

УДК 001.895:629.7
ББК 65.290-86
JEL C52, O31, L63

Оценка основных потребительских свойств и преимуществ применения многоразовых космических аппаратов

Верховский Игорь Николаевич, старший преподаватель кафедры СМ-1, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 105005.

Гязова Марина Мухарбиевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры 505 «Инновационная экономика, финансы и управление проектами», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), Волоколамское шоссе, 4, Москва, Российская Федерация, 125080.
E-mail: mgyazova@gmail.com.

Закатаев Никита Сергеевич, аспирант кафедры 505 «Инновационная экономика, финансы и управление проектами», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), Волоколамское шоссе, 4, Москва, Российская Федерация, 125080.

Аннотация: В настоящей статье описываются особенности многоразовых возвращаемых аппаратов класса «несущий корпус» при выполнении ими практических задач на низкой околоземной орбите.

В статье приведен анализ состояния разработок многоразовых возвращаемых аппаратов класса «несущий корпус» (ВА НК), рассмотрены примеры решения практических задач с использованием ВА НК на низкой околоземной орбите.

Дополнительно рассмотрены основные результаты эксплуатации многоразовых возвращаемых аппаратов типа «капсула» при обеспечении транспортно-технического обслуживания Международной космической станции (МКС) на примере грузовозвращающего корабля Dragon.

Рассмотрены области применения возвращаемых аппаратов типа ВА НК, проведена оценка основных потребительских свойств, которым должен удовлетворять перспективный многоцелевой возвращаемый аппарат.

Ключевые слова: космический аппарат, эффективность, полезная нагрузка, длительность цикла, стоимость разработки, конструктивные особенности возвращаемых аппаратов.

Assessment of the main consumer properties and advantages of using reusable spacecraft

Igor N. Verkhovsky, Senior Lecturer of the Department of SM-1, Moscow State Technical University named after N.E.Bauman, 2nd Baumanskaya St., D. 5, bldg. 1, Moscow, Russian Federation, 105005.

Marina M. Gyazova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of Department 505 "Innovative Economics, Finance and Project Management", Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), Volokolamskoe shosse, 4, Moscow, Russian Federation, 125080

Nikita S. Zakataev, postgraduate student of department 505 "Innovative economics, finance and project management", Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), Volokolamskoe shosse, 4, Moscow, Russian Federation, 125080.
2nd Baumanskaya St., D. 5, bldg. 1, Moscow, Russian Federation, 105005.

Abstract: This article describes the features of reusable reusable vehicles of the "load-

bearing body" class when they perform practical tasks in low-earth orbit.

The article provides an analysis of the state of development of reusable vehicles of the "carrying body" class (VA NK), considered examples of solving practical problems using the VA NK in low Earth orbit.

In addition, the main results of the operation of reusable capsule-type reusable vehicles in the provision of transport and maintenance services to the International Space Station (ISS) are considered on the example of the Dragon cargo return vehicle.

The fields of application of the reentry vehicles of the VA NK type are considered, the assessment of the main consumer properties that the promising multipurpose reentry vehicle must satisfy is carried out.

Key words: spacecraft, efficiency, payload, cycle time, development cost, design features of reentry vehicles.

Материалы и методы. При разработке статьи были использованы материалы, опубликованные в открытых источниках информации.

При разработке статьи учитывались современные тенденции в мировой ракетно-космической промышленности. В частности, на сегодняшний день достигнуто 9-кратное успешное использование ракетных блоков I ступени ракеты-носителя Falcon 9. Суммарно осуществлено уже более 60 успешных посадок ракетных блоков данного класса, что положительным образом повлияло на повышение экономической эффективности коммерческого ракетно-космического комплекса в составе ракеты-носителя Falcon 9 и грузовозвращающих кораблей Dragon.

Оценка экономической эффективности коммерческого ракетно-космического комплекса в состав, которого входят многоразовый ракетный блок I ступени и многоразовая полезная нагрузка (возвращаемый аппарат типа ВА НК) логически неразрывна с оценкой состояния Мирового космического рынка (МКР).

Основные характеристики возвращаемых аппаратов

Возвращаемый аппарат класса «несущий корпус» предназначен для решения следующих задач:

- доставка на низкую околоземную орбиту и возвращение на Землю полезных грузов;
- проведение инспекций космических аппаратов на орбите;
- обслуживание космических аппаратов на орбите;
- наблюдение за земной поверхностью с высокой точностью;
- поддержка пилотируемых миссий на низкой околоземной орбите (НОО).

Общий вид и основные геометрические размеры возвращаемого аппарата класса «несущий корпус» показаны на рисунке 1.

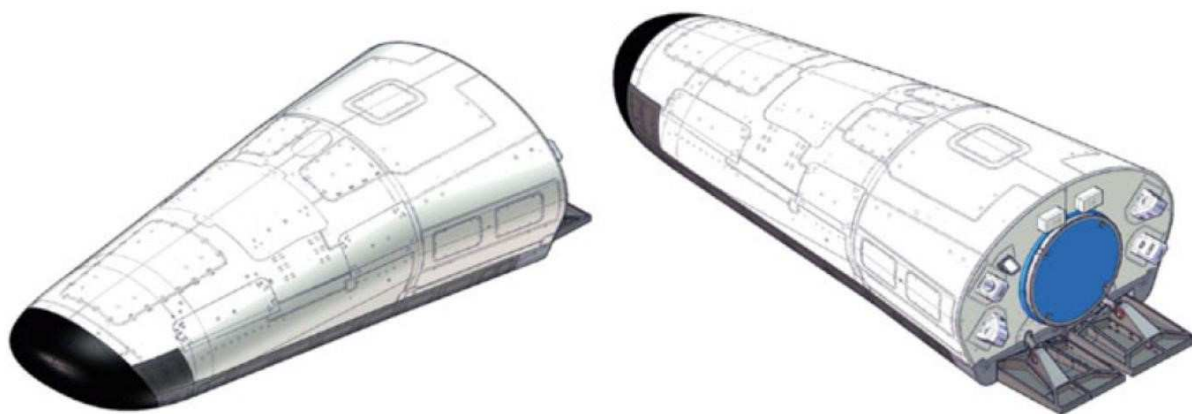


Рис. 1 – Общий вид возвращаемого аппарата (на примере аппарата IXV)¹

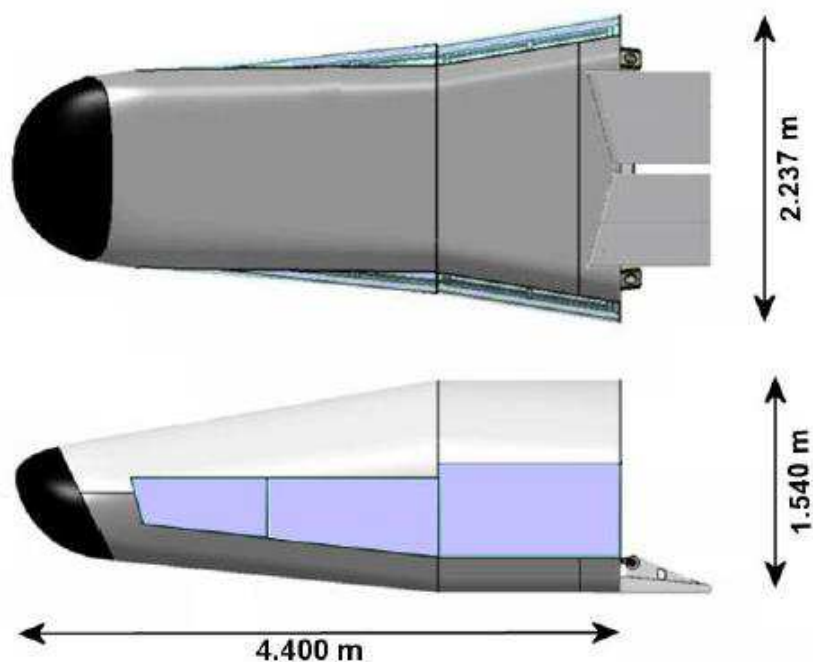


Рис. 2 – Основные геометрические размеры возвращаемого аппарата (на примере аппарата IXV)²

Конструкция корпуса возвращаемого аппарата представляет собой монокок из композитных материалов. Выбор в пользу композитной несущей конструкции по сравнению с традиционным силовым набором, состоящим из рам и лонжеронов, был сделан за счет лучших показателей по массе и жесткости конструкции в целом.

Масса конструкции корпуса, изготовленной из алюминиевого сплава, включая фрезерованную заднюю раму из сплава Ti-6Al-4V с учетом допуска, составляет около 550 кг. Экономия «сухой» массы конструкции в пересчете на стартовую массу аппарата составила более 10%.

Общий вид конструкции корпуса, изготовленной из композитных материалов, показан на рисунке 3.



¹ Viviani A, Pezzella G, Aerodynamic and Aerothermodynamic Analysis of Space Mission Vehicles, Springer, 2015, p. 918.

² Rufolo, G. C., Aerodynamic database development of the ESA intermediate experimental vehicle. Acta Astronautica, Vol. 94, No. 1, 2014, pp. 57-72.

Рис. 3 – Конструкция корпуса возвращаемого аппарата³

Конструкция корпуса ВА НК изготовлена из материала carbon fiber reinforced plastics (CFRP), основу матрицы которого составляет высокотемпературная резина. Общий корпус ВА НК в сборе и схема агрегатирования корпуса показаны на рисунке 4.

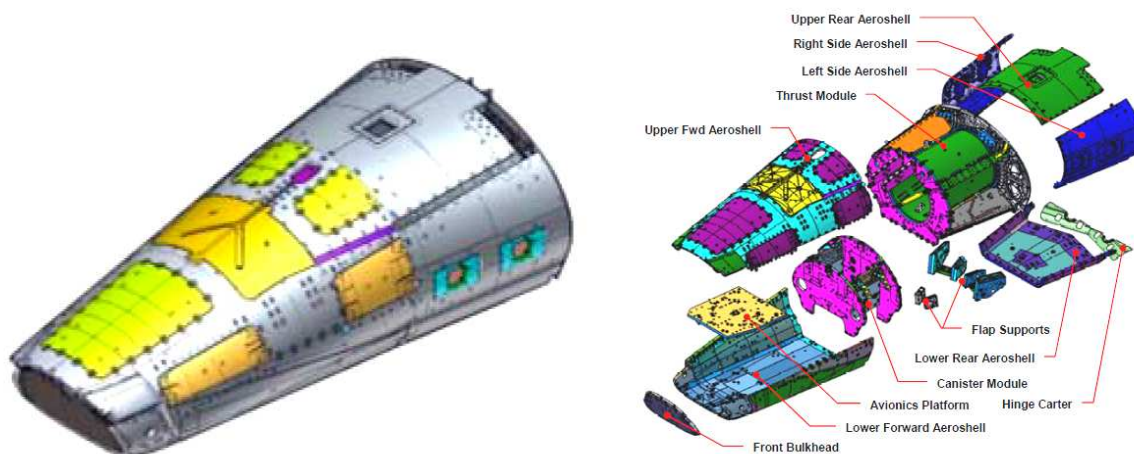


Рис. 4 – Конструкция корпуса ВА НК в сборе⁴

В состав бортовой авионики возвращаемого аппарата входят:

- система электропитания;
- система бортовых измерений;
- радиотехнические средства.

Для управления положением центра масс и вокруг центра масс на возвращаемом аппарате были установлены на кормовой части четыре реактивных двигателя тягой по 400 Н каждый и разрезной балансировочный щиток (БЩ). Для управления положением створок БЩ использовались электромеханические приводы.

В состав комплекса средств посадки аппарата входят две основные системы: парашютная система и система обеспечения остойчивости на плаву (четыре надувные сферические емкости).

В состав парашютной системы входят один сверхзвуковой вытяжной парашют, один сверхзвуковой тормозной парашют, один дозвуковой тормозной парашют и один основной парашют. Ввод парашютной системы в действие начинается на сверхзвуковом участке полета аппарата на высоте 26 км от уровня моря. Масса теплозащитного и теплоизоляционных покрытий аппарата составила (по экспертным оценкам) около 250 кг, или около 14% массы на старте. На наветренной поверхности возвращаемого аппарата было установлено 30 керамических теплозащитных плиток, на которые, в свою очередь, изнутри установлены датчики давления, термосопротивления и датчики перемещений.

При проведении главной сборки возвращаемого аппарата была выполнена следующая последовательность операций: конструкция; реактивная система управления; авионика и кабельная сеть; парашютная система; система обеспечения остойчивости на плаву; экспериментальная аппаратура и оборудование; система управления электромеханическими приводами БЩ; теплозащитное покрытие.

Программа автономных и комплексных испытаний включала в себя: определение массово-центровочных и инерционных характеристик; вибро-прочностные испытания; акустические испытания; тепловакуумные испытания; испытания на герметичность;

³ Structures Together ahead. RUAG Space Zurich. – Switzerland. – P. 5.

⁴ Tumino Giorgio The IXV Development Status and Perspectives. 7th European Workshop on TPS-HS, Noordwijk (NL), 8th April 2013. – P. 4.

юстировка инерциальных измерительных средств и двигателей реактивной системы управления (РСУ); проверка соответствия внешних обводов аппарата теоретическим; испытания системы управления в замкнутом контуре; комплексные испытания.

Начало разработки аппарата Intermediate eXperimental Vehicle (IXV) – первоначальное наименование Pre-X датируется 2002 годом.

11 февраля 2015 года аппарат IXV совершил успешный полет длительностью 101 минута. Аппарат IXV был выведен на расчетную траекторию с максимальной высотой 417 км и наклоном орбиты 5,2 град с помощью европейской ракеты-носителя легкого класса VEGA и через 101 минуту совершил приводнение в расчетной точке акватории Тихого океана.

Общий вид аппарата IXV перед полетом и после посадки показаны на рисунках 5 и 6 соответственно. Возвращаемый аппарат экспонировался на международном авиационном салоне в Ле Бурже в 2015 году и привлек большое внимание со стороны посетителей салона, включая руководителей национальных космических агентств Канады, Китая, России, США и Японии.

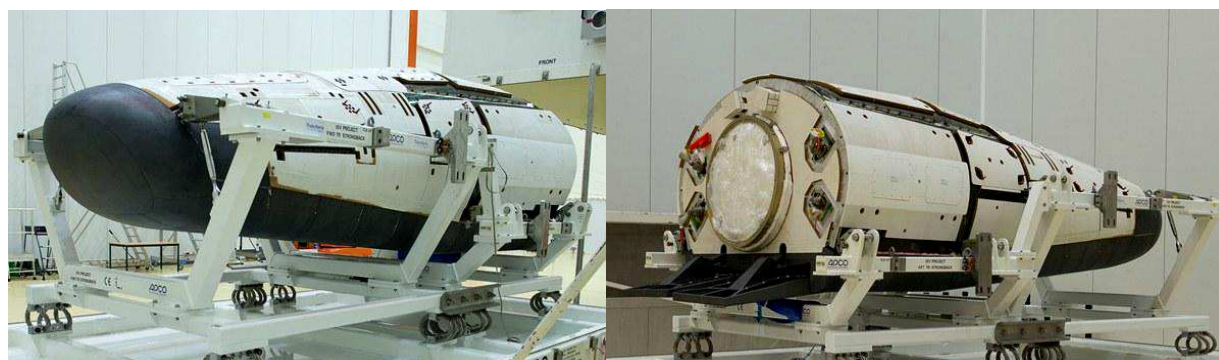


Рис. 5 – Общий вид аппарата IXV перед полетом⁵



Рис. 6 – Общий вид аппарата IXV после полета⁶

Программа миссии IXV была выполнена полностью. После эвакуации с места посадки аппарат IXV был доставлен в компанию Thales Alenia Space для проведения послеполетного анализа.

Стоимость разработки, изготовления макетов, штатного образца, этапа наземной экспериментальной отработки, включая бросковые морские испытания, подготовку к пуску, управление полетом, поисково-спасательные работы и эвакуацию аппарата после посадки

⁵ IXV (Intermediate eXperimental Vehicle). – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/ixv>.

⁶ IXV (Intermediate eXperimental Vehicle). – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/ixv>.

без учета стоимости пуска составила около 150 млн. евро в ценах 2013 года.

В разработке аппарата, подготовке и проведении миссии приняло более 40 ведущих европейских аэрокосмических компаний, научно-исследовательских центров и университетов. В условиях жестких бюджетных ограничений разработчикам вместе с кооперацией удалось достичь реального впечатляющего результата в таком технически сложном аспекте практической аэрокосмической техники как управляемый спуск в атмосфере и точная посадка аппарата класса «несущий корпус».

Основные этапы работ по проекту IXV следующие:

- Определение концептуального облика – 2005-2006 гг.
- Проектирование и защита эскизного проекта – 2007-2009 гг.
- Изготовление и наземная экспериментальная отработка - 2010-2013 гг.
- Интеграция и комплексные испытания – 2013-2014 гг.
- Летные испытания – 11 февраля 2015 г.

Аппарат Intermediate eXperimental Vehicle (IXV) является перспективным демонстрационным возвращаемым аппаратом класса «несущий корпус», предназначенным для отработки ключевых критических технологий и проведения научно-прикладных исследований при осуществлении спуска в атмосфере.

Целями миссии IXV и системного проекта в целом являлись:

- проектирование, разработка, изготовление, сборка, наземная и летная экспериментальная отработка автономного европейского возвращаемого аппарата класса «несущий корпус»;
- интеграция критических технологий для возвращаемых в атмосфере аппаратов на системном уровне.

Среди критических технологий возвращаемого аппарата IXV особое внимание было уделено:

- экспериментальной аэродинамике и аэротермодинамике, включая перспективные измерительные системы и датчики для исследований вопросов аэротермодинамики;
- теплозащитным материалам, включая «горячую» теплозащиту;
- системе управления движением аппарата на всех режимах полета с использованием двигателей реактивной системы управления и аэродинамических органов управления (разрезного балансировочного щитка);
- интеграция технологий на системном уровне для осуществления космического полета.

На базе возвращаемого аппарата IXV разработан новый аппарат Space Rider, летно-конструкторские испытания которого намечены на 2022 год.

В ноябре 2012 года Совет стран-участниц Европейского космического агентства принял решение о начале работ по программе европейского многоразового орбитального демонстрационного аппарата PRIDE (Program for Reusable In-orbit Demonstrator in Europe).

Цель программы PRIDE – разработка малоразмерного орбитального аппарата. Рабочее название аппарата – ISV (Innovative Space Vehicle). Инновационный космический аппарат должен быть оснащен многофункциональным грузовым отсеком, адаптированным под размещение модульных полезных нагрузок различного назначения. Для выведения ISV на НОО планируется использовать РН VEGA и ее последующие модификации.

Требования, предъявляемые к аппарату ISV:

- способность изменения наклона орбиты с помощью аэродинамического торможения при многократном погружении в атмосферу Земли;
- обеспечение управляемости на всех режимах полета, выполнение безопасной и точной посадки на обычную взлетно-посадочную полосу;
- обеспечение частичной, или полной многоразовости, многократного использования бортовой аппаратуры и оборудования;
- выполнение не менее пяти миссий при условии проведения регламентного

послеполетного обслуживания;

- быть конкурентноспособным по сравнению с одноразовыми аппаратами аналогичного назначения;

- выполнение миссии на низкой околоземной орбите на высотах до 500 км и в диапазоне наклонений от 37 до 52 градусов;

- размещение полезной нагрузки массой до 400 кг в грузовом отсеке;

- длительность автономного полета в течение не менее двух месяцев.

Аппарат ISV должен обеспечить выполнение следующих типовых миссий:

- отработка ключевых критических космических технологий;

- проведение дистанционного зондирования Земли;

- инспекция, обслуживание и ремонт космических аппаратов;

- доставка и возвращение полезных грузов/космических аппаратов;

- проведение экспериментов в условиях микрогравитации.

В период с 2016 по 2021 были выполнены следующие работы:

- проектирование и разработка аппарата ISV (Space Rider);

- изготовление конструкторско-технологических макетов, штатного образца;

- проведение наземной экспериментальной отработки;

- подготовка к летно-конструкторским испытаниям.

Основные эксплуатационные характеристики возвращаемого аппарата Space Rider:

- ограничение по высоте орбиты (до 500 км);

- диапазон наклонений орбиты (37-52 град.);

- наличие в составе грузового отсека, для размещения полезной нагрузки;

- ограничения по массе полезной нагрузки (до 900 кг);

- посадка на взлетно-посадочную полосу на шасси, или на подготовленную площадку с использованием планирующего управляемого парашюта (парафойла);

- аэродинамическое качество на гиперзвуке ($K_{гип} \sim 1,1 \dots 1,2$);

- величина бокового маневра при посадке ($L_{бок} \sim 1500 - 1700$ км);

- перегрузка на участке спуска ($< 2,5 g's$).

Начало летно-конструкторских испытаний в 2022-2023 годах возвращаемых аппаратов типа «несущий корпус» (Space Rider (Европа), Dream Chaser (США), Shenlong (Китай) создают реальные предпосылки для начала фазы активной эксплуатации возвращаемых аппаратов, располагающих большими эксплуатационными и функциональными возможностями по сравнению с аппаратами капсульного типа.

Определение основных потребительских свойств ВА НК

Определение основных потребительских свойств перспективного транспортного аппарата проводится на базе анализа характеристик аппаратов класса «несущий корпус», таких как Dream Chaser, X-37 В и Space Rider.

Перспективный возвращаемый аппарат должен обладать следующими свойствами:

- возможность выведения на низкую околоземную орбиту на частично-многоразовой ракете-носителе среднего класса (с многоразовым ракетным блоком I ступени);

- многоразовость использования конструкции и бортового оборудования;

- обеспечение всепогодной посадки на ВПП в автоматическом режиме, либо с использованием управляемого парашюта на подготовленную площадку;

- доставка и возвращение полезного груза на МКС массой не менее 900 кг;

- доставка и возвращение экипажа 2-3 человека (в перспективе);

- использование нетоксичных компонентов топлива;

- длительность автономного беспилотного полета не менее 360 суток;
- выполнение не менее пяти миссий в год;
- суммарный летный ресурс не менее 25 миссий;
- стоимость миссии не более 75 млн .долл. США;

Наличие в перспективе двух модификаций аппарата – грузовозвращающей и пилотируемой – обеспечит необходимые преимущества перед конкурентами.

Длительность цикла разработки грузовозвращающей модификации аппарата не должна превышать 2-3 года с учетом использования существующего научно-технического задела.

Длительность цикла разработки пилотируемой модификации аппарата не должна превышать 4-5 лет с учетом использования существующего научно-технического задела.

Показатели надежности и безопасности при эксплуатации грузовозвращающей модификации аппарата должны быть не хуже аналогичных показателей, достигнутых в процессе эксплуатации транспортных кораблей «Союз» и «Dragon».

По своим планирующим характеристикам аппараты класса «несущий корпус» занимают промежуточное положение между крылатыми аппаратами и капсулами.

К достоинствам аппаратов класса «несущий корпус» относится достаточно высокое конструктивное совершенство, высокая плотность компоновки, возможность многократного применения, более низкая стоимость разработки и эксплуатации по сравнению с крылатыми аппаратами.

Проектом Dream Chaser предусмотрено создание трех различных модификаций аппарата: грузовозвращающей, научно-исследовательской летающей лаборатории, пилотируемой.

Результаты. В статье проведен анализ возможностей и преимуществ применения возвращаемых аппаратов класса «несущий корпус», а также их конструктивные особенности, включая облик аппарата, основные технические и эксплуатационные характеристики, назначение и области применения.

Литература

1. Адамов Н.А., Мельцас Е.О. Перспективы и проблемы развития авиализинга в России // Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики. – 2010. – №3. – С. 63-65.
2. Герцик, Ю.Г., Москаленко, С.А., Журавлева, А.С. Анализ основных положений теории предпринимательства и ее роли в развитии инновационной экономики. В центре экономики. – 2020. – № 2. – С. 23-28. – Режим доступа: <https://vcec.ru/index.php/vcec/article/view/10>.
3. Гязова М.М. Совершенствование прогнозирования и диверсификация как инструменты обеспечения экономической устойчивости авиакомпании. Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2015. – 162 с.
4. Гязова М.М. Теория и практика исследования и прогнозирования развития рынка грузовых авиаперевозок. – М.: ООО «ЭКЦ «Профессор», 2016. – 164 с.
5. Дутов А.В., Шапкин В.С., Гальперин С.Б., Ключков В.В., Фридлянд А.А. О мерах по повышению конкурентоспособности авиационной техники российского производства // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2017. – № 16. – С. 7-14.
6. Ключков В.В., Гусманов Т.М. Маркетинговые информационные технологии в авиастроении // Маркетинг в России и за рубежом. – 2007. – № 6. – С. 10–18
7. Мельцас Е.О., Омариов М.А. Авиационный лизинг: его преимущества и недостатки // Лизинг. Технологии бизнеса. – 2010. – №6. – С. 52-54.
8. Елисеев А. Н., Миненко В.Е., Якушев А.Г., Агафонов Д.Н. Проектный, аэродинамический и термобаллистический анализ спускаемого аппарата класса "«несущий корпус" // Наука и образование. Электрон. журн. – МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 10.

– С. 88–125.

9. Фридлянд А.А., Гязова М.М., Карапетян А.Г. Оптимизация основных требований технического задания и проектно-эксплуатационных характеристик воздушного судна на основе концепции стоимости жизненного цикла // Научный вестник ГосНИИ ГА Сборник научных трудов. – Москва. – 2018. – № 24 (335). – С. 27-38.

10. Tumino Giorgio The IXV Development Status and Perspectives. 7th European Workshop on TPS-HS, Noordwijk (NL), 8th April 2013. – P. 1-27.

11. Pezzella, G., Marino, G., and Rufolo, G. C., "Aerodynamic database development of the ESA intermediate experimental vehicle," *Acta Astronautica*, Vol. 94, No. 1, 2014, pp. 57-72.

12. Structures Together ahead. RUAG Space Zurich. – Switzerland. – P. 5. – URL: https://www.ruag.com/system/files/media_document/2019-01/Structures-Brochure.pdf

13. Viviani A, Pezzella G, Aerodynamic and Aerothermodynamic Analysis of Space Mission Vehicles, Springer, 2015, p. 918.

14. Walpot, L., Ottens, H.: FESART/EXPERT Aerodynamic and Aerothermodynamic Analysis of the REV and KHEOPS Configurations. Technical Report, TOS-MPA/2718/L.W., ESTEC, Noordwijk (2003).

15. Weiland, C., Aerodynamic Data of Space Vehicles, 2014, 360 pages.

16. IXV (Intermediate eXperimental Vehicle). – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/ixv>.

Reference

1. Adamov N.A., Meltsas E.O. Prospects and Problems of Aviation Leasing Development in Russia // Fundamental and Applied Research of the Cooperative Sector of the Economy. – 2010. – No. 3. – P. 63-65.

2. Gertsik, Yu.G., Moskalenko, S.A., Zhuravleva, A.S. Analysis of the main provisions of the theory of entrepreneurship and its role in the development of an innovative economy. At the center of the economy. – 2020. – No. 2. – P. 23-28. – Access mode: <https://vcec.ru/index.php/vcec/article/view/10>.

3. Gyazova M.M. Improving forecasting and diversification as tools to ensure the economic sustainability of the airline. Publishing house MAI-PRINT, 2015. – 162 p.

4. Gyazova M.M. Theory and practice of research and forecasting the development of the air cargo market. – М.: LLC "ECC" Professor", 2016. – 164 p.

5. Dutov A.V., Shapkin V.S., Galperin S.B., Klochkov V.V., Fridlyand A.A. On measures to improve the competitiveness of Russian-made aircraft // Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation. – 2017. – No. 16. – P. 7-14.

6. Klochkov V.V., Gusmanov T.M. Marketing information technologies in aircraft construction // Marketing in Russia and abroad. – 2007. – No. 6. – P. 10-18

7. Meltsas E.O., Omariev M.A. Aviation leasing: its advantages and disadvantages // Leasing. Business technologies. – 2010. – No. 6. – P. 52-54.

8. Eliseev A.N., Minenko V.E., Yakushev A.G., Agafonov D.N. Design, aerodynamic and thermoballistic analysis of the "load-carrying body" descent vehicle // Science and Education. Electron. zhurn. – MSTU im. N.E. Bauman. – 2015. – No. 10. – P. 88–125.

9. Fridlyand A.A., Gyazova M.M., Karapetyan A.G. Optimization of the basic requirements of technical specifications and design and operational characteristics of an aircraft based on the concept of life cycle cost // Scientific Bulletin of GosNII GA Collection of scientific papers. – Moscow. – 2018. – No. 24 (335). – P. 27-38.

10. Tumino Giorgio The IXV Development Status and Perspectives. 7th European Workshop on TPS-HS, Noordwijk (NL), 8th April 2013. – P. 1-27.

11. Pezzella, G., Marino, G., and Rufolo, G. C., "Aerodynamic database development of the ESA intermediate experimental vehicle," *Acta Astronautica*, Vol. 94, No. 1, 2014, pp. 57-72.

12. Structures Together ahead. RUAG Space Zurich. – Switzerland. – P. 5. – URL: https://www.ruag.com/system/files/media_document/2019-01/Structures-Brochure.pdf.

13. Viviani A, Pezzella G, Aerodynamic and Aerothermodynamic Analysis of Space Mission Vehicles, Springer, 2015, p. 918.
14. Walpot, L., Ottens, H.: FESART/EXPERT Aerodynamic and Aerothermodynamic Analysis of the REV and KHEOPS Configurations. Technical Report, TOS-MPA/2718/L.W., ESTEC, Noordwijk (2003).
15. Weiland, C., Aerodynamic Data of Space Vehicles, 2014, 360 pages.
16. IXV (Intermediate eXperimental Vehicle). – URL:
<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/ixv>.