

УДК 658.512.011.056

**В.Ю. ГРАНИН, Т.С. ИНОЗЕМЦЕВА, О.К. ПОГУДИНА, Т.А. СИДОРЕНКО,  
О.И. ТАРАСОВ***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА САМОЛЕТА В СРЕДЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*Показана необходимость возможно более ранней оценки соответствия проектируемого самолета требованиям норм летной годности. Предложена информационная технология формирования облика самолета с использованием численного анализа его аэродинамических характеристик и моделирования полета для проверки летных характеристик. Разработан прототип программного комплекса, реализующего предлагаемую технологию предварительного проектирования. Проанализированы результаты проверки работоспособности прототипа комплекса, полученные результаты подтверждают целесообразность продолжения исследований. Выявлены основные препятствия к полной автоматизации задачи формирования облика самолета.*

**Ключевые слова:** облик самолета, аэродинамические характеристики, летные характеристики, нормы летной годности, CFD-система, летный симулятор.

**Введение**

Одно из главных положений методологии проектирования самолетов состоит в выделении двух уровней разработки проекта — внешнего и внутреннего проектирования [1]. Принципиальное различие между ними обусловлено различием конечных целей реализуемых здесь процессов разработки изделия. Цель внешнего проектирования состоит в определении целесообразности и возможности создания изделия, а целью внутреннего проектирования является получение информации, необходимой и достаточной для создания изделия в заданных условиях. Процесс внутреннего проектирования начинается с выработки общей концепции самолета и формирования его облика. Именно задача формирования облика служит связующим звеном в организации взаимодействия систем внешнего и внутреннего проектирования, как показано на рис. 1 [2].

**1. Формирование облика самолета: традиционная методология**

Понятие «облик изделия» не имеет строгого определения, но большинство специалистов по проектированию включают в его состав структурные (схемные) признаки и важнейшие параметры объекта проектирования, однозначно определяющие его форму, размеры и взлетную массу. К числу схемных признаков относят [2] аэродинамическую схему (нормальная, утка, бесхвостка), расположение крыла (нижнее, среднее, верхнее), форму крыла в плане, типы средств механизации крыла по передней и задней кромкам, схему оперения (низкорасполо-

женное, Т-образное), тип и расположение двигателей и т.д. Эту группу признаков называют параметрами формы. Они задают «безразмерный» прототип самолета, размеры которого доопределяются последующими расчетами. В рамках выбранного сочетания схемных признаков размеры самолета определяются, прежде всего, площадью крыла и стартовой тягой двигателей (или производными от них удельной нагрузкой на крыло и стартовой тяговооруженностью). Эту группу параметров именуют параметрами размерности.

Совершенство выбранной схемы характеризуется такими функциями геометрии планера, как коэффициент подъемной силы  $C_{y\alpha}$ , коэффициент лобового сопротивления  $C_{x\alpha}$ , аэродинамическое качество  $K$ , а эффективность силовой установки — функциями газодинамических характеристик двигателя, прежде всего удельным расходом топлива  $C_p$  и относительной массой топлива  $m_t$  [2].

Вместе перечисленные параметры однозначно определяют летные характеристики самолета. Варьируя их, проектировщик достигает целей проектирования.

Таким образом, задача формирования облика (ФО) включает в себя подзадачи структурного синтеза (определение схемных решений) и параметрического синтеза (определение оптимальных значений параметров размерности).

При этом задача структурного синтеза не может быть окончательно решена изолированно, поскольку эффективность полученного схемного решения может быть подтверждена только в результате решения задачи параметрического синтеза.

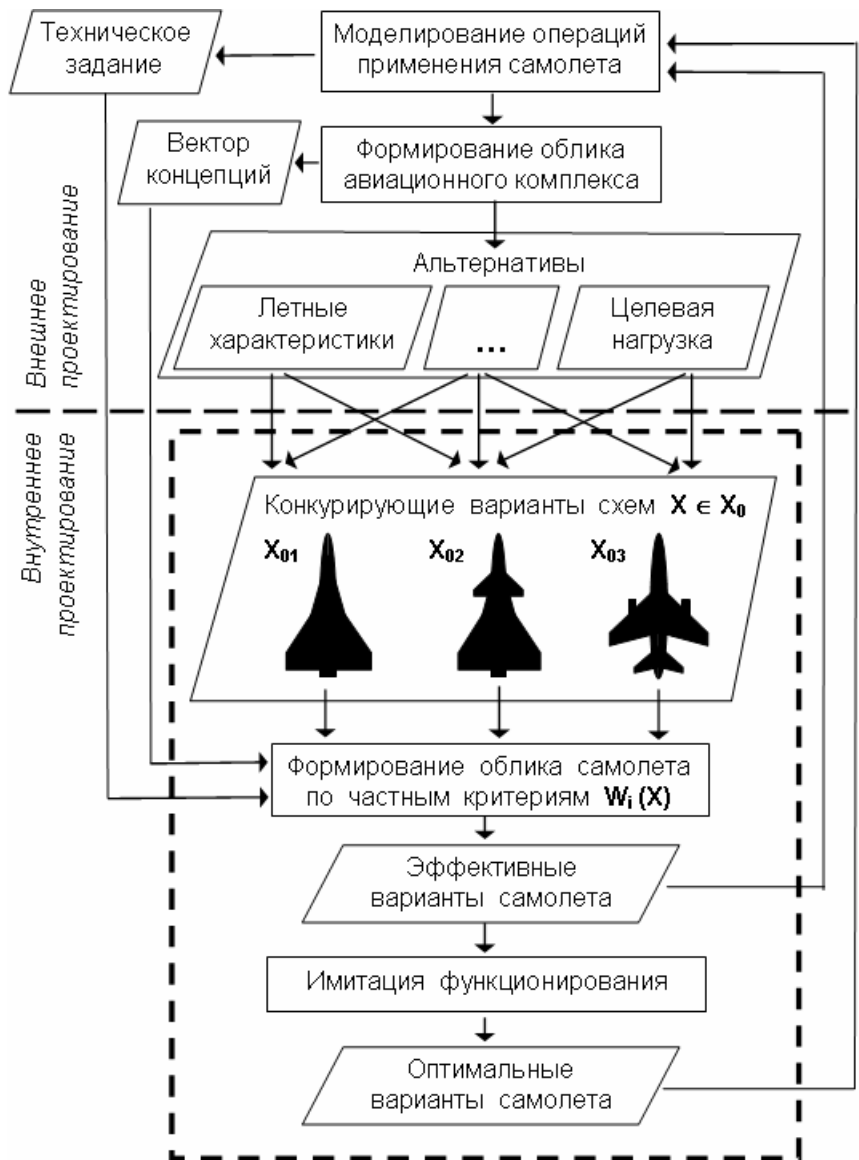


Рис. 1. Модель взаимодействия систем внешнего и внутреннего проектирования

Именно это обстоятельство делает задачу ФО столь ответственной и столь сложной для формализации.

Сложность этой задачи состоит не столько в организации перебора допустимых сочетаний схемных признаков, сколько в трудностях сравнения синтезированных вариантов схем.

Комплекс рассматриваемых нами задач выделен на рис. 1 штрихпунктирной рамкой. При этом в настоящей работе не рассматривается формирование геометрической модели самолета – она может быть построена в интерактивном режиме либо сгенерирована автоматически в специализированной знаниеориентированной подсистеме САПР, что никак не влияет на последующее ее использование.

## 2. Ограничения традиционной методологии

Традиционное решение задачи отбора рациональных вариантов проектных решений на стадии предварительного проектирования состоит в использовании эмпирических или приближенных аналитических зависимостей для определения аэродинамических и летных характеристик [2]. Этот же путь предлагается и в работах последних лет [3 – 5]. Подобный подход к задаче ФО (поиск аналогов, перебор сочетаний схемных признаков и расчет характеристик по упрощенным зависимостям) преобладает и в работах зарубежных авторов [6 – 8].

В качестве мотивов отказа от численного исследования на рассматриваемой стадии обычно называют его высокую трудоемкость. При всей кажущейся естественности такого подхода (многие исходные данные для точного анализа еще просто не установлены), ему присущ серьезный недостаток – невысокая точность оценок функциональных свойств самолета, т.е. его

аэродинамических и летных характеристик.

В то же время только летные характеристики и могут выступать в качестве частных критериев оценки и сравнения вариантов на стадии предварительного проектирования. Основным источником нормативных данных служат Нормы летной годности самолетов различных категорий, например [9], а практически единственная категория свойств самолета, которая может быть на этой стадии проверена на соответствие нормам – летные характеристики, поскольку именно эти свойства имеют в них наиболее полное количественное представление. Поэтому вполне естественно стремление получить более точную оценку этих характеристик на возможно более ранних этапах разработки. Однако известные упрощенные зависимости не могут охватить всю обшир-

ную номенклатуру скоростей, заданных в нормах. С этой точки зрения представляет интерес использование систем компьютерной аэродинамики и систем моделирования полета не только на стадиях технического и рабочего проектов, но и непосредственно в задаче ФО.

### 3. Тенденции развития CAE-систем

Целесообразность такого решения подкрепляется ведущими тенденциями развития программных средств инженерного анализа (Computer Aided Engineering – CAE) в последние годы, прежде всего следующими:

- переход к многодисциплинарному (так называемому мультифизическому) моделированию для решения связанных задач, требующих одновременного анализа процессов различной физической природы, например, обтекания конструкции потоком газа и ее деформации под действием этого потока [10]; такие возможности могут быть воплощены как в одной многопрофильной системе, например VHDL-AMS, SimulationX, ANSYS multiphysics, NASTRAN multidisciplinary и др. [11, 12], так и реализованы через взаимодействие разнопрофильных систем, например FlowVision и ABAQUS [13];

- переход от верификации проектных решений к опережающему моделированию (up-front simulation): опыт применения инструментария SimDesigner 2004 в среде CATIA V5 [14] показал, что перенос анализа проектных решений на более ранние стадии проектирования существенно повышает эффективность САПР; развитием этого направления стал проект SIMULIA компании Dassault Systemes [15], положивший начало новому классу инструментов САПР – классу систем реалистического моделирования (realistic simulation), именуемых также системами быстрого анализа и проверки вариантов проекта (Rapid Analysis and Validation of Design Alternatives – RAVDA); подобные разработки ведутся и другими компаниями [16];

- использование CAE-систем не только для верификации, но и для синтеза проектных решений – характерным примером служат методы оптимизации формы объектов (topology optimization) путем итерационного выполнения процедур анализа напряженного состояния и последующего исключения из модели наименее нагруженных конечных элементов [17, 18], в результате чего формируется конструкция, близкая к равнопрочной.

Дополнительным стимулом к включению программных средств анализа аэродинамических процессов (Computational Fluid Dynamics – CFD) и систем моделирования полета вместе со специализированными программами синтеза компоновки и гео-

метрии модели в единый цикл формирования облика самолета служит еще одна современная тенденция построения САПР – переход от «изначально интегрированных» комплексов к «свободно интегрируемым» наборам функциональных модулей. Такой подход (компоновка из готовых модулей с минимумом собственного программирования) успешно применяется в проектировании изделий микроэлектроники и микромеханики [19], где такие системы получили название гетерогенных САПР. Этот путь представляется перспективным и для других областей техники, что подтверждается разработками зарубежных исследовательских групп, в частности работами Делфтского технического университета [20], где отрабатывается методология многоаспектного параллельного проектирования с использованием CAE-систем ENFLOW или FLUENT для аэродинамического анализа, NASTRAN и PATRAN для прочностного анализа во взаимодействии со знание-ориентированными системами синтеза проектных решений на базе ICAD.

### 4. Предлагаемый подход

Таким образом, анализ предшествующих работ свидетельствует о существовании противоречия между потребностью в многовариантном проектировании, требованиями сокращения сроков разработки и недостаточной точностью методов оценки аэродинамических и летных характеристик самолета в ходе предварительного проектирования. Для его разрешения предлагается использование систем CFD и летных симуляторов на возможно более ранних стадиях проектирования, с момента синтеза первых вариантов топологии и геометрии самолета, то есть уже в задаче формирования облика.

Общая последовательность проектных процедур в предлагаемой методике предварительного проектирования в целом также соответствует рис. 1, однако их содержание несколько изменяется:

- выбор сочетания схемных признаков для очередного варианта проектного решения;
- проектировочные расчеты основных параметров самолета;
- построение геометрической модели первого приближения;
- виртуальная продувка модели в CFD-системе;
- определение основных аэродинамических характеристик;
- задание исходных данных и/или программирование блока динамики полета летного симулятора;
- виртуальные испытательные полеты в симуляторе;
- вывод о возможности достижения заданных

характеристик и о соответствии нормам летной годности.

Для проверки предлагаемой технологии предварительного проектирования разработан прототип программного комплекса в составе CAD-системы SolidWorks, собственного приложения Plane3D для автоматизированного синтеза геометрической модели, CFD-системы Flow Vision и летного симулятора Flight Gear. В работе комплекса используются также программные средства общего назначения – текстовый редактор Notepad для хранения координат точек стандартных аэродинамических профилей, табличный процессор MS Excel для хранения характеристик самолетов-аналогов и результатов расчета и графический редактор Blender для конвертирования 3D модели в формат, необходимый летному симулятору. Схема комплекса показана на рис. 2.

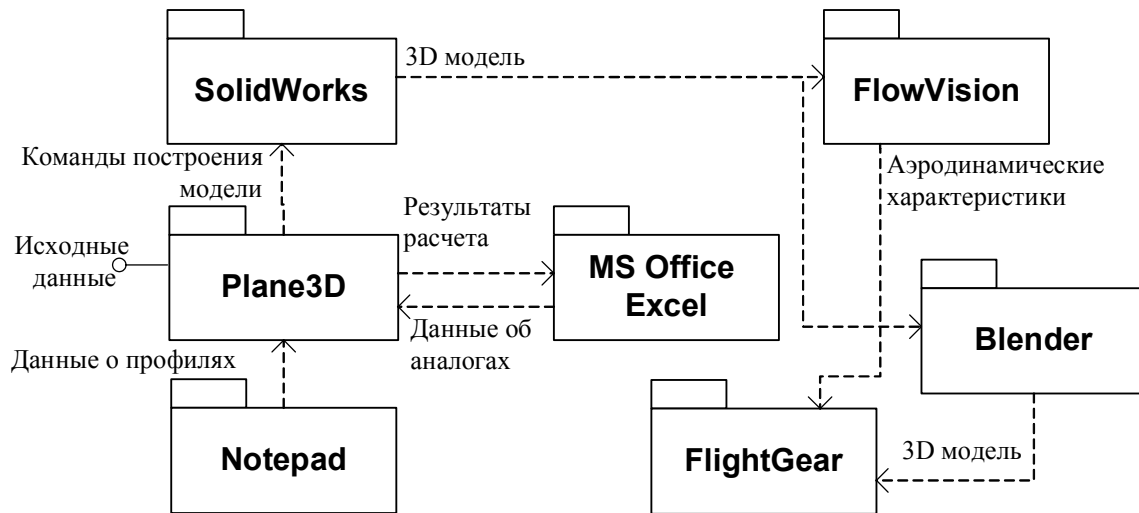


Рис. 2. Структурная схема программного комплекса

Ниже проиллюстрированы основные этапы работы по анализу летных характеристик проектируемого самолета.

Геометрическая модель самолета, сгенерированная приложением Plane3D во взаимодействии с SolidWorks (рис. 3), транслируется и передается в CFD-систему Flow Vision в формате VRML.

В системе Flow Vision генерируется сетка конечных объемов (рис. 4), задаются условия адаптации сетки, граничные и начальные условия, а затем выполняется виртуальная продувка модели на интересующем исследователя режиме.

Полученные результаты – значения или графики изменения скоростей потока, давлений, аэродинамических сил и других параметров (рис. 5, 6) подлежат обработке для соответствующей настройки блока динамики симулятора.

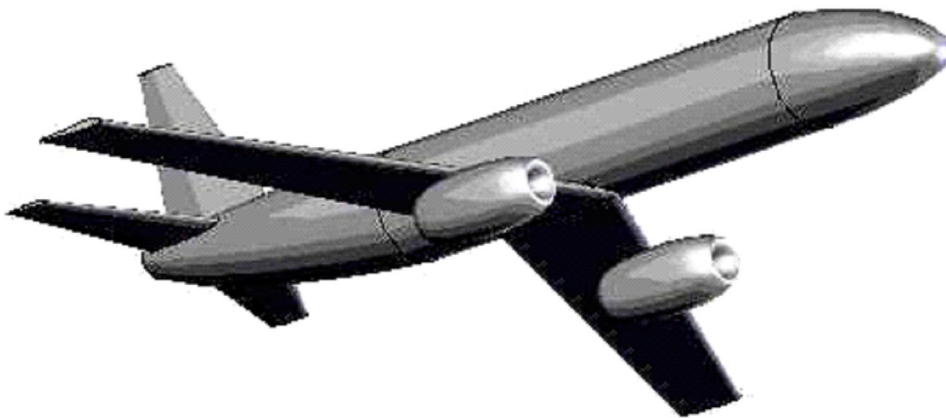


Рис. 3. Геометрическая модель самолета

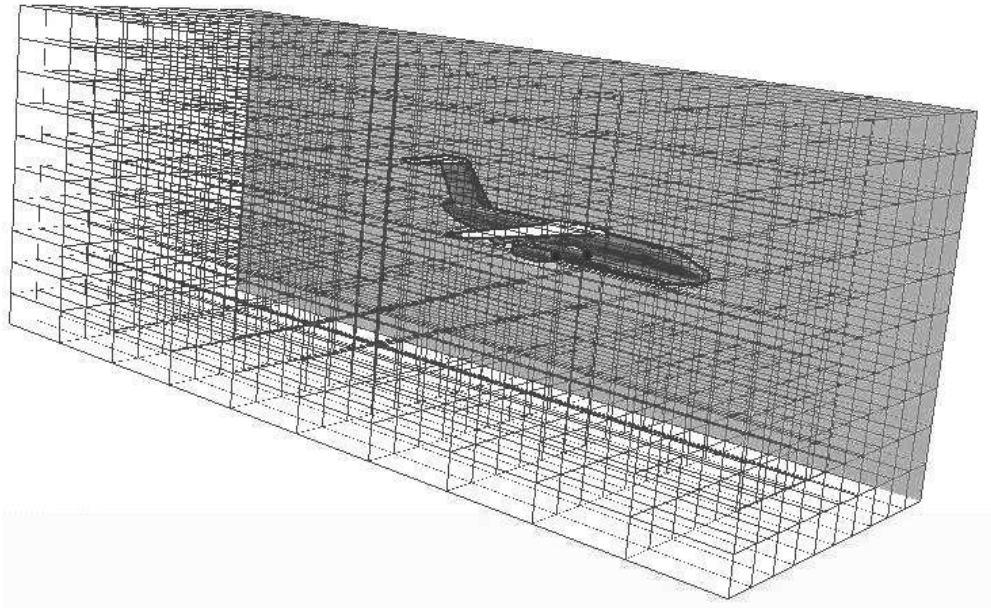


Рис. 4. Сетка конечных объемов в системе Flow Vision

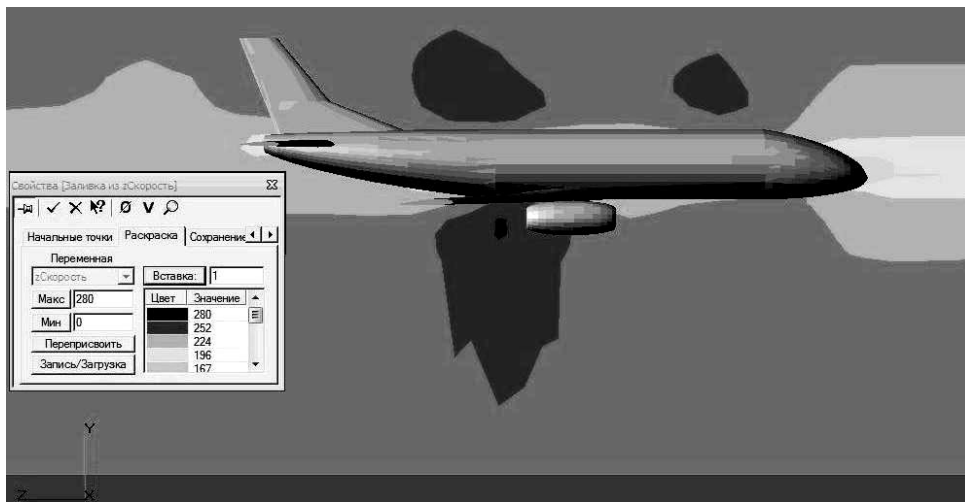


Рис. 5. Распределение скоростей в плоскости симметрии самолета

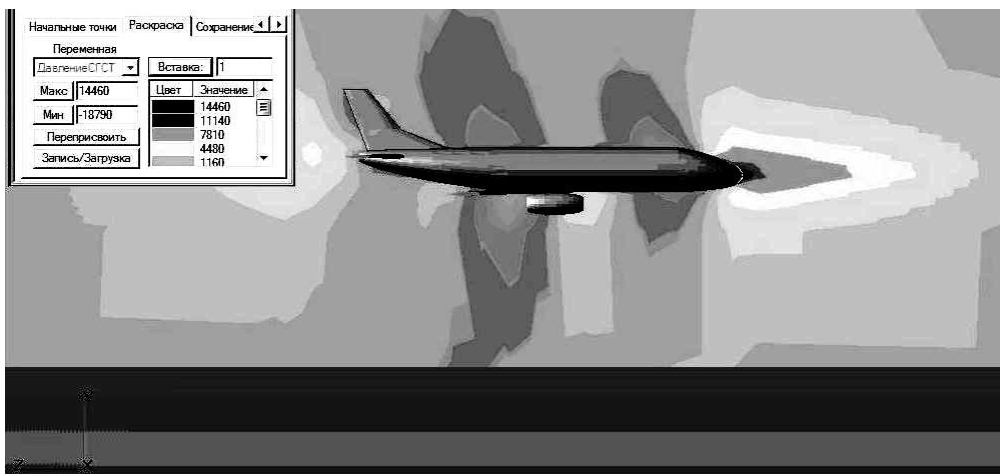


Рис. 6. Распределение давлений в плоскости симметрии самолета

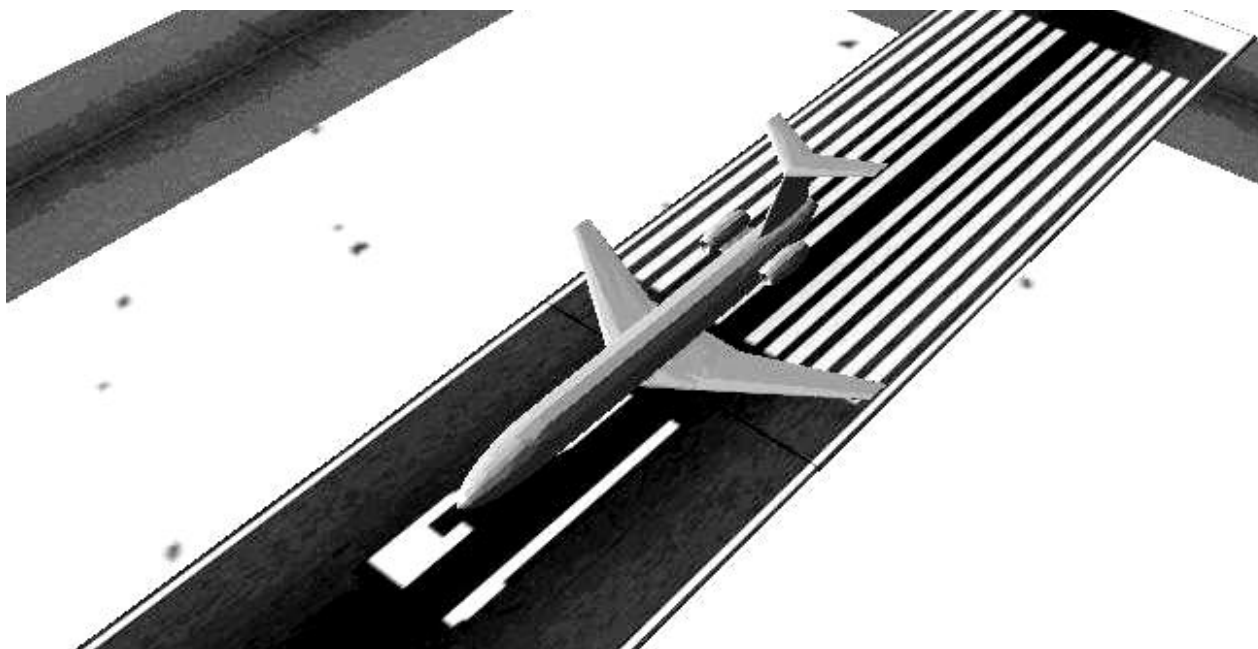


Рис. 7. Модель самолета, загруженная в симулятор

После выполнения настройки симулятора модель преобразуется в формат AC3D и загружается в симулятор для выполнения виртуальных летных испытаний (рис. 7).

## 5. Анализ результатов

В ходе тестирования прототипа комплекса получены основные результаты, которые приведены ниже.

1. Установлена возможность включения задач анализа аэродинамики и моделирования полета в единый процесс проектирования самолета на ранних стадиях разработки.

2. Выявлена необходимость более тщательного, чем обычно принято в задачах формирования облика, построения геометрической модели ввиду чувствительности CFD-систем к гладкости поверхностей модели.

3. Основные затруднения, препятствующие полной автоматизации задачи формирования облика самолета, таковы:

3.1. Отсутствие объективных сведений о точности результатов моделирования в различных симуляторах; это может потребовать отдельных исследований для сравнительной оценки возможностей различных систем имитации полета.

3.2. Отсутствие (по объективным причинам) на ранних стадиях разработки ряда исходных данных для симулятора (этих данных в принципе еще нельзя получить); это может потребовать поиска прототипа

морфологическими методами, например [21] и использования его характеристик в качестве первого приближения.

3.3. Трудоемкость обработки результатов аэродинамического анализа и подготовки данных для симулятора по результатам виртуальной продувки; это может потребовать создания программ-трансляторов.

3.4. Отсутствие единого формата представления аэродинамических и летных характеристик самолета.

## Выводы

1. Показана необходимость возможно более ранней оценки соответствия проектируемого самолета требованиям норм летной годности.

2. Предложена информационная технология формирования облика самолета с использованием численного анализа его аэродинамических характеристик и моделирования полета для проверки летных характеристик.

3. Разработан прототип программно-методического комплекса, реализующего предлагаемую технологию предварительного проектирования.

4. Выполнена проверка работоспособности прототипа комплекса, полученные результаты подтверждают целесообразность продолжения исследований.

5. Основными задачами последующих работ должны быть:

– обоснование выбора несложных и недорогих CFD-систем и систем моделирования полета с достаточной для ранних стадий разработки точностью результатов;

– разработка методики интерпретации результатов CFD-анализа и программирования блоков аэродинамики и динамики полета симулятора;

– разработка методики выполнения виртуальных испытательных полетов для снятия характеристик по подтверждению требований норм летной годности.

## Литература

1. Володин В.В. Автоматизация проектирования летательных аппаратов / В.В. Володин. – М.: Машиностроение, 1991. – 255 с.
2. Егер С.М. Основы автоматизированного проектирования самолетов / С.М. Егер, Н.К. Лисейцев, О.С. Самойлович. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
3. Гайнутдинова Т.Ю. Программный комплекс автоматизированного проектирования авиационных конструкций / Т.Ю. Гайнутдинова // Вестник ТГГПУ. – 2007. – № 2-3 (9-10). – С. 15-32.
4. Нарожный А.Н. Компьютерная поддержка процесса определения летно-технических характеристик самолета. Ч. 7. Моделирование реальных испытаний / А.Н. Нарожный, Д.А. Никонов, Г.Г. Высокогляд, А.И. Шелудько // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 38. – X., 2008. – С. 27-34.
5. Луковников А.В. Концептуальное проектирование силовых установок летательных аппаратов в междисциплинарной постановке / А.В. Луковников // Вестник МАИ. – 2008. – Т. 15, № 3. – С. 34-43.
6. Wilson S.B. Conceptual Aircraft Design – Lost Art, or Science? [Электронный ресурс] / S.B. Wilson, L. Fila. – Режим доступа: [www.avidllc.biz/publications/CAD\\_Lost\\_Art\\_or\\_Science.pdf](http://www.avidllc.biz/publications/CAD_Lost_Art_or_Science.pdf).
7. Rentema D. An AI Tool for Conceptual Design of Complex Products / D. Rentema, E. Jansen // Design Research in the Netherlands. – 2000. – P. 119-131.
8. Raymer D.P. Enhancing Aircraft Conceptual Design using Multidisciplinary Optimization: Doctoral Thesis. – Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002. – 150 p.
9. Единые нормы летной годности гражданских транспортных самолетов стран-членов СЭВ. Введ. в действие с 25.10.1985. – Совет экономической взаимопомощи. Межведомственная комиссия по НЛГ гражданских самолетов и вертолетов СССР, 1985. – 470 с.
10. Плыкин М. FSI-технологии ANSYS / М. Плыкин // САПР и графика. – 2006. – № 7. – С. 38-39.
11. Норенков И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
12. SimulationX компании ITI GmbH [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.iti.de/en/simulationx.html>.
13. Аксенов А. Анализ задач взаимодействия жидкость – конструкция с использованием программных комплексов ABAQUS и FlowVision / А. Аксенов, В. Коньшин // САПР и графика. – 2006. – № 9. – С. 27-29.
14. Захаров В. SimDesigner 2004 — новое поколение инструментов анализа и моделирования в среде системы CATIA V5 / В. Захаров // САПР и графика. – 2004. – № 1. – С. 14-19.
15. Holtz V. Поглощение ABAQUS компанией Dassault Systemes поднимает ряд вопросов / В. Holtz, A. Rowell // CAD/CAM/CAE Observer. – 2005. – № 6. – С. 24-28.
16. Веб-ресурс компании International Techne-Group Incorporated [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iti-oh.com/>.
17. Мазурин А. Компьютерное моделирование изделий и САЕ-системы / А. Мазурин // САПР и графика. – 2001. – № 1. – С. 56-63.
18. Веб-ресурс международного проекта PLATO-N [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.plato-n.org](http://www.plato-n.org).
19. Лобур М.В. Методи та моделі для наскрізного проектування вбудованих систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.12 / Михайло Васильович Лобур; НТУУ «КПІ». – К., 2004. – 32 с.
20. Schut E.J. Feasibilization of a structural wing design problem / E.J. Schut, M.J.L. van Tooren, J.P.T.J. Berends. // 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. – USA: Schaumburg IL, 2008. – P. 44-45.
21. Дружинин Е.А. Формализованная модель задачи структурного синтеза требований к результатам проекта / Е.А. Дружинин, О.К. Габчак // Системи обробки інформації: зб. наук. праць Харківського ун-та Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – Вип. 8 (48). – X., 2008. – С. 7-14.

Поступила в редакцию 30.03.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела Б.А. Демидов, Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба

### ФОРМУВАННЯ ВИГЛЯДУ ЛІТАКА В СЕРЕДОВИЩІ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

*В.Ю. Гранін, Т.С. Иноземцева, О.К. Погудіна, Т.О. Сидоренко, О.І. Тарасов*

Показано необхідність можливо більш ранньої оцінки відповідності проектного літака вимогам норм літної придатності. Запропоновано інформаційну технологію формування вигляду літака з використанням чисельного аналізу його аеродинамічних характеристик і моделювання польоту для перевірки літних характеристик. Розроблено прототип програмного комплексу, що реалізує запропоновану технологію попереднього проектування. Проаналізовано результати перевірки працездатності прототипу комплексу, отримані результати підтверджують доцільність продовження досліджень. Виявлено основні перешкоди до повної автоматизації задачі формування вигляду літака.

**Ключові слова:** вигляд літака, аеродинамічні характеристики, льотні характеристики, норми літної придатності, CFD-система, льотний симулятор.

### PLANE IMAGE FORMATION IN THE ENVIRONMENT OF THE INTEGRATED COMPUTER AIDED DESIGN SYSTEM

*V.J. Granin, T.S. Inozemtseva, O.K. Pogudina, T.A. Sidorenko, O.I. Tarasov*

The necessity of the earliest estimation of the designed product conformity with airworthiness requirements is shown. The information technology of plane image forming with the help of the numerical analysis of its aerodynamic characteristics and flight modeling for checking of flight characteristics is offered. The program complex prototype realizing offered technology of preliminary designing is developed. The results of checking of complex prototype working capacity are analyzed, the received results confirm the appropriateness of researches continuation. The main obstacles to the complete automation of the plane image formation task are revealed.

**Keywords:** plane image, aerodynamic characteristics, flight characteristics, airworthiness requirements, CFD-system, a flight simulator.

**Гранін Віктор Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій проектування летательних апаратів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: Victor.Granin@k108.khai.edu.

**Иноземцева Татьяна Сергеевна** – студент кафедри інформаційних технологій проектування летательних апаратів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Погудина Ольга Константиновна** – канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій проектування летательних апаратів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: ok\_gabchak@ukr.net

**Сидоренко Татьяна Александровна** – аспірантка кафедри інформаційних технологій проектування летательних апаратів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Тарасов Олег Иванович** – студент кафедри інформаційних технологій проектування летательних апаратів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.