

Научная статья
УДК 629.7
DOI: 10.34759/vst-2022-3-41-55

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТРЁХМЕРНОЙ КОМПОНОВКИ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГРАЖДАНСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Олег Владимирович Сонин

Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),
Жуковский, Московская область, Россия
velomobil@yandex.ru

Аннотация. Представлена технология компоновки фюзеляжа с помощью разработанной в ЦАГИ «Автоматизированной системы трёхмерной компоновки пассажирского самолета» (АВТОКОМ). Приведены примеры практического применения АВТОКОМ при формировании облика перспективных гражданских летательных аппаратов.

Ключевые слова: поперечное сечение регулярной части фюзеляжа, компоновка фюзеляжа, АВТОКОМ, внешние обводы, формирование облика пассажирских самолётов

Для цитирования: Сонин О.В. Автоматизированная система трёхмерной компоновки и её применение в задачах формирования облика перспективных гражданских летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 41-55. DOI: 10.34759/vst-2022-3-41-55

Original article

AUTOMATED SYSTEM FOR THREE-DIMENSIONAL LAYOUT AND ITS APPLICATION IN THE PROBLEMS OF PROSPECTIVE CIVIL AIRCRAFT CONFIGURATION DESIGN

Oleg V. Sonin

Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),
Zhukovsky, Moscow Region, Russia
velomobil@yandex.ru

Abstract

The article recounts the technology of the fuselage internal layout by the automated system of three-dimensional layout for passenger aircraft (AVTOKOM) developed in TsAGI.

AVTOKOM allows forming passenger cabins and cargo bays of the fuselage with account for the specified comfort standards and safety requirements to the deployment of passenger seats, common and service premises, operational and emergency exits, luggage compartments etc. in both interactive and automatic modes.

The stages of fuselage layout by AVTOKOM are as follows:

1. Formation of typical elements that meet the specified standards and requirements.
2. Optimization of the cross section of the fuselage regular part.
3. Passenger and cargo decks layout.
4. Creating a parametric model of the fuselage outlines.
5. Three-dimensional surface model of the entire aircraft outlines.
6. Calculation of the center of mass of the elements comprising the layout.
7. Visualization of the studies results.
8. Output data formation for the subsequent calculations.

An iterative technology of passenger aircraft geometric model formation has been developed, on which basis further research in the areas of aerodynamic layout, structural strength and aircraft control systems are being conducted. As the result, the aircraft mathematical model that meets the layout requirements and numerous physical criteria is being formed.

The article presents the examples of the AVTOKOM application while performing the layout studies of:

- A long-haul aircraft with 200, 400 and 600, 800, 1000 and 1400 passenger capacity for medium and long-haul airlines;

- A long-haul aircraft concept with an integrated power plant;

- A long-haul aircraft on liquid hydrogen fuel;

- An aerospace plane with a capacity of 5-7 passengers.

As the result of these studies, the external geometric contours, layouts of passenger cabin and cargo bays of fuselages with elements of equipment and interior and specified nomenclature of service and cargo equipment, as well as layouts of the landing gear and fuel tanks have been formed. The article demonstrates that the standards of passenger comfort and safety requirements are met in all of the considered aircraft projects.

Keywords: cross section of fuselage regular part, fuselage layout, AVTOKOM, external contours, passenger aircraft layout forming

For citation: Sonin O.V. Automated System for Three-Dimensional Layout and its Application in the Problems of Prospective Civil Aircraft Configuration Design. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 41-55. DOI: 10.34759/vst-2022-3-41-55

Введение

Необходимым элементом системы многодисциплинарного проектирования является комплекс программ построения электронной геометрической модели летательного аппарата (ЛА). Процесс проектирования любого ЛА начинается с формирования общего вида и компоновочной увязки основных агрегатов и узлов конструкции и оборудования. В задачах проектирования компоновочные исследования играют центральную роль, создавая единую информационную базу для разработки конструктивно-силовых схем (КСС) и аэродинамических поверхностей с общей моделью геометрии [1–7].

Существующие наработки в области автоматизации компоновки ЛА можно условно разделить на четыре основных типа:

Первый тип – это модули автоматизации двухмерного черчения, разработанные в начале

70-х – конце 80-х годов для специализированных систем автоматизированного проектирования (САПР), которые в своё время проявили себя как эффективный инструмент формирования облика ЛА. Ограниченность возможностей их применения связана с тем, что они предназначены для решения плоских геометрических задач. Как правило, эти модули морально устарели, не согласуются с современными платформами и зачастую, утратив коллективы разработчиков, перестают служить инструментарием проектантов.

Второй тип – это программы, создаваемые в вузах. Они успешно выполняют учебно-методические задачи и носят тестовый и демонстрационный характер, а этого достаточно для показа возможностей использования информационных технологий в задачах проектирования ЛА.

Третий тип – это широко распространённые универсальные САПР (CAD/CAE/CAM). Некоторые из них были первоначально ориентированы на самолётостроение, но затем расширились и до общемашиностроительных систем (CATIA, NX, Creo и др.) [8–10]. Их преимущества – широчайший спектр возможностей, дружественные интерфейсы, большое число разработчиков и пользователей. Однако все эти системы предназначены в основном не для предварительного проектирования и предлагают чисто интерактивный процесс создания компоновки, без какой-либо базы данных и специализированных процедур.

Четвёртый тип – это специализированные САПР, созданные для формирования облика ЛА (Pacelab, CAPDA, PreSTo и др.) [11–15]. Их недостатки – более узкий, чем у универсальных САПР, спектр возможностей, ориентация на зарубежных пользователей и невозможность внести изменения в программный код.

Всё это говорит об актуальности создания специализированной системы, использующей возможности универсальных САПР.

Научная новизна данной работы обусловлена тем, что компоновка – это сложный процесс, требующий размещения множества элементов с соблюдением ряда ограничений, и для обеспечения высокого качества компоновки в ЦАГИ создана «Автоматизированная система трёхмерной компоновки пассажирского самолёта» (АВТОКОМ). Центральным элементом системы АВТОКОМ является модуль компоновки фюзеляжа [16–18], который позволяет в интерактивном, а также в автоматическом (при решении ряда стандартных компоновочных процедур) режимах осуществлять его внутреннюю компоновку, используя нормативы и требования к размещению пассажирских кресел, служебно-бытовых помещений, эксплуатационных и аварийных выходов, багажных помещений и т.д. [19]. Детальная внутренняя компоновка фюзеляжа с позиционированием элементов оборудования и интерьера может использоваться в качестве первичной геометрической модели в общем цикле оптимизации параметров ЛА.

Опыт исследования перспективных ЛА показал рациональность методического подхода, представленного на рис. 1.

По заданным значениям вместимости и дальности полета с помощью САПР «Автоматизированная расчётно-диалоговая система» (АРДИС) выполняются расчёты для формирования облика пассажирских самолётов [20–26], выбора ос-

новных параметров исследуемого варианта ЛА и определяются три проекции общего вида. Затем с помощью АВТОКОМ проводится компоновка фюзеляжа и уточнение его геометрических размеров. Созданная модель фюзеляжа может использоваться для проведения повторных расчетов с помощью программного комплекса АРДИС, в результате которых определяется предварительный облик ЛА. Затем с помощью АВТОКОМ формируется трёхмерная математическая модель обводов ЛА, на базе которой проводятся дальнейшие исследования в областях оптимизации аэродинамической компоновки планера и обводов мотогондол силовой установки (СУ), формирования конструкции, удовлетворяющей критериям прочности и аэроупругости, формирования облика системы управления ЛА.

Таким образом, с помощью комплексных междисциплинарных исследований формируется математическая модель ЛА, отвечающая как компоновочным требованиям, так и многочисленным физическим критериям.

Методика компоновки фюзеляжа с помощью АВТОКОМ

В качестве исходных данных для компоновки фюзеляжа с помощью АВТОКОМ используются:

- число пассажиров, распределение пассажиров по классам;
- тип контейнеров в случае контейнерной загрузки багажа и грузов;
- выполненные посредством АРДИС три проекции общего вида ЛА.

Методика компоновки фюзеляжа с помощью автоматизированной системы предусматривает следующую последовательность действий.

На первом этапе формируются типовые элементы компоновки. Для этого разработана база данных, где в электронном виде содержатся геометрические шаблоны элементов компоновки. Шаблоны соответствуют стандартной конфигурации типовых элементов. В программе предусмотрена возможность изменения конфигурации с помощью задания характерных размеров в соответствующих электронных таблицах – интерфейсах. Например, можно увеличить ширину подлокотника в кресле или ширину подушки сиденья.

Интерфейсы, необходимые для изменения размеров, созданы для следующих элементов:

- *контейнеров* – можно изменять размеры и тип контейнеров;

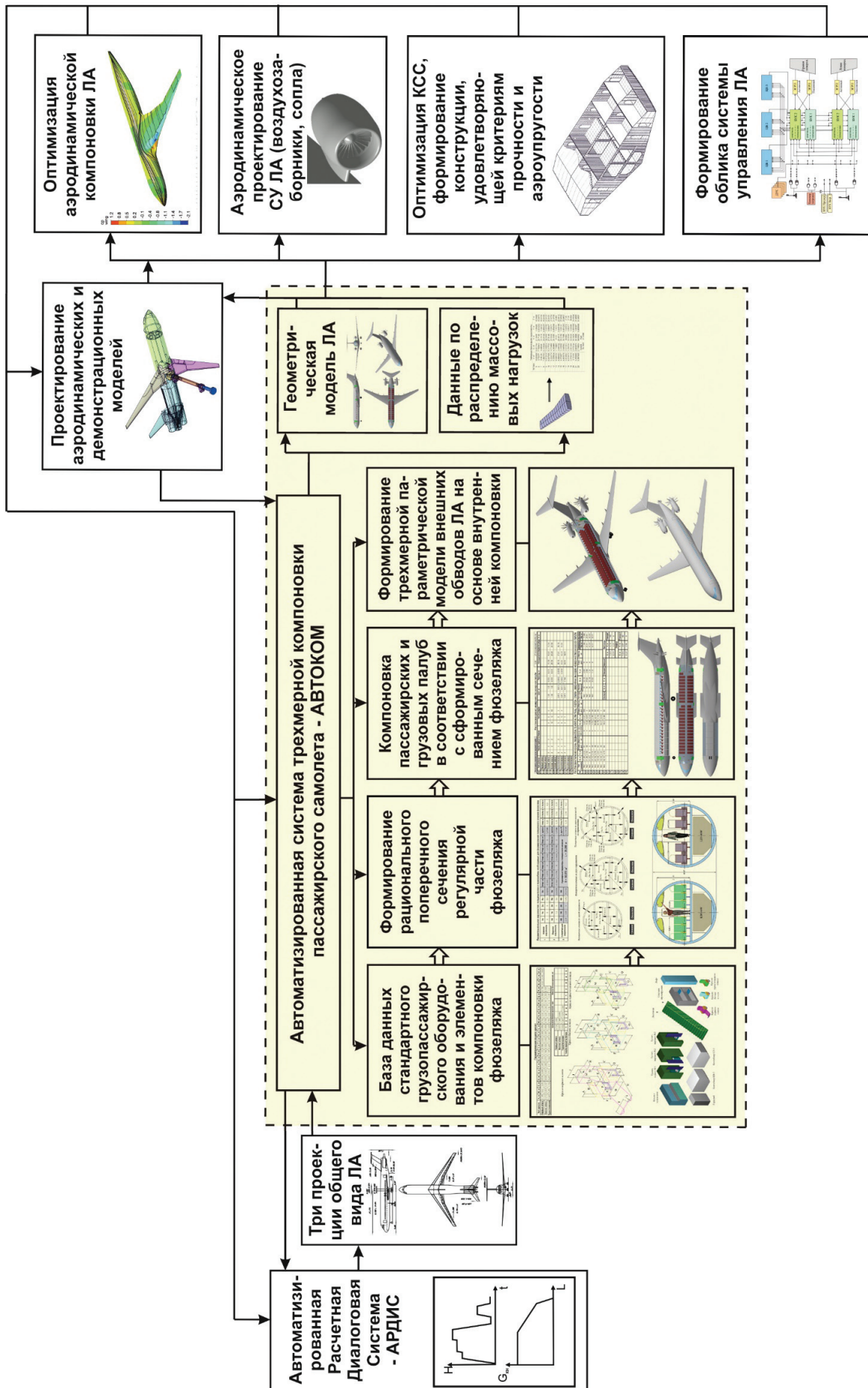


Рис. 1. Схема формирования облика ЛА с использованием АВТОКОМ

- *лестницы* — можно изменять угол наклона, ширину, высоту ступеньки, расстояние между перилами, диаметр перил;
 - *лифты* — можно изменять габаритные размеры;
 - *двери (эксплуатационные, аварийные выходы, грузовые люки)* — можно изменять тип и размеры;
 - *секции гардеробов трёх классов* — можно изменять габариты каждой секции и формировать их с учётом числа секций;
 - *кресла трёх классов* — можно изменять размеры каждого кресла в отдельности и ширину блока из нескольких кресел (от одного до пяти) для каждого класса;
 - *спальни двух- и одноярусные* — можно задавать размеры ярусов спален и размеры постели, формируя таким образом элементы, из которых состоит, например, комната отдыха экипажа;
 - *кухни с тележками* — можно задавать размеры тележек и кухни, зазоры между тележками, и кухни, число тележек, что позволяет построить эти элементы компоновки;
 - *туалеты трёх типов* — можно задавать размеры в зависимости от типа туалета.
- В качестве примера на рис. 2 показан интерфейс для задания размеров кресел трёх классов,

а на рис. 3 приведены трёхмерные математические модели кресел первого, бизнес- и туристического класса, контейнеров LD-1 и LD-3, кухни с тележками, трёх типов туалетов, двухъярусной спальни, гардероба и лифта, созданные программой в соответствии с заданными размерами. Помимо этих элементов компоновки, в базе данных АВТОКОМ содержатся электронные макеты:

- кабин пилотов, пассажирских и грузовых палуб фюзеляжей-прототипов;
- внешних обводов фюзеляжей самолётов-прототипов;
- объектов, перевозимых грузовыми самолётами (автомобилей, техники, и т.д.).

На втором этапе формируется поперечное сечение регулярной части фюзеляжа. Этот процесс включает в себя определение обводов сечения фюзеляжа и поперечных размеров пассажирских и грузовых палуб. Выбранные размеры и обводы должны обеспечить возможность размещения блоков кресел на пассажирских палубах, необходимых свободных зон вокруг голов пассажиров, сидящих в креслах у борта фюзеляжа, продольных проходов заданной высоты и ширины, а также контейнеров на грузовых палубах. Как правило, поперечное сечение фюзеляжа

Параметрические модели кресел

Тип кресла	A, м	B, м	C, м	D, м	E, м	F, м	G, м	H, м	I, м	J, м	K, м	L, м	M, м	N, м	O, м	P, м	Q, м	R, м	S, м	T, м	U, м
Первый класс	0,105	0,42	0,35	0,514	0,486	0,247	0,105	0,173	0,514	0,437	0,048	0,154	0,742	0,03	0,238	0,158	0,198	0,158	0,02	0,48	0,48
Бизнес-класс	0,072	0,422	0,327	0,529	0,422	0,252	0,072	0,169	0,529	0,459	0,045	0,106	0,755	0,03	0,242	0,161	0,202	0,161			
Туристический	0,048	0,454	0,324	0,463	0,518	0,2	0,048	0,105	0,463	0,385	0,041	0,105	0,773	0,03	0,24	0,16	0,25	0,2			

Ширина блока кресел, мм

Масса блока кресел, кг

Класс	Ширина блока кресел, мм					Масса блока кресел, кг				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Первый класс	0,724	1,448								
Бизнес-класс	0,673	1,346	2,019							
Туристический	0,559	1,067	1,575	2,083						
Число кресел в блоке	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Кресло первого класса

Кресло бизнес-класса

Кресло туристического класса

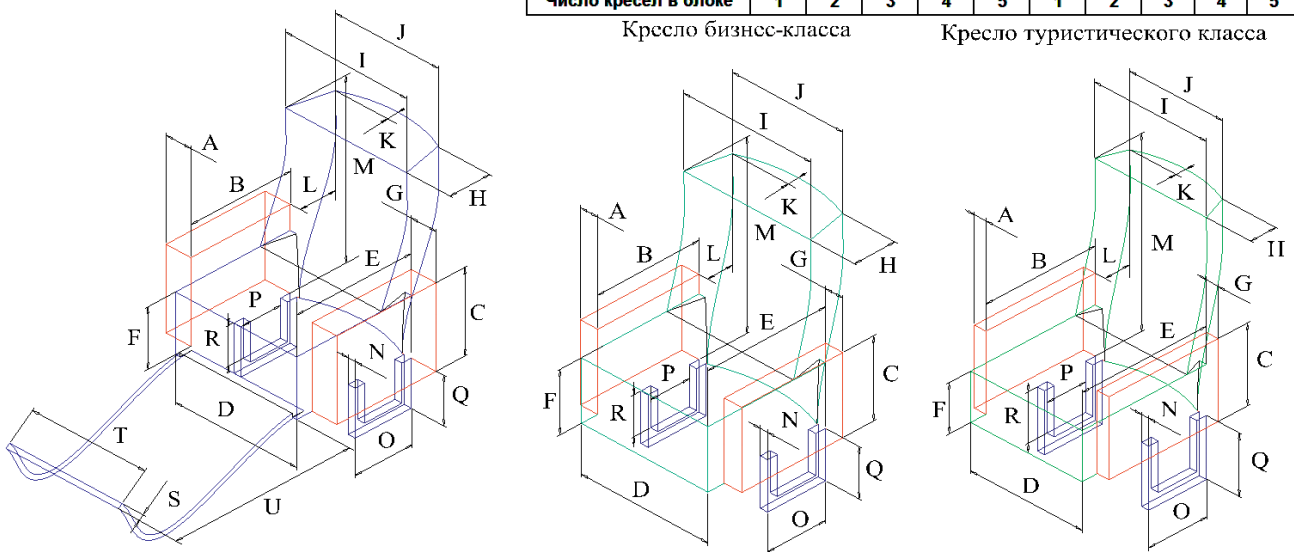


Рис. 2. Интерфейс задания размеров кресел трёх классов

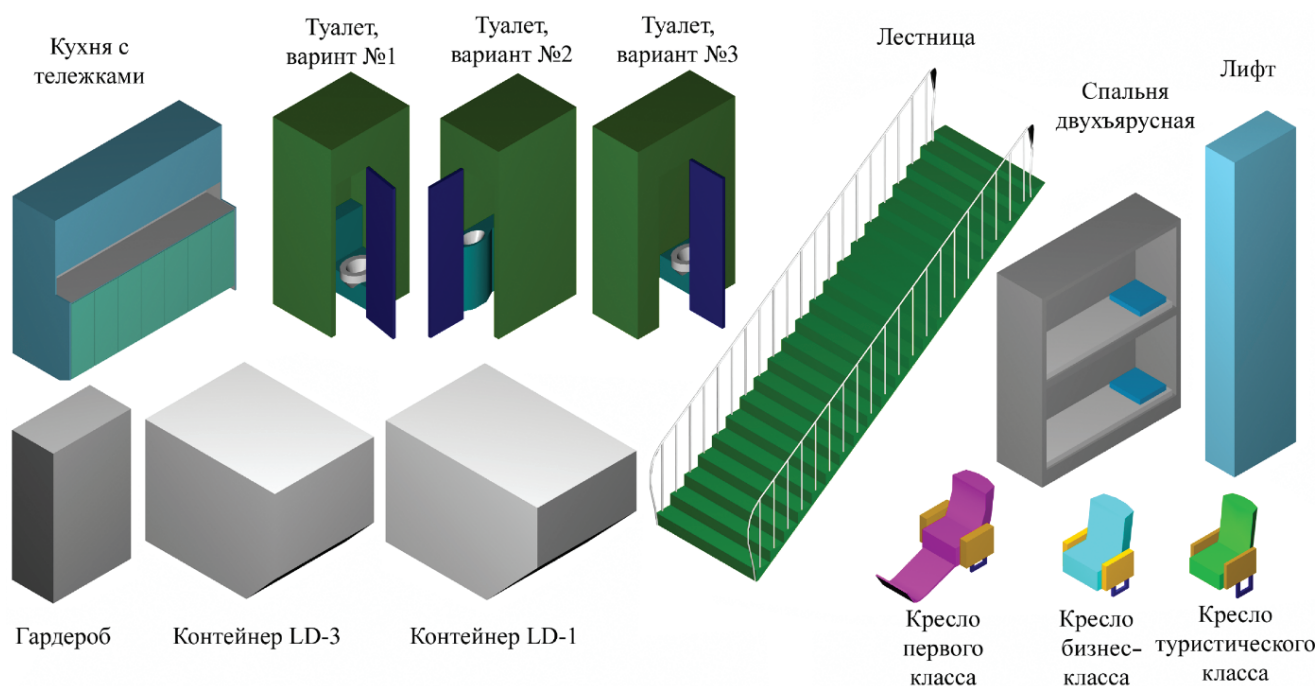


Рис. 3. Типовые элементы компоновки, сформированные с помощью АВТОКОМ

выбирается исходя из условия компоновки салона экономического класса, однако не исключается возможность решения данной компоновочной задачи под условия размещения салона первого или бизнес-класса.

Алгоритм программы предусматривает возможность размещения внутри фюзеляжа одной или двух пассажирских палуб и одной грузовой палубы. Предполагается, что на пассажирских палубах число блоков кресел может достигать четырёх, а число продольных проходов в салоне — от одного до трёх. Задаются число кресел в блоке, число рядов и ширина проходов. На грузовой палубе могут находиться контейнеры различных типов. Число контейнеров в ряду может быть от одного до трёх. Можно задавать типы контейнеров, число рядов, угол поворота контейнеров в поперечном сечении и зазор между контейнерами для каждого отсека. Поперечное сечение фюзеляжа может быть образовано одной окружностью или дугами двух окружностей с различными вариантами сопряжений (выпуклыми или вогнутыми скруглениями или спрямлениями). Для выбора формы поперечного сечения полезна информация о геометрических параметрах фюзеляжей самолётов-прототипов близкой вместимости. Поэтому в системе предусмотрена возможность просмотра соответствующих чертежей базы данных.

Размеры поперечного сечения фюзеляжа могут полностью соответствовать выбранному прототипу. Однако часто расчетный вариант компоновки в каких-либо элементах отличается от существующих прототипов. Например, могут отличаться габариты кресел или продольных проходов либо тип грузовых контейнеров. В таких случаях можно вручную вносить коррекцию в параметры, определяющие поперечное сечение (задать начальное приближение), а затем провести процедуру оптимизации, в процессе которой находится поперечное сечение минимальной площади или периметра. Для круглого фюзеляжа (поперечное сечение образовано одной окружностью) существует аналитическое решение, которое позволяет определить минимальный радиус при выполнении всех ограничений. В общем случае, когда форма поперечного сечения может состоять из нескольких окружностей и сопряжений, увеличивается число неизвестных параметров и задача оптимизации решается численно. Для нахождения минимумов площадь и периметр выражаются как функции радиусов и координат образующих сечение окружностей и сопряжений. Далее на эти функции накладываются ограничения, обусловленные элементами компоновки, которые необходимо разместить в сечении. Для нахождения минимума функции

многих переменных с учётом ограничений используется метод множителей Лагранжа [27, 28].

В качестве примера на рис. 4 приведены варианты компоновки поперечного сечения регулярной части фюзеляжа магистрального самолёта вместимостью 150 пассажиров, сформированные с помощью АВТОКОМ.

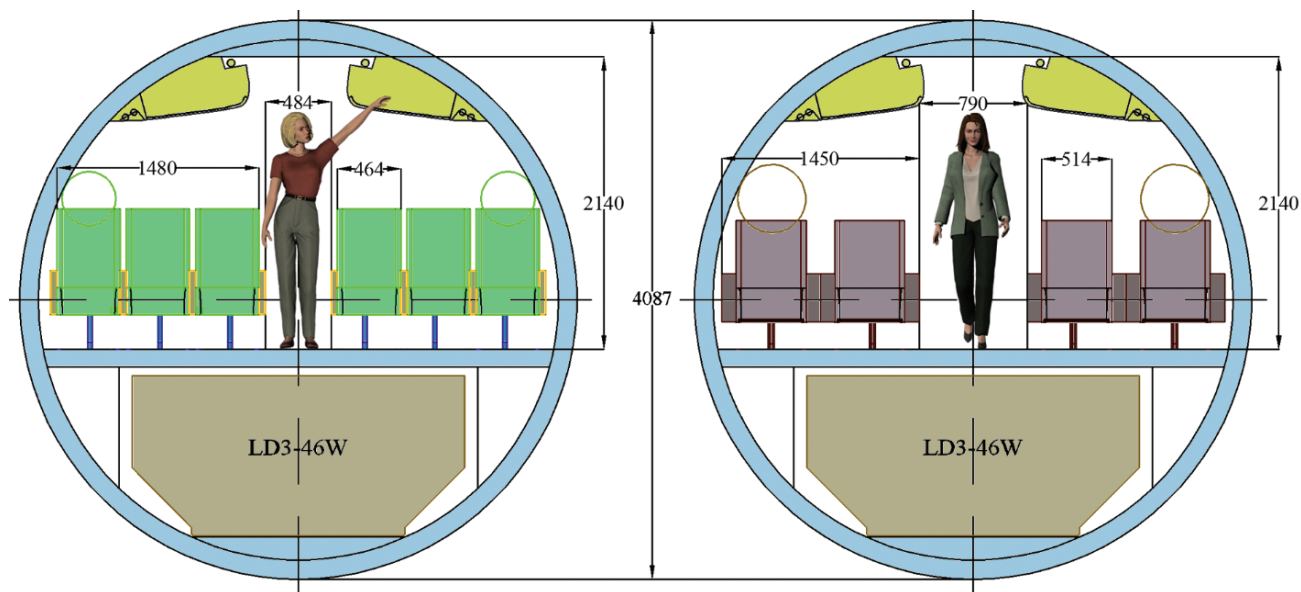


Рис. 4. Варианты компоновки поперечного сечения регулярной части фюзеляжа магистрального самолёта, сформированные с помощью АВТОКОМ

На третьем этапе проводится компоновка пассажирских и грузовых палуб. Для этого создан модуль по расстановке типовых элементов компоновки. Предполагается, что на пассажирских палубах может находиться до двух салонов первого класса, до трех салонов бизнес-класса и до пяти салонов туристического класса. В таблице интерфейса задаются шаг кресел и координата первого ряда в салоне, а также координаты аварийных выходов. Компоновка служебно-бытовых помещений проводится также посредством задания координат соответствующих элементов и углов поворота. Таким образом, задание координат элементов и просмотр на экране соответствующей компоновки позволяет в интерактивном режиме завершить процесс расстановки таких элементов, как туалеты, кухни, гардеробы и т.д. Часто в компоновке пассажирской кабины можно выделить зоны (вокруг эксплуатационных дверей, между салонами, носовое и хвостовое пространство кабины), в которых сосредоточены основные служебно-бытовые помещения. При компоновке служебно-бытовых помещений должны соблюдаться некоторые правила обеспе-

чения функциональной совместимости элементов и безопасной эксплуатации. Универсальным критерием эффективности компоновочных решений является потребная площадь пола для расстановки заданных элементов.

На грузовой палубе может находиться до двух отсеков контейнеров. Можно задавать шаг кон-

тейнеров и координату первого ряда для каждого отсека.

Для облегчения компоновки суживающихся частей (носовая и хвостовая части кабины) предусмотрен алгоритм расстановки элементов, например пассажирских кресел вдоль заданной кривой, которая определяет степень сужения кабины. В результате работы модуля формируется трёхмерная геометрическая модель пассажирской и грузовой кабин.

На четвертом этапе формируется параметрическая модель обводов фюзеляжа. Обводы строятся на основании поперечных сечений фюзеляжа. Поперечное сечение регулярной части сформировано на втором этапе, а форма и положение поперечных сечений сужающихся частей фюзеляжа определяются с использованием трёх проекций общего вида, полученных из АРДИС. В общем случае сечения сужающихся частей могут быть образованы различными кривыми (окружностями, эллипсами, сплайнами и т.д.), а также их комбинациями, например верхняя часть сечения — сплайн, заданный контрольными точками, а нижняя — дуга эллипса. Исходя из этого,

создан модуль, строящий обводы носовой и хвостовой частей по произвольному числу контрольных сплайновых сечений, каждое из которых может иметь произвольное число контрольных точек. Полученные таким образом обводы могут затем видоизменяться с помощью некоторой деформации поперечных сечений, составляющих каркас фюзеляжа. Основными критериями, характеризующими правильность обводов фюзеляжа, являются показатели гладкости поверхности, смачиваемая площадь фюзеляжа и минимально допустимые зазоры между хвостовой частью и поверхностью взлетно-посадочной полосы (ВПП) при взлётно-посадочных углах тангажа.

На пятом этапе созданная модель фюзеляжа используется для формирования трёхмерной поверхностной модели обводов всего ЛА. Несущие элементы ЛА задаются также в каркасном виде с помощью задания в ряде сечений координат точек, определяющих форму профилей крыла и оперения.

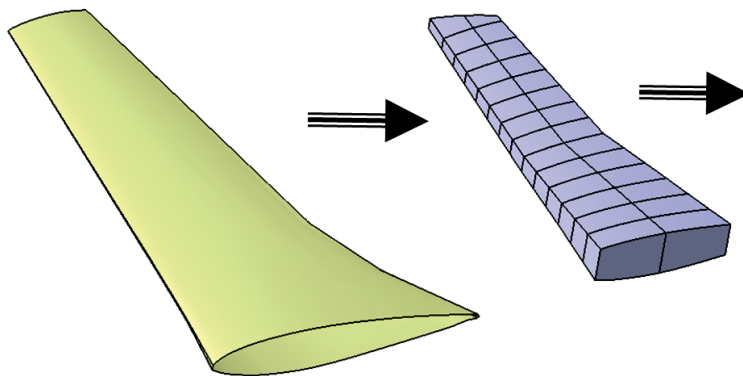
В качестве примера на рис. 5 приведена полученная с помощью АВТОКОМ геометрическая модель внешних обводов и внутренней компо-

новки магистрального самолёта вместимостью 150 пассажиров с силовой установкой (СУ), имеющей дополнительный винтовентилятор, расположенный в хвостовой части фюзеляжа [29].

На шестом этапе, после формирования компоновки и внешних обводов ЛА, соответствующий модуль АВТОКОМ проводит расчет центра масс элементов, из которых состоит компоновка. Результаты расчета представляются в виде таблиц, в которые занесены координаты центров масс каждого элемента компоновки, и внизу каждой таблицы указываются массы и координаты центра масс данной группы элементов. Далее по модели крыла определяется размещение топливных баков, строятся трёхмерные модели баков и проводится расчет объемов, масс и центров масс отсеков бака, заполненных топливом (рис. 6). Таким образом, с учётом данных о массах элементов конструкции, оборудования и снаряжения, силовой установки, коммерческой нагрузки, топлива, полученных из модуля весового расчета АРДИС, формируется объёмно-массовая модель ЛА.



Рис. 5. Полученная с помощью АВТОКОМ геометрия внешних обводов и внутренней компоновки магистрального самолёта



Топливные баки в крыле (одна консоль)					
№ бака	V, м³	G, кг	X, м	Y, м	Z, м
5	10,03968	8,031744	21,9435	1,05885	15,9966
6	9,70677	7,765416	25,7149	0,934292	15,9973
7	8,08245	6,46596	23,1578	1,04103	18,0156
8	7,893783	6,315026	26,6164	0,886237	18,0186
9	6,673518	5,338814	24,3609	1,03785	20,0125
10	6,647166	5,317733	27,5148	0,86917	20,0161
11	5,224374	4,179499	25,5436	1,03571	21,9756
12	5,325624	4,260499	28,3985	0,854396	21,9796
13	4,649256	3,719405	26,83	1,0315	23,961
14	4,808403	3,846722	29,4815	0,848148	23,9612
15	4,272957	3,418366	28,2159	1,03141	25,9599
16	4,431978	3,545582	30,7686	0,851292	25,9607
17	3,914892	3,131914	29,604	1,02874	27,96
18	4,070979	3,256783	32,0558	0,85377	27,96
19	3,576618	2,861294	30,9929	1,02606	29,959
20	3,72393	2,979144	33,3429	0,856309	29,9594
21	3,253842	2,603074	32,3808	1,02307	31,9585
22	3,397905	2,718324	34,6302	0,858656	31,9591
		Сумма	Хцм		
		79,7553	27,3358		

Рис. 6. Автоматизация получения данных по распределению массовых нагрузок

На седьмом этапе проводится визуализация результатов исследований. Помимо традиционного вывода компоновки на монитор или бумагу, в АВТОКОМ обеспечена возможность создания динамического стереоскопического изображения с использованием:

1) шлема виртуальной реальности, который создает имитацию входа разработчика в изготовленный в натуральную величину макет компоновки и позволяет:

- быстро вносить изменения в виртуальную модель, замечая недостатки, которые не бросаются в глаза при традиционной визуализации;

- в наглядном виде показать заказчику, что компоновочные требования выполнены, и проиллюстрировать достигнутый уровень комфорта;

- побывать в роли пассажира, покидающего самолёт в случае аварийной посадки; в роли техника проверить доступность агрегатов при техническом обслуживании; в роли члена экипажа обеспечивать эвакуацию пассажиров и т.д.;

2) стереочков с проектором или большим монитором, что позволяет одновременно нескольким специалистам видеть качественное стереоскопическое изображение компоновки на экране и совместно генерировать идеи, реализуя их с помощью АВТОКОМ;

3) двухмониторной зеркальной стереосистемы, дающей проектанту возможность работать в стереоскопическом режиме, не теряя при этом качества визуализации по сравнению с плоским одномониторным изображением;

4) 3D-принтера, печатающего объёмные макеты компоновок для демонстрации и коллективного обсуждения.

На восьмом этапе формируются выходные данные для последующих расчетов. Модели пе-

реводятся в универсальные форматы (step, iges). При необходимости проводится рендер характерных видов, разрезов, сечений (формат tiff). Сформированные данные используются в качестве начального приближения в процессе оптимизации внешних обводов, построенной на решении аэродинамической задачи обтекания потоком поверхности; для формирования конечно-элементной модели конструкции с определением рациональной КСС, и т. д.

Примеры практического применения АВТОКОМ

Система АВТОКОМ нашла практическое применение в целом ряде работ по формированию облика перспективных пассажирских самолётов [30–34].

Пример 1. По контракту с фирмой Daimler Chrysler Aerospace проведено проектно-компоновочное исследование влияния на технико-экономические показатели магистральных пассажирских самолётов вместимости в диапазоне от 200 до 1400 мест [31]. Исследования проводились для двух типов самолётов: средних магистральный (СМС) и дальних магистральных (ДМС).

Для решения поставленной задачи сформированы компоновки самолётов вместимостью 200, 400, 600, 800, 1000 и 1400 пассажиров. В результате были получены: внешние геометрические обводы компоновки пассажирских салонов и грузовых отсеков фюзеляжей с элементами оборудования и интерьера с заданной номенклатурой служебно-бытового и грузового оборудования; объёмные компоновки шасси и топливных баков. На рис. 7 приведён пример трёхклассной компоновки ДМС на 1400 пассажиров.

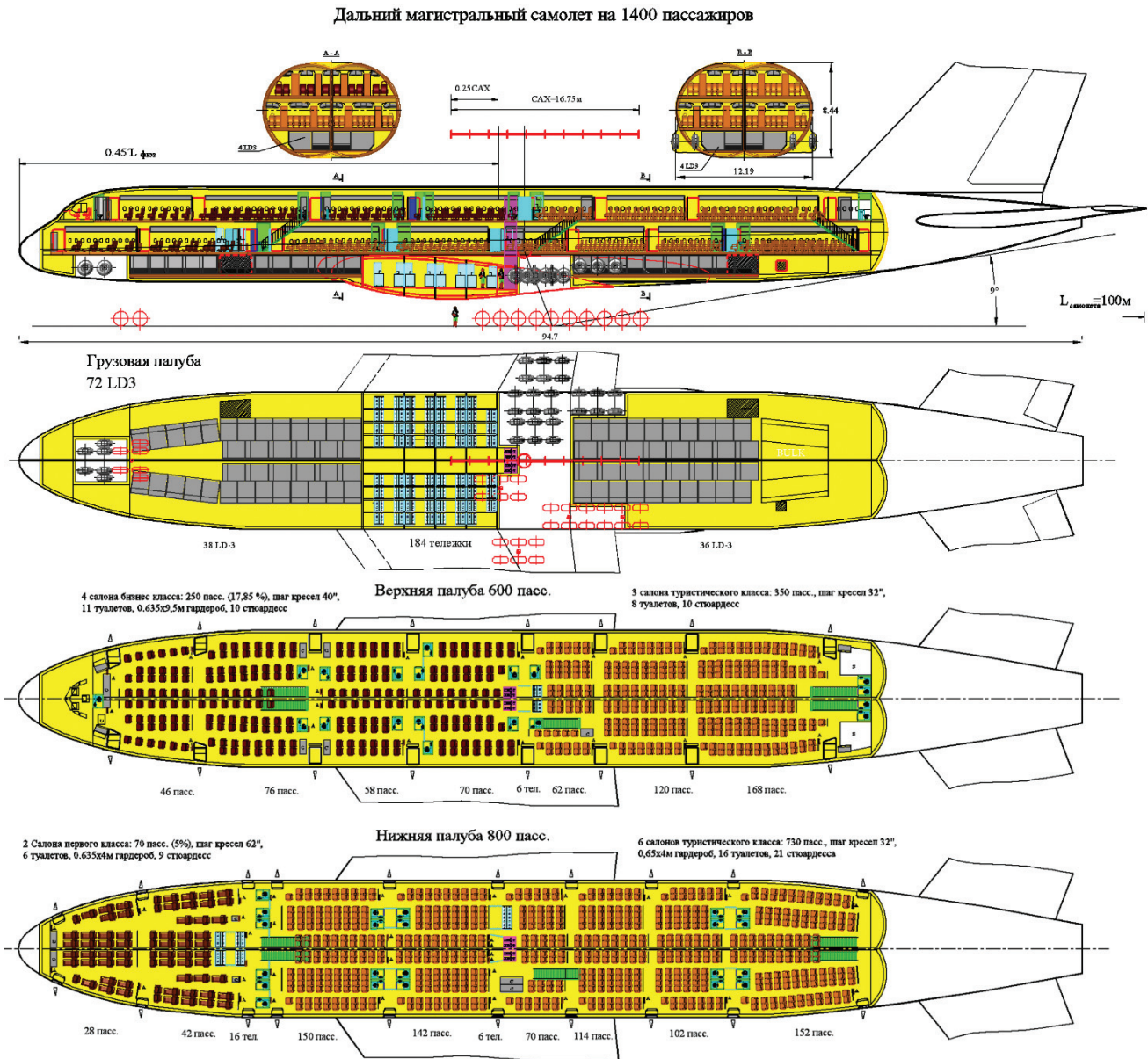


Рис. 7. Полученная с помощью АВТОКОМ геометрическая модель компоновки грузовых и пассажирских отсеков фюзеляжа

Показано следующее:

- требования АП-25 во всех рассмотренных проектах самолётов выполняются без снижения уровня безопасности и комфорта пассажиров;
- наилучшими техническими показателями обладают самолёты с вместимостью 600—800 пассажиров, так как при такой вместимости достигаются наименьшие значения расхода топлива на пассажирокилометр перевозок и наименьшая масса снаряженного самолёта, приходящаяся на одно пассажирское кресло;
- увеличение пассажировместимости с 200 до 600 пассажиров приводит к снижению прямых эксплуатационных расходов (ПЭР) ДМС пример-

но на 15%. Увеличение вместимости свыше 1000 мест не приводит к снижению себестоимости перевозок. Таким образом, рациональные по ПЭР значения вместимости находятся в диапазоне, характерном для самолёта А-380.

Пример 2. В рамках работ по формированию облика ДМС с интегрированной СУ [32] проведен анализ технической реализуемости салонов фюзеляжа для варианта самолёта (рис. 8,а). Наличие высокой центральной части крыла делает невозможным выход на него пассажиров при аварийном покидании и увеличивает минимально возможное расстояние между аварийными

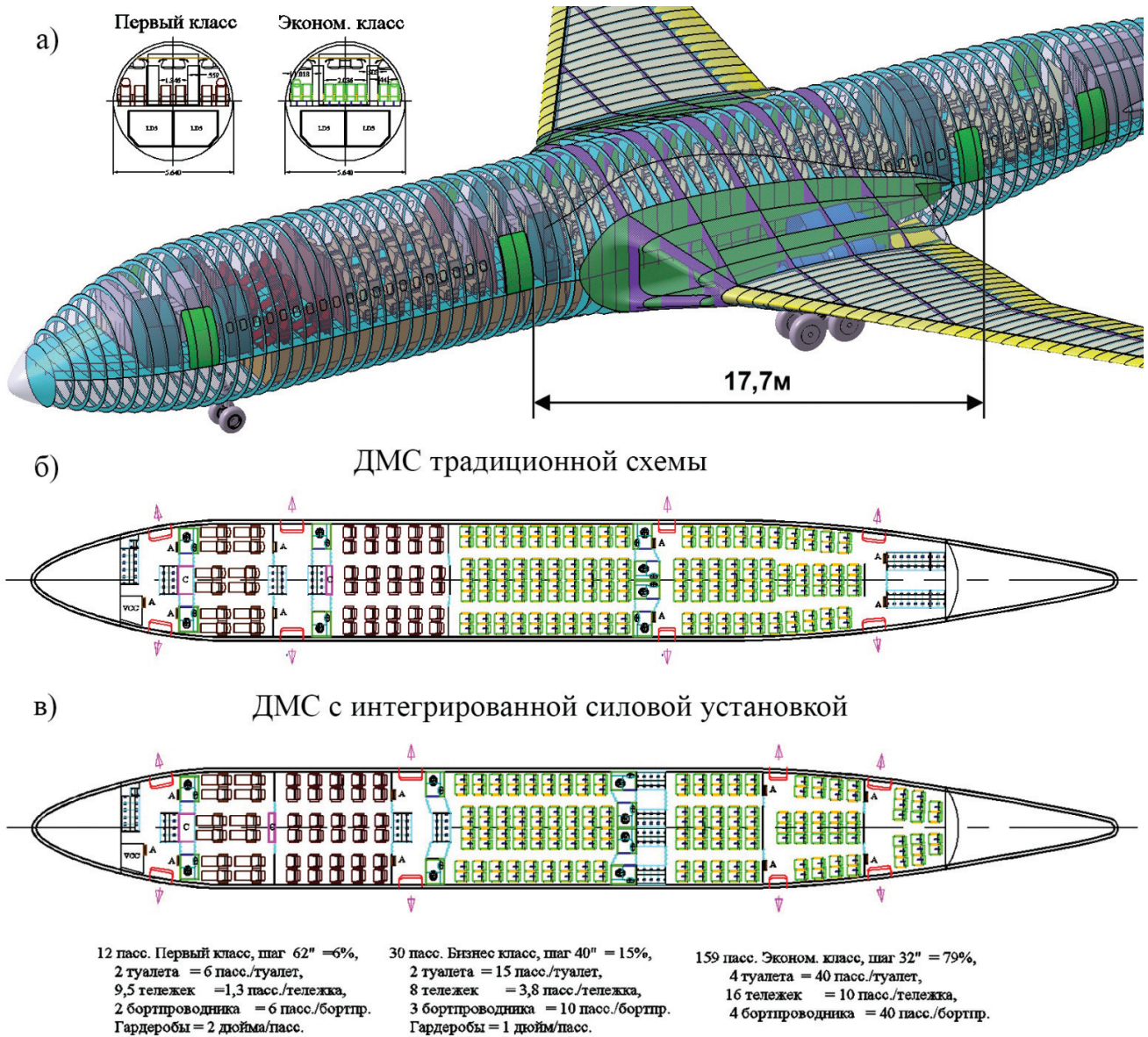


Рис. 8. Особенности крыльевой зоны ДМС с интегрированной СУ и компоновка пассажирской палубы в сравнении с ДМС традиционной схемы

выходами. Показано, что, несмотря на эти особенности, требования АП-25 в компоновках ДМС с интегрированной СУ выполнены (рис. 8, в), и по сравнению с ДМС традиционной схемы (рис. 8, б), ухудшений уровня безопасности и комфорта для пассажиров нет.

Пример 3. Проведены компоновочные исследования ДМС на жидководородном топливе [18]. Рассмотрены варианты фюзеляжа, в котором над пассажирской кабиной установлены два теплоизолированных криогенных топливных бака в виде усечённых конусов (рис. 9). В исходном варианте мидель фюзеляжа совпадал с положением крыла (рис. 9, а). Разработаны компоновки, в которых криогенные баки представляли со-

бой усечённые конусы разной длины, что позволило сдвинуть мидель фюзеляжа вперёд, улучшив распределение площадей эквивалентного тела вращения, с минимальным волновым сопротивлением (рис. 9, б).

Пример 4. Исследованы компоновочные схемы воздушно-космического самолёта (ВКС) [33] вместимостью 5–7 пассажиров с круговым поперечным сечением регулярной части фюзеляжа. Сформированы трёхмерные компоновки вариантов гермокабины, топливных отсеков и внешних обводов ВКС (рис. 10).

Показано, что внешний и внутренний обводы фюзеляжа позволяют при выполнении требований теплозащиты кабины, эргономики и безо-

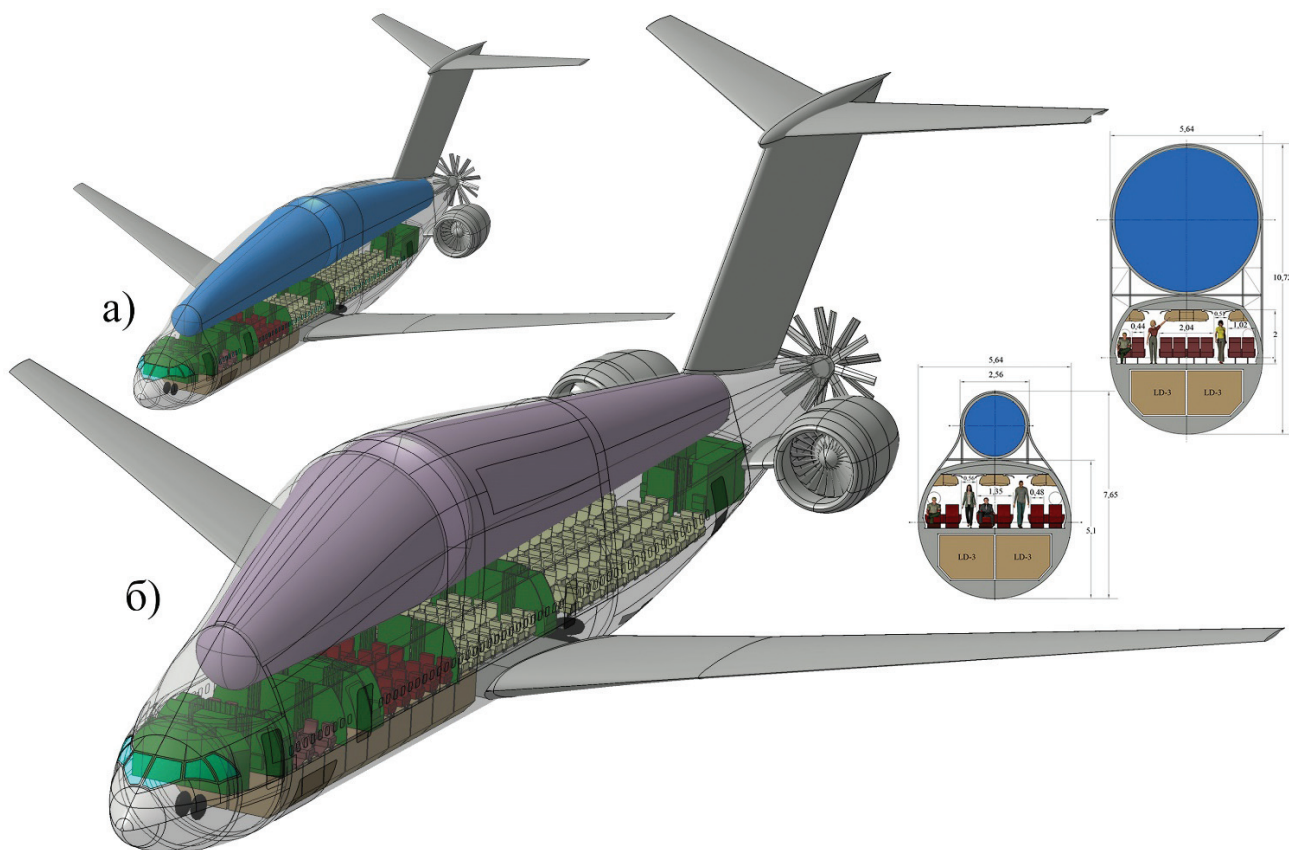


Рис. 9. Компонки фюзеляжа для вариантов ДМС с верхними баками для водородного топлива

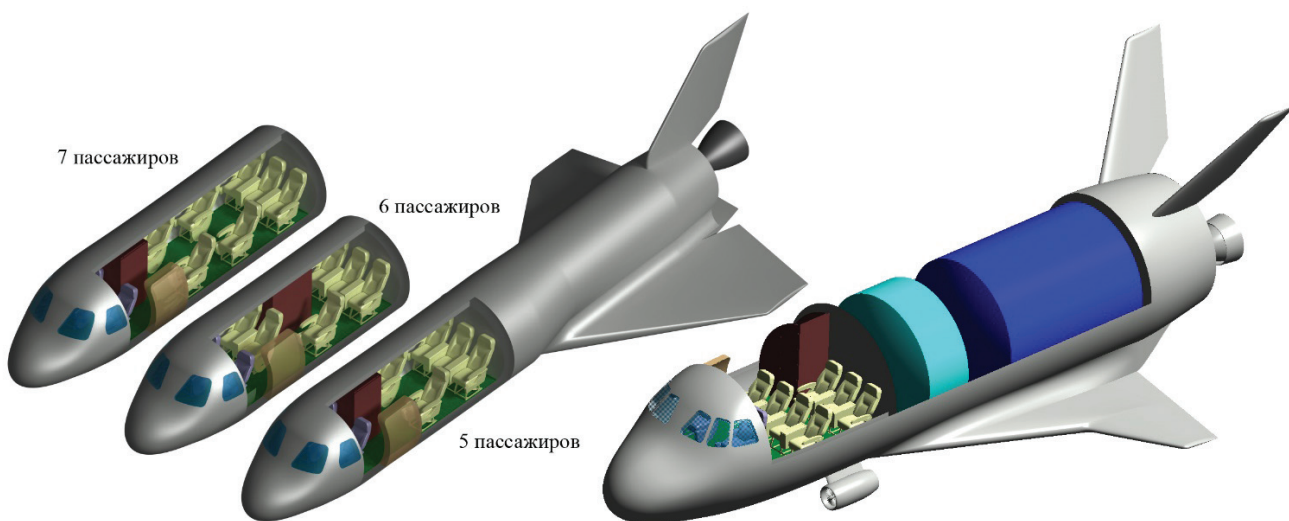


Рис. 10. Компонки кабин вариантов ВКС на 5-7 пассажиров

пасности пассажиров обеспечить высоту салона, ширину прохода и установку кресел, по уровню комфорта соответствующие салонам туристического класса ДМС, т.е. обеспечить более высокий уровень комфорта по сравнению с аналогичными зарубежными проектами.

Выводы

Разработана итерационная технология формирования геометрической модели ЛА, на базе которой проводятся дальнейшие исследования в областях аэродинамической компоновки, прочности конструкции и системы управления ЛА. В результате формируется математическая модель

ЛА, отвечающая компоновочным требованиям и многочисленным физическим критериям.

Сформирована методика визуализации и передачи выходных данных для многодисциплинарных расчётов ЛА.

Созданная технология нашла практическое применение в ЦАГИ в целом ряде работ по формированию облика перспективных ЛА. В частности, в статье приведены:

- компоновочные исследования СМС и ДМС с различной пассажироместимостью;
- формирование облика концепции ДМС с интегрированной силовой установкой;
- компоновка фюзеляжа для вариантов ДМС на жидководородном топливе;
- исследование компоновочных схем ВКС.

В результате сформированы: компоновки пассажирских салонов и грузовых отсеков фюзеляжей с элементами оборудования и интерьера с заданной номенклатурой служебно-бытового и грузового оборудования; объёмные компоновки шасси и топливных баков; внешние геометрические обводы ЛА.

Показано, что требования АП-25 во всех рассмотренных проектах самолетов выполняются без ухудшения уровня безопасности и комфорта пассажиров.

Список источников

1. *Егер С.М.* Проектирование пассажирских реактивных самолётов. — М.: Машиностроение, 1964. — 452 с.
2. *Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисейцев Н.К.* и др. Проектирование самолётов. — М.: Машиностроение, 1983. — 616 с.
3. *Торенбик Э.* Проектирование дозвуковых самолётов / Пер. с англ. Е.П. Голубкова. — М.: Машиностроение, 1983. — 648 с.
4. *Лазарев В.В.* Концептуальное проектирование самолета (магистральные пассажирские самолеты): Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 2013. — 98 с.
5. *Лазарев В.В.* Авиационная эргономика: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 2017. — 120 с.
6. *Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С.* Основы автоматизированного проектирования самолётов. — М.: Машиностроение, 1986. — 232 с.
7. *Мальчевский В.В.* Компоновка и центровка самолета // Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-21. Самолёты и вертолеты. Кн. 2. Проектирование, конструкции и системы самолетов и вертолетов. М.: Машиностроение, 2004. С. 199-225.
8. Приложения САТИА для проектирования и оптимизации, разработки и системного проектирования, <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/catia/>
9. NX от Siemens — интегрированное решение для проектирования, численного моделирования и производства, которые позволяют компаниям максимально использовать потенциал цифровых двойников, <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/>
10. Creo — это 3D-САПР-решение, которое помогает ускорить внедрение инноваций в продукцию, <https://www.ptc.com/en/products/creo>
11. Отраслевой стандарт в конфигурации интерьера самолета и салона, <https://pace.txtgroup.com/products/product-configuration/mycabin/>
12. Институт аэрокосмической промышленности. Предварительное проектирование самолета с помощью компьютера, https://www.luftbau.tu-berlin.de/menue/forschung/abgeschlossene_projekte/visual_capda/
13. *Seeckt K.* Aircraft Preliminary Sizing with PreSTo. Re-Design of the Boeing B777-200LR. — Department of Aeronautics, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH, Royal Institute of Technology), Stockholm, Sweden, 2008. — 76 s.
14. *Schnauffer P.* Multidisziplinärer Datenfluss im Entwicklungsprozess des Flugzeugbaus am Beispiel eines Senkrechtstarters. — Dissertation, Universität Stuttgart, 2006. — 144 s.
15. *Nița M., Scholz D.* Process chain analysis and tools for cabin design and redesign activities // 27th International Congress of the Aeronautical Sciences ICAS'2010 (9—24 September 2010; Nice, France).
16. *Сонин О.В.* Автоматизированная система трёхмерной компоновки фюзеляжа пассажирского самолёта (АВТОКОМ). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010611470, 19.02.2010.
17. *Сонин О.В.* Автоматизированная система трёхмерной компоновки пассажирских самолётов // Современные проблемы аэрокосмической науки и техники: Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов. М.: Изд-во ЦАГИ, 2000. С. 268.
18. *Чернышев С.Л.* (науч. ред.). Форсайт развития авиационной науки и технологий до 2030 года и на дальнейшую перспективу. Программный комплекс автоматизированной компоновки. — М.: Изд-во ЦАГИ, 2014. — 280 с.
19. Межгосударственный авиационный комитет. Авиационные Правила. Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. — 6-е изд. с поправками 1-9. — М.: Авиаздат, 2020. — 328 с.
20. *Денисов В.Е.* Методы автоматизации предварительного проектирования магистральных самолётов // Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-21. Самолёты и вертолеты. Книга 1. Аэродинамика, динамика полета и прочность. М.: Машиностроение, 2002. С. 756-772.

21. Шкадов Л.М., Илларионов В.Ф. Перспективы развития летательных аппаратов. Разработка систем автоматизации проектирования (САПР) // ЦАГИ — основные этапы научной деятельности 1968–1993: Обзор. М: Физматлит, 1996. С. 269–284.
22. Денисов В.Е., Скворцов Е.Б., Уджуху А.Ю., Чернавских Ю.Н. Исследования по формированию облика перспективных пассажирских и транспортных самолётов // ЦАГИ — основные этапы научной деятельности 1993–2003: Сборник. М: Физматлит, 2003. С. 259–265.
23. Денисов В.Е., Каргопольцев В.А., Шкадов Л.М., Уджуху А.Ю. Опыт разработки систем автоматизации предварительного проектирования самолётов и вертолетов // Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники: Сборник. М.: Физматлит, 2005. С. 389–400.
24. Уджуху А.Ю., Евстифеев В.В., Лазарев В.В. и др. Автоматизированная Расчетная Диалоговая Система (АРДИС). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611209, 19.02.2010.
25. Шкадов Л.М., Андронов А.С., Буханова Р.С. и др. Основные принципы построения системы проектирования самолета с использованием ЭВМ // Труды ЦАГИ. Выпуск 2021. М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1979. — 36 с.
26. Шкадов Л.М. Автоматизация проектирования летательного аппарата // Авиация. Энциклопедия / Гл. ред. Г.П. Свищев. М.: Большая российская энциклопедия, ЦАГИ, 1994. С. 36–37.
27. Isaev V.K., Sonin V.V. Survey of the numerical solution techniques for variational problems in rocket flight // Post Apollo Space Explorat., Part 2. Washington, D.C., Amer Astronaut. Soc., 1966, pp. 1147–1171.
28. Isaev V.K., Sonin V.V. Вычислительные аспекты задачи об оптимальном управлении как краевой задачи // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5. № 2. С. 252–261.
29. Уджуху А.Ю., Сонин О.В. Силовая установка с отбором пограничного слоя фюзеляжа. Патент RU 2361779 С1. Бюл. № 20, 20.07.2009.
30. Bolsunovsky A.L., Buzoverya N.P., Gurevich B.I. et al. Flying wing — problems and decisions // Aircraft Design. 2001. Vol. 4. No. 4, pp. 193–219. DOI: 10.1016/S1369-8869(01)00005-2
31. Сонин О.В. Применение автоматизированной системы трёхмерной компоновки при проектировании перспективных самолётов сверхбольшой пассажировместимости // Актуальные проблемы аэрокосмической науки: Сборник тезисов докладов школы-семинара молодых учёных и специалистов. М.: Изд-во ЦАГИ, 2001. С. 68–69.
32. Болсуновский А.Л., Бондарев А.В., Гуревич Б.И., Скворцов Е.Б., Чанов М.Н., Шалашов В.В., Шелехова А.С. Разработка и анализ концепций гражданского самолета, использующих принципы интеграции // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 49–63.
33. Плохих В.П., Бузулук В.И., Уджуху А.Ю. Высокоскоростные летательные аппараты с межконтинентальной и глобальной дальностью полета // Наука и технологии в промышленности. 2012. № 1-1. С. 92–100.
34. Shkadov L.M., Dmitriev V.G., Denisov V.E. et al. The Flying-Wing Concept — Chances and Risks // AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition: the next 100 year (14–17 July 2003; Dayton, Ohio). AIAA 2003-2887.

References

1. Eger S.M. *Proektirovanie passazhirskikh reaktivnykh samoletov* (Passenger jet aircraft designing), Moscow, Mashinostroenie, 1964, 452 p.
2. Eger S.M., Mishin V.F., Liseitsev N.K. et al. *Proektirovanie samoletov* (Aircraft design), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 616 p.
3. Torenbeek E. *Synthesis of subsonic airplane design*. Springer, 1982, 620 p.
4. Lazarev V.V. *Kontseptual'noe proektirovanie samoleta. Magistral'nye passazhirskie samolety* (Conceptual design of aircraft. Mainline passenger aircraft), Moscow, MAI, 2013, 98 p.
5. Lazarev V.V. *Aviatsionnaya ergonomika* (Aviation ergonomics), Moscow, MAI, 2017, 120 p.
6. Eger S.M., Liseitsev N.K., Samoilovich O.S. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya samoletov* (Fundamentals of computer-aided aircraft design), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 232 p.
7. Mal'chevskii V.V. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-21. Samolety i vertolety. Kn. 2. Proektirovanie, konstruktzii i sistemy samoletov i vertoletov*, Moscow, Mashinostroenie, 2004, pp. 199–225.
8. *CATIA applications for design and optimization, development and system design*, <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/catia/>
9. *Siemens NX software is an integrated solution for design, simulation, and manufacturing solutions that enable companies to realize the value of the digital twin*, <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/>
10. *Creo is the 3D CAD solution that helps you accelerate product innovation*, <https://www.ptc.com/en/products/creo>
11. *The industry standard in aircraft and cabin interior configuration*, <https://pace.txtgroup.com/products/product-configuration/mycabin/>
12. *Institut für Luft- und Raumfahrt. Computer Aided Preliminary Design of Aircraft*, https://www.luftbau.tu-berlin.de/menue/forschung/abgeschlossene_projekte/visual_capda/
13. Seeckt K. *Aircraft Preliminary Sizing with PreSTo. Re-Design of the Boeing B777-200LR*. Department of Aeronautics, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH, Royal Institute of Technology), Stockholm, Sweden, 2008, 76 s.

14. Schnauffer P. *Multidisziplinärer Datenfluss im Entwicklungsprozess des Flugzeugbaus am Beispiel eines Senkrechtstarters*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2006, 144 s.
15. Nița M., Scholz D. Process chain analysis and tools for cabin design and redesign activities. *27th International Congress of the Aeronautical Sciences ICAS'2010 (9-24 September 2010; Nice, France)*.
16. Sonin O.V. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programm dlya EVM "Avtomatizirovannaya sistema trekhmernoii komponovki fyuzelyazha passazhirskogo samoleta (AVTOKOM)"*, No. 2010611470, 19.02.2010 (Certificate of state registration of computer programs "Computer-aided system of 3D design of passenger aircraft fuselage (AUTOCOM)", no. 2010611470, 19.02.2010).
17. Sonin O.V. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov "Sovremennye problemy aerokosmicheskoi nauki i tekhniki"*, Moscow, TsAGI, 2000, p. 268.
18. Chernyshev S.L. (ed.) *Forsait razvitiya aviatsionnoi nauki i tekhnologii do 2030 goda i na dal'neishuyu perspektivu. Programmnyi kompleks avtomatizirovannoi komponovki* (Foresight of the aviation science and technology development until 2030 and beyond. Software complex for automated layout), Moscow, TsAGI, 2014, p. 221.
19. *Mezhgosudarstvennyi aviatsionnyi komitet. Aviatsionnye Pravila. Chast' 25. Normy letnoi godnosti samoletov transportnoi kategorii, 6-e izdanie s popravkami 1-9* (Interstate Aviation Committee. Civil Aviation Safety Regulations. Part 25 - Airworthiness standards: transport category airplanes, 6th edition with amendments 1-9), Moscow, Aviaizdat, 2020, 328 p.
20. Denisov V.E. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-21. Samolety i vertolety. Kniga 1. Aerodinamika, dinamika poleta i prochnost'* (Automation methods for preliminary design of mainline aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 2002, pp. 756-772.
21. Shkadov L.M., Illarionov V.F. *TsAGI - osnovnye etapy nauchnoi deyatel'nosti 1968-1993. Obzor* (TsAGI - the main stages of scientific activity in 1968-1993), Moscow, Fizmatlit, 1996, pp. 269-284.
22. Denisov V.E., Skvortsov E.B., Udzhukhu A.Yu., Chernavskikh Yu.N. *TsAGI - osnovnye etapy nauchnoi deyatel'nosti 1993-2003* (TsAGI - the main stages of scientific activity in 1993-2003), Moscow, Fizmatlit, 2003, pp. 259-265.
23. Denisov V.E., Kargopol'tsev V.A Shkadov L.M., Udzhukhu A.Yu. *Problemy sozdaniya perspektivnoi aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki. Sbornik statei*, Moscow, Fizmatlit, 2005, pp. 389-400.
24. Udzhukhu A.Yu., Evstifeev V.V., Lazarev V.V. et al. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programm dlya EVM "Avtomatizirovannaya Raschetnaya Dialogovaya Sistema (ARDIS)"*, No. 2010611209, 19.02.2010 (Certificate of state registration of computer programs "Automated Calculation Dialogue System (ARDIS)", no. 2010611209, 19.02.2010).
25. Shkadov L.M., Andronov A.S., Bukhanova R.S. et al. *Trudy TsAGI*. Vypusk 2021, Moscow, Izdatel'skii otdel TsAGI, 1979, 36 p.
26. Shkadov L.M. *Aviatsiya. Entsiklopediya* (Aviation. Encyclopedia), Moscow, Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya, TsAGI, 1994, pp. 36-37.
27. Isaev V.K., Sonin V.V. Survey of the numerical solution techniques for variation problems in rocket flight. *Post Apollo Space Explorer*, Part 2. Washington, D.C., Amer Astronaut. Soc., 1966, pp. 1147-1171.
28. Isaev V.K., Sonin V.V. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 1965, vol. 5, no. 2, pp. 252-261.
29. Udzhukhu A.Yu., Sonin O.V. *Patent RU 2361779 C1*, 20.07.2009.
30. Bolsunovskii A.L., Buzoverya N.P., Gurevich B.I. et al. Flying wing – problems and decisions. *Aircraft Design*, 2001, vol. 4, no. 4, pp. 193-219. DOI: 10.1016/S1369-8869(01)00005-2
31. Sonin O.V. *Materialy Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov "Aktual'nye problemy aerokosmicheskoi nauki"*, Moscow, TsAGI, 2001, pp. 68-69.
32. Bolsunovskii A.L., Bondarev A.V., Gurevich B.I., Skvortsov E.B., Chanov M.N., Shalashov V.V., Shelekhova A.S. Development and analysis of civil aircraft concepts employing integration principles. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 49-63.
33. Plokhikh V.P., Buzuluk V.I., Udzhukhu A.Yu. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti*, 2012, no. 1-1, pp. 92-100.
34. Shkadov L.M., Dmitriev V.G., Denisov V.E. et al. The Flying-Wing Concept - Chances and Risks. *AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition: the next 100 year (14-17 July 2003; Dayton, Ohio)*. AIAA 2003-2887.

Статья поступила в редакцию 20.05.2021; одобрена после рецензирования 30.05.2022; принята к публикации 30.05.2022.

The article was submitted on 20.05.2021; approved after reviewing on 30.05.2022; accepted for publication on 30.05.2022.