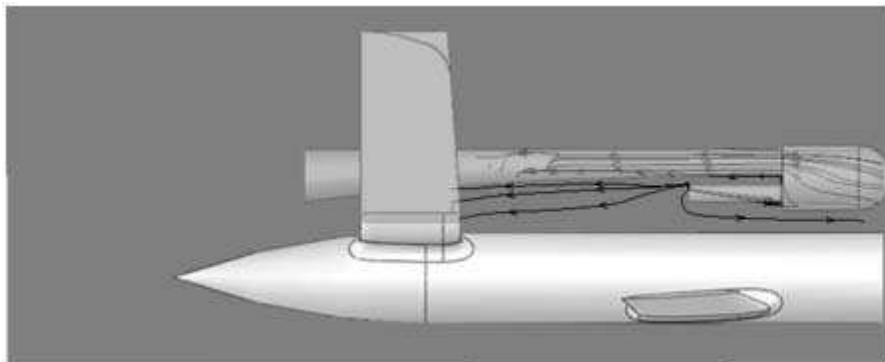


Рис. 2 Фаза 1

Рис. 3 Фаза 2

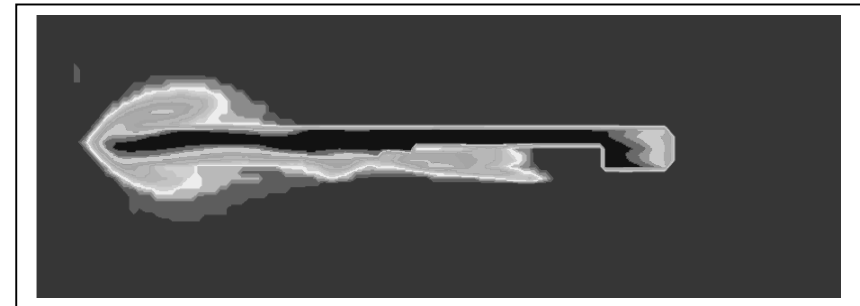
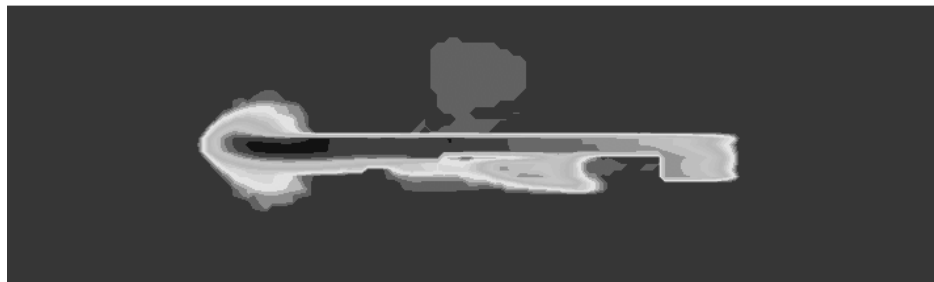
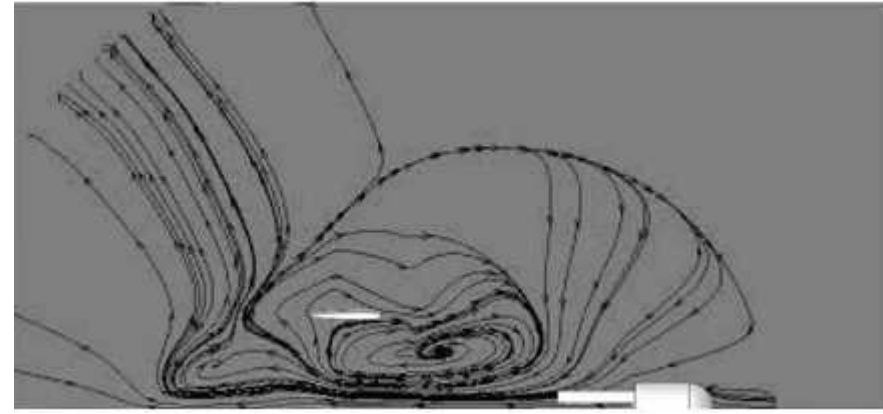
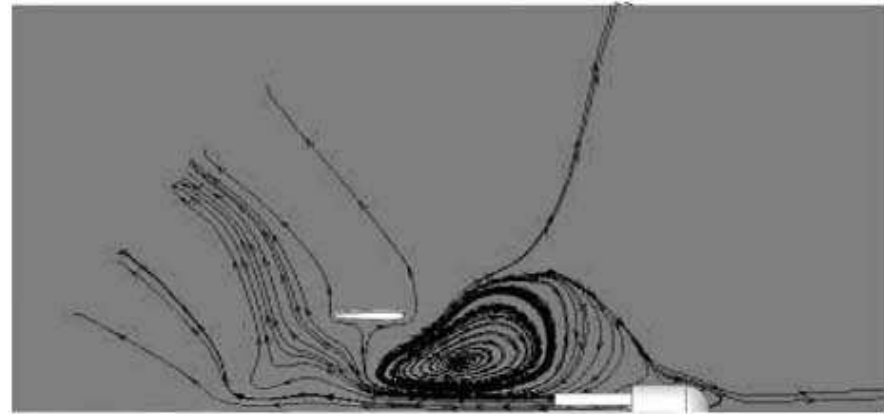
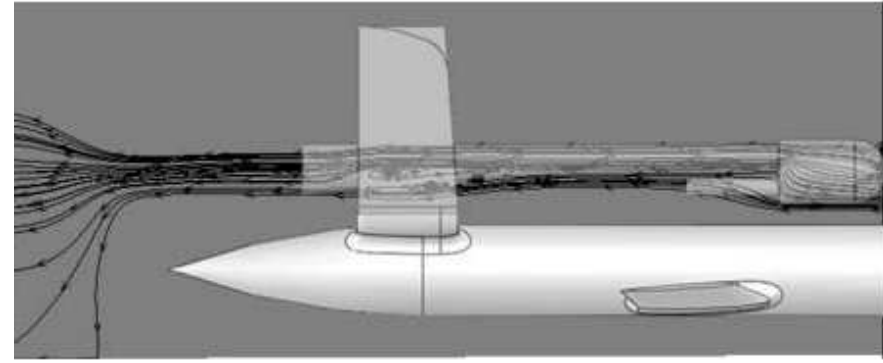
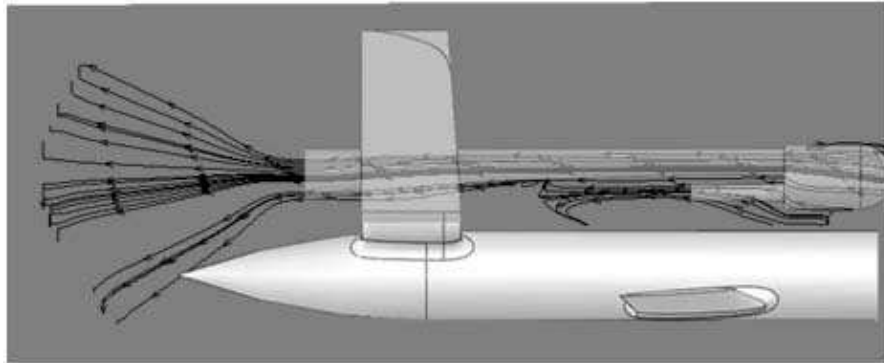


Рис. 4 Фаза 3

Рис. 5 Фаза 4

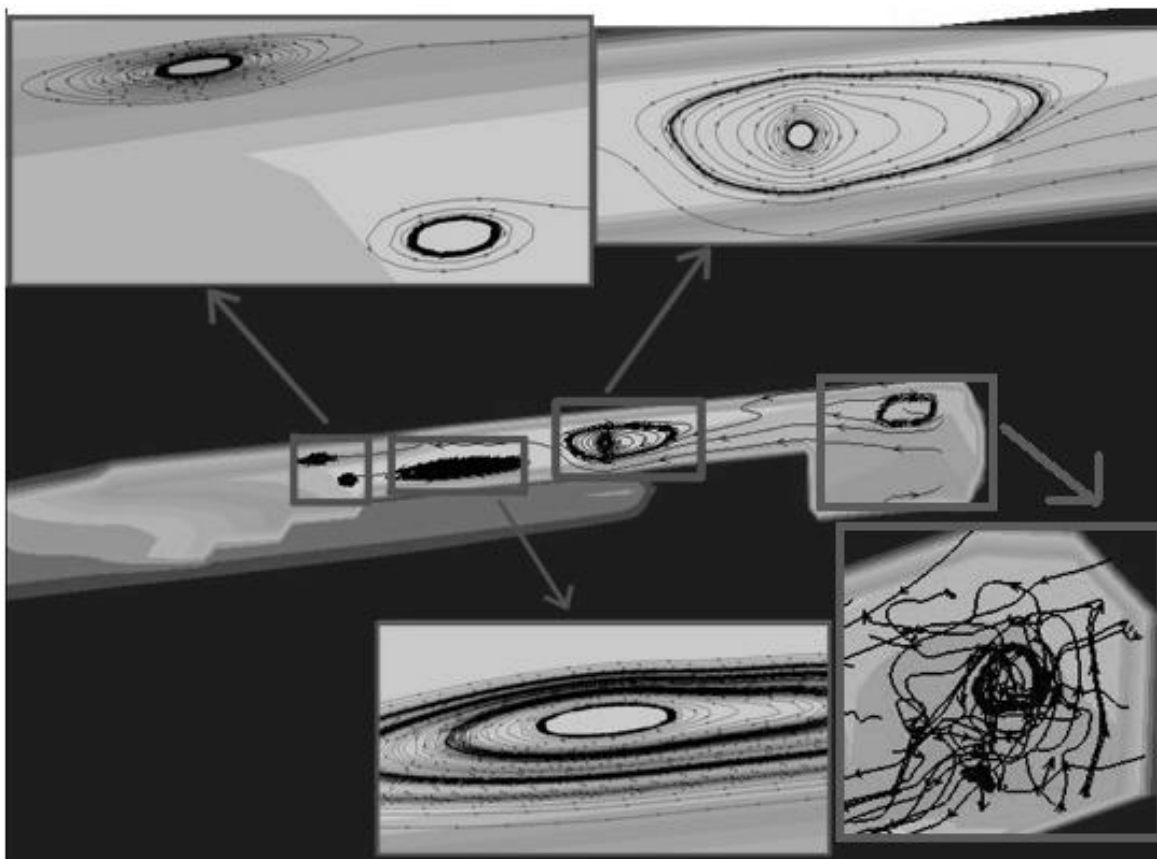


Рис. 6 Система вихрей в КС и резонаторе ПуВРД

Заключение

Комплексные газотермодинамические модели внешнего и внутреннего обтеканий БЛА отображают свойственную физическому оригиналу взаимосвязь доминирующих факторов. Представленная технология опережающих численных исследований позволяет провести базовый комплекс аэродинамических исследований БЛА с учетом струйных и тепловых эффектов. При этом визуализация численного решения демонстрирует возможность получения важных для решения задач проектирования, но совершенно неочевидных выводов о тепловой защите планера.

Список литературы

1. Амброжевич, А.В. Обобщенные аэрогазодинамические траекторные модели беспилотных летательных аппаратов [Текст] / А.В. Амброжевич, И.П. Бойчук // Аэрогидродинамика и аэроакустика: проблемы и перспективы, - 2009. – Вып.3. С.11–18.
2. Амброжевич, А.В. Модель многорежимного горения в тепловых машинах [Текст] / А.В. Амброжевич, С.Н. Ларьков, К.В. Мигалин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – Вып. 1 (58), – С. 76– 79.
3. Малоресурсный метод численного моделирования течений в геометрических областях сложной формы [Текст] / А.В. Амброжевич, И.П. Бойчук, С.Н. Ларьков, В.А. Серeda // Авиационно–космическая техника и технология. – 2008.– № 6/53. – С. 5–10.

4. 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 1.02.12

Рецензент: д–р техн. наук, проф. В. Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Використання візуалізації в аеродинамічному проектуванні

Розглянуто аспекти візуалізації фізичних полів дослідження режимів вільного польоту системи «планер—двигун» числовим експериментом. На прикладі безпілотного літального апарата з безклапанним пульсуючим повітряно-реактивним двигуном продемонстровано можливості технологій візуалізації стосовно до завдань установлення характеру взаємодії нестационарних реактивних струменів з елементами планера, вихрових структур та інших факторів процесу зовнішнього та внутрішнього обтікань з метою наступного вироблення адекватних технічних рішень на етапі аеродинамічного проектування.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, зовнішні та внутрішні обтікання, числовий експеримент, візуалізація фізичних полів.

Use of visualization in aerodynamic design

Aspects of visualization of physical fields with a view of research of modes of free flight of system "glider-engine" are considered by numerical experiment. On an example of unmanned aircraft vehicle with the pulsejet engine possibilities of technologies of visualization with reference to problems of an establishment of character of interoperability of non-stationary jet jets with elements of a glider, vortical structures, etc. factors of process of an external and internal flow in interests of the subsequent development of adequate technical decisions at a stage of aerodynamic design are shown.

Keywords: the unmanned aircraft vehicle, external and internal currents, numerical experiment, visualization of physical fields.