DOI: 10.24892/RIJIE/20250408

Применение имитационного моделирования для создания компьютерной модели космического самолёта*

Чёрненький А.В., Сушников В.А.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
andrey@qmd.spbstu.ru , sushnikov_va@spbstu.ru

Аннотация. **Имитационное моделирование широко используется при разработке сложных технических систем. Этот вид моделирования невозможен без помощи компьютерных средств, поэтому для описания этого процесса часто используется термин "компьютерное моделирование". В этой статье рассматривается использование имитационного моделирования для создания компьютерных моделей сложных систем на примере модели космического самолета. Имитационное моделирование играет решающую роль в разработке передовых технических систем, таких как космические самолеты. Изучена потенциальная замена ракет космическими самолетами для решения важнейших задач в освоении космоса. В настоящее время космические полеты осуществляются исключительно на ракетах, преимущественно на ракетах "Союз", которые достигли высокого технического уровня. Однако эти ракеты сталкиваются с двумя основными сдерживающими факторами: значительными перегрузками и ограниченными размерами космических аппаратов, что лимитирует количество космонавтов в полетах. Это препятствует более широкому участию специалистов из различных областей в исследовании космоса. Чтобы преодолеть эти сложности, предлагаем использовать космические самолеты, которые обладают преимуществом многократного использования и способны перевозить большее количество персонала. Существуют различные инструменты компьютерного моделирования, которые позволяют пользователям моделировать различные сценарии и процессы. Среди доступных инструментов целесообразно использовать симулятор Kerbal Space Program. В настоящее время существует острая потребность в космических самолетах нового поколения, использующих последние достижения в области материаловедения и космической техники. Использование имитационного моделирования для создания компьютерных моделей космических самолетов позволит сэкономить время и ресурсы при разработке инноваций, которые позволят повысить жизнеспособность космических самолетов как основы будущих космических исследований.**

***Ключевые слова*: имитационное моделирование, космический самолет, модульный, многофункциональный, автоматический, Kerbal Space Program.**

Введение

С самого начала космических полетов человечество использовало ракеты, которые в настоящее время доведены до совершенства. При всех достижениях ракетостроения все еще существуют нерешенные проблемы: необходимость в стартовом комплексе, перегрузки при взлете, малый размер полезной нагрузки и высокая степень одноразовости. Некоторые из вышеперечисленных недостатков в настоящее время активно устраняются в разных странах, включая внедрение возвращаемых ступеней и разработку крупных космических аппаратов. Однако проблемы с необходимостью создания стартового комплекса и перегрузками в настоящее время не решены.

Для решения этих проблем предложено заменить ракеты космическими самолетами. Важным преимуществом космического самолета является возможность его многократного использования. За историю космических полётов были разработаны различные версии космических самолетов. Некоторые проекты были закрыты (по разным причинам), а некоторые летали в космос (Шаттл, "Буран"). Предлагается разработать космические самолеты, которые обладают преимуществом многократного использования и позволяют перевозить больше персонала. На начальном этапе разработки целесообразно использовать имитационное моделирование.

Актуальность, научная значимость вопроса с кратким обзором литературы

Имитационное моделирование предложено использовать для создания компьютерной модели космического самолета с целью экономии времени и ресурсов при разработке и обеспечения жизнеспособности космических самолетов. Имитационное моделирование (от англ. simulation) — это распространенная разновидность моделирования, реализуемого с помощью набора математических инструментальных средств, специальных имитирующих компьютерных программ и технологий программирования, позволяющих посредством процессов-аналогов провести целенаправленное исследование структуры и функций реального сложного процесса [1, 2].

Разнообразие и функциональность программ моделирования позволяют осуществлять предварительное моделирование проектов любой сложности в различных областях. Существует множество компьютерных симуляторов для моделирования сложных систем. Рассмотрим создание компьютерной модели сложного технического объекта – космического самолета. Для реализации проекта предлагается использовать компьютерный симулятор Kerbal Space Program (KSP) [3], который широко используется в зарубежных образовательных и исследовательских учреждениях. Авторы имеют большой опыт моделирования сложных систем на базе KSP [4-6].

В разных странах появлялись проекты по созданию космического самолета. Некоторые проекты так и остались на

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

стадии чертежей или компьютерных моделей. Некоторые проекты были реализованы. Кратко рассмотрим проекты разных лет.

Первый проект полностью многоразового устройства был разработан в СССР. Название проекта - "Спираль". Этот проект состоял из сверхзвукового самолета-носителя и двухместного космического самолета "Лапоть" (рис. 1). Проект посчитали тупиковым из-за небольших размеров аппарата [7, 8].

Рис. 1. Проект "Спираль"

Начальный этап создания большого многоразового космического самолета связан с появлением американского шаттла. Это был значительный скачок в освоении космоса. На рис. 2 показано сравнение размеров шаттла и корабля "Союз". К недостаткам этого проекта можно отнести необходимость создания самоходной стартовой площадки, твердотопливных ускорителей и несовершенство защитных материалов [9-11].

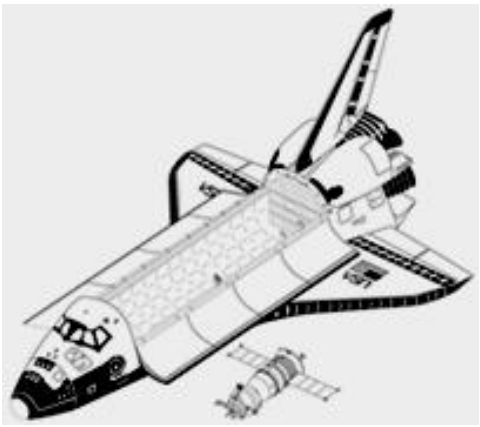

Рис. 2. Сравнение Союза и Шаттла

Сразу после демонстрационного полета шаттла в СССР началась разработка аналогичного аппарата. Результатом разработки стал "Буран". Этим аппаратом удалось достичь многих целей создания космического самолета: отпала необходимость в самодвижущемся стартовом столе; использованы жидкостные двигатели, что позволяет регулировать тягу двигателей; четыре боковых ускорителя спускались на парашютах после отделения, что позволило вернуть их на Байконур для дальнейшего использования. На "Буране" были усовершенствованы подъемные устройства, грузоподъемность увеличена на 4 тонны, а также внедрена полностью беспилотная система полета. К недостаткам проекта относится необходимость вертикального взлета с уникальной стартовой площадки [12-15]. Шаттл и "Буран" изображены на рис. 3.

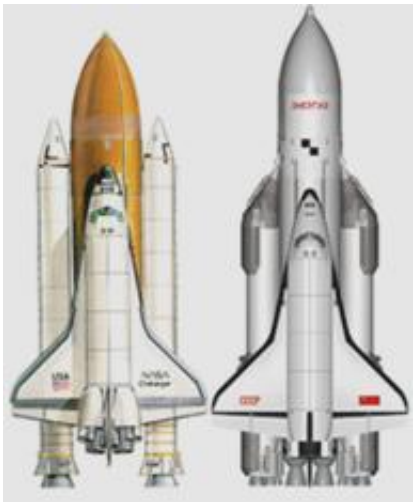

Рис. 3. Шаттл и "Буран"

Проект конструкторского бюро Мясищева М-19 можно отнести к большим космическим самолетам. На рис. 4 показана схема М-19 в разрезе. К преимуществам проекта можно отнести взлет и посадку в аэропорту, большую грузоподъемность и хороший потенциал для многозадачности. К недостаткам относятся отсутствие автоматического полета и необходимость использования непроверенных технологий. Из-за недостатков проект был свернут в пользу работы над "Бураном" [16, 17].

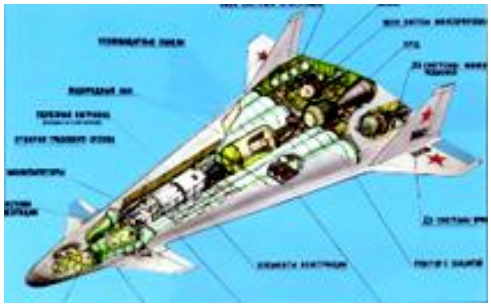

Рис. 4. Мясищев М-19

X37B от Boeing – это небольшой грузовой беспилотник, взлетающий на средней ракете Atlas 5. Внешне он напоминает уменьшенный шаттл. В устройстве нет места для астронавтов и большой полезной нагрузки. 17 мая 2017 года завершился 2-летний испытательный полет аппарата. Цель создания не раскрывается, а результаты полета засекречены. Единственная доступная информация – это сравнение его габаритов с шаттлом и схема взлета (рис. 5). К преимуществам проекта относится 100% автоматический полет аппарата в течение нескольких лет. К недостаткам относятся небольшой размер и необходимость использования одноразовой ракеты [18-21].

Самолет Stratolaunch Model 351 (рис. 6) был создан на основе концепции воздушного старта. Он позволяет выводить спутники и космические корабли на орбиту без использования космодромов. Во второй половине 2000-х годов создали двухфюзеляжный самолет-носитель WhiteKnightTwo, предназначенный для запуска суборбитального космического аппарата многоразового использования Spaceship One (ныне VSS Unity).

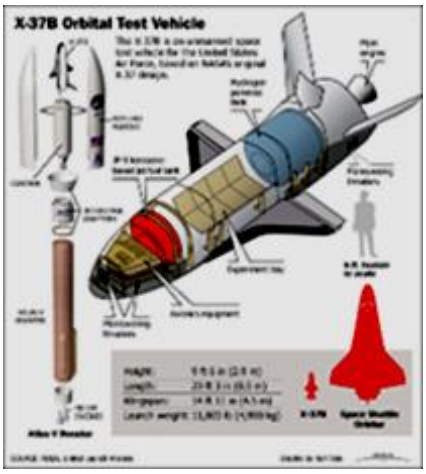

Рис.5. X37B от Boeing

Рис. 6. Самолет Stratolaunch Model 351

Для постройки этого самолета были разобраны два самолета B747-400. К положительным моментам можно отнести взлет и посадку в аэропорту. К недостаткам – необходимость в экипаже, низкую полезную нагрузку и невозможность полетов в космос [22-25].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

А. Сложность проекта

Чтобы устранить недостатки рассмотренных выше проектов, в статье предложено заменить ракеты космическим самолетом, который может взлетать с существующих аэродромов, летать в космос для выполнения различных задач и завершать полет посадкой в самом обычном аэропорту.

Сложности проекта:

1) неспособность обычных авиационных двигателей работать в космосе;

2) недостаточная мощность двигателя для достижения первой космической скорости;

3) недостаточная прочность фюзеляжа для полетов в космосе;

4) недостаточная прочность крыльев и хвостового оперения обычных самолетов для прохождения плотных слоев атмосферы на первой космической скорости.

Б. Технические требования

После изучения данных о проектах космосамолетов было принято решение о создании проекта нового типа. Требования к космосамолету:

1. По аналогии с "Бураном", должен быть способен совершать полностью беспилотный полет;

2. Должен обладать высокой маневренностью как при полете в космосе и атмосфере, так и при рулении после посадки;

3. Должен быть способен длительное время летать в атмосферных условиях (в случае невозможности посадки в главном аэропорту);

4. Не должен быть требовательным к длине взлетно-посадочной полосы;

5. Должен иметь модульную конструкцию для выполнения многофункциональных операций;

6. Должен иметь возможность стыковаться в космосе (обеспечивать стыковочный узел) для выполнения работ по доставке экипажа или груза на орбитальную станцию;

7. Взлет космического самолета должен осуществляться с взлетно-посадочной полосы;

8. Начальный этап полета (перед запуском в космос) должен быть обеспечен ракетными ускорителями.

В статье представлено решение проблем, связанных с проектированием космического самолета.

Предложено использовать имитационное моделирование для создания компьютерных моделей космических самолетов с целью экономии времени и ресурсов при разработке инноваций и обеспечения жизнеспособности космических самолетов. Задача исследования - изучить возможность использования имитационного моделирования для создания компьютерных моделей космических самолетов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

А. Основные понятия имитационного моделирования

Имитационное моделирование используется как системообразующее и наиболее ответственное звено в процессе принятия решений, поэтому оно используется совместно с другим программным обеспечением для принятия решений в информационных системах различного назначения.

Разнообразие и функциональность программ моделирования позволяют осуществлять предварительное моделирование проектов любой сложности в различных областях.

В целом, структуру имитационной модели можно выразить следующим образом [1, 2]:

$$R = f\,(x[i], y[j]),$$

где R – результат работы системы; $x[i]$ – переменные и параметры, которые можно изменить; $y[j]$ – переменная или параметр, который нельзя изменить; f – функциональная зависимость между x и y, которая определяет R.

Модель представляет собой определенный набор компонентов, включая переменные, параметры, функциональные зависимости и ограничения. Модель также включает целевую функцию. Для создания имитационной модели необходимо специальное программное обеспечение — имитационная система, которая определяется технологией эксплуатации и набором инструментов, сервисных программ и методов моделирования. Имитационная модель должна отражать большое количество параметров и форм поведения моделируемого объекта во времени (временная динамика) и пространстве (пространственная динамика).

Математической основой имитационного моделирования является ряд предельных теорем:

1) теорема Бернулли гласит, что бесконечное увеличение числа экспериментов уменьшает частоту события до его вероятности;

2) теорема Чебышева: при неограниченном количестве экспериментов среднее арифметическое наблюдаемых величин сходится к математическому ожиданию этих величин;

3) центральная предельная теорема: закон распределения суммы случайных величин при неограниченном увеличении числа слагаемых стремится к нормальному закону распределения.

Имитационное моделирование управляемого процесса или объекта управления – это высокоуровневая информационная технология, которая предусматривает два типа действий:

1) работа по созданию или модификации имитационной модели;

2) эксплуатация имитационной модели и интерпретация результатов.

Исторически инструменты имитационного моделирования можно разделить на два основных типа: языки имитационного моделирования и программы моделирования, ориентированные на конкретную предметную область. Последний тип включает моделирование на основе компьютерных симуляторов.

Компьютерные симуляторы – это разновидность программных и аппаратных средств, которые создают впечатление реальности, отображая некоторые реальные явления и свойства в виртуальной среде. Компьютерные симуляторы позволяют целенаправленно изучать структуру и функции реальной системы, оптимизируя некоторые ее параметры. Для реализации проекта предложено использовать компьютерный симулятор Kerbal Space Program (KSP) [3].

Б. Разработка космического самолета

Аэродинамика – это наука об общих законах движения газа и взаимодействии газа с движущимися телами. Результатом этого взаимодействия на воздушном судне во время его полета является аэродинамическая сила, благодаря которой воздушное судно может летать. Для разработки самолета необходимо определить аэродинамические силы, необходимые для определения размеров и подъемной силы крыла, а также многих других параметров.

Общая аэродинамическая сила [26]:

$$R = c_R p \frac{V^2}{2} F, \quad (1)$$

где c_R – коэффициент суммарной аэродинамической силы; p – массовая плотность воздуха; V – скорость воздушного потока или перемещения тела, м/с; F – площадь миделя (от голландского middel, букв. – средний, середина), самое большое поперечное сечение тела, движущегося в воде или воздухе).

Расчет площади крыла:

$$S = lb_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где $b_{\text{ср}}$ – средняя геометрическая хорда; l – длина крыла.

Общая аэродинамическая сила крыла:

$$R = c_R p \frac{V^2}{2} S, \quad (3)$$

где c_R – коэффициент суммарной аэродинамической силы, величина которого зависит от угла атаки, формы профиля, формы крыла и отделки его поверхности; p – плотность массы; V – скорость полета; S – площадь крыла.

Формулы 1 и 3 показывают, что суммарная аэродинамическая сила и суммарная аэродинамическая сила крыла зависят от одних и тех же факторов. Разница лишь в том, что вместо площади миделя используется площадь крыла, поскольку несущая способность крыла зависит от его площади.

Расчет аэродинамических характеристик тел в переходном режиме [27]. Из-за трудностей в решении аэродинамических задач об обтекании пространственных тел потоком разреженного газа были разработаны инженерные полуэмпирические методы, основанные на накопленных экспериментальных и расчетных данных. При моделировании природных условий необходимо учитывать влияние основных критериев подобия. Число Кнудсена *Kn* и число Рейнольдса *Re* определены следующим образом:

$$Kn = \frac{\lambda}{L}, \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho_\infty V_\infty L}{\mu}, \quad (5)$$

$$Kn \approx \frac{M}{Re}, \quad (6)$$

где λ – длина свободного пробега; L – характерный размер тел; μ – коэффициент вязкости; M – число Маха.

В условиях гиперзвуковой стабилизации в качестве критерия разреженности рациональнее использовать число Рейнольдса, а не Кнудсена.

Практическая часть и результаты экспериментальных исследований

А. Этапы сборки и тестирования

После формирования ряда условий проведена работа по моделированию космического самолета в KSP. Для реализации проекта был выбран самолет среднего размера, который обозначен в KSP деталями MK2. В наборе деталей этого типа есть множество модулей различных модификаций, которые позволят реализовать многозадачность. Этап сборки начинается в ангаре. Для размещения пилотов используется двухместная кабина, за кабиной установлен беспилотный модуль управления (рис. 7).

Рис. 7. Кабина пилотов и модуль управления

Для обеспечения многозадачности аппарата рассмотрены различные комбинации модулей. На рис. 8 показан вариант доставки груза на орбитальную станцию, для которого используется небольшой грузовой отсек и стыковочный узел.

На рис. 9 показан вариант доставки экипажа на орбитальную станцию, для которого использованы пассажирский отсек и стыковочный узел.

Предусмотрены другие варианты компоновки: грузовая версия с большим грузовым отсеком позволит выводить спутники на орбиту, научная версия оснащена пассажирской кабиной и малым грузовым отсеком с научным оборудованием.

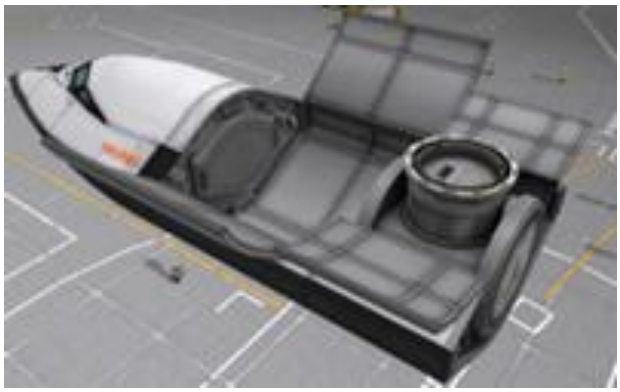

Рис.8. Грузовой отсек и стыковочный узел

Рис. 9. Пассажирский отсек и стыковочный узел

Следующий этап сборки самолета касается установки модуля ориентации в пространстве, ретранслятора RA-2, двух аккумуляторов Z-1k, шести переносных реакторов и двух прожекторов Mk1. Все вышеперечисленное помещается в небольшом грузовом модуле непосредственно за стыковочным узлом (рис. 10).

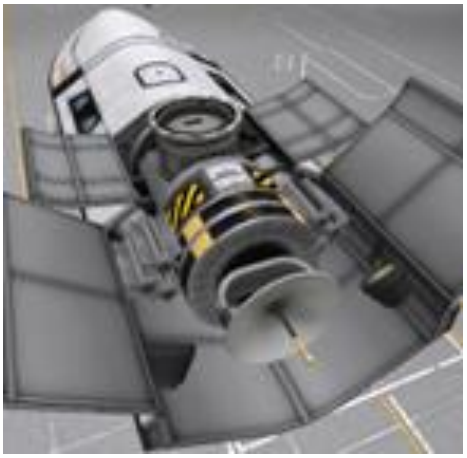

Рис. 10. Технический модуль

Для маневрирования в открытом космосе используются маневровые блоки двигателей, которые производятся в Екатеринбурге. Эти двигатели потребляют монотопливо, поэтому следующим элементом конструкции космосамолета является монотопливный бак Мк-2. Ракетное топливо необходимо для работы основных двигателей в космосе; оно представляет собой смесь жидкого топлива и окислителя. Установлен короткий бак с ракетным топливом и двойной адаптер Mk-2. Для длительных полетов в атмосфере необходимы дополнительные баки с жидким топливом, которые устанавливаются по бокам короткого бака с ракетным топливом и оснащены адаптерами спереди и сзади. Между центральным и боковыми адаптерами установлен внешний топливопровод. К адаптерам в передней части прикреплены регулируемые воздухозаборники, которые позволяют заменять окислитель воздухом во время полета в атмосфере. Во время полета в космосе воздухозаборники закрываются экранами для защиты работающего двигателя от космического мусора или пыли. Тормозные парашюты Mk-16Xl крепятся к центральному адаптеру (рис. 11).

Рис. 11. Установлены топливные баки, воздухозаборники и тормозные парашюты

Следующий этап сборки – установка крыльев, закрылков, надкрылков, вертикальных килей. Всё это позволит космическому самолёту уверенно летать в условиях атмосферы.

Выбор двигателей. Для маневрирования в открытом космосе аппарат оснащен блоками маневровых двигателей, которые производятся в Екатеринбурге. Чтобы обеспечить два режима работы (внутриатмосферный и в космосе) подходит двигатель CR-7.

Завершение сборки космического самолёта – установка шасси. Выбрано среднее поворотное шасси LY-35. Схема расположения шасси: одно спереди, три сзади под основными топливными баками.

После завершения сборки проведено моделирование серии испытаний:

- выкатывание на взлетно-посадочную полосу для проверки положения всех стоек шасси;
- пробег по полосе без взлета для проверки устойчивости транспортного средства и работы тормозной системы;
- взлет и испытательный полет по кругу для проверки аэродинамики и атмосферных подъемных устройств космического самолета.

Моделирование всех испытаний прошло успешно, что доказало готовность аппарата к установке ракетных ускорителей. Состав: два бака для ракетного топлива, два носовых обтекателя, десять двигателей Мастодонт, четыре больших авиационных крыла, восемь вертикальных стабилизаторов Толстяк-455 и два вертикальных стабилизатора Крепыш-С. Результат показан на рис. 12.

Рис. 12. Ускорители

Моделирование полёта начинается с запуска ускорителей, разбега по всей длине полосы и отрыва в конце полосы. Далее следует постепенное увеличение тангажа до 35 градусов и полёт в таком положении до 45 000 м. После прохождения этой отметки происходит плавное снижение тангажа до 0 градусов.

Формирование орбиты. На высоте 65 000 м начинается формирование круговой орбиты, шаг которой был изменен на -35, а затем на -60. Это позволило начать формирование орбиты с апогеем 400 000 м и перигеем 36 000 м. После отделения ускорителя, самолёт продолжает формировать орбиту основными двигателями – перигей поднят до 100 000 м.

Орбитальные испытания космического самолета. На орбите проведен комплекс испытаний всех систем: были заданы различные направления полета, аппарат успешно выровнен в нужных направлениях (как с маневровыми двигателями, так и без них), проверена возможность открытия дверей в стыковочном и грузовом отсеках в космосе, а также возможность длительного нахождения на орбите. Было проверено включение освещения без перебоев в подаче электроэнергии. На рис. 13 показан космический самолет на орбите с открытыми дверями грузового отсека и активированным стыковочным узлом. Это положение указывает на полную готовность к стыковке с любым подходящим транспортным средством, включая орбитальную космическую станцию.

Рис. 13. Проверка активации стыковочного узла

Возвращение на планету. Для этой процедуры необходимо учитывать траекторию схода шаттлов и “Бурана” с орбиты [28, 29]. Исходя из открытых данных о схеме посадки, выполняем следующие шаги:

Шаг 1. Задействуем тормозные двигатели, чтобы плавно выйти на орбиту входа в атмосферу. Для успешного прохождения перицентр орбиты должен составлять (35-25) км.

Шаг 2. Перед входом в плотные слои атмосферы угол наклона космического самолета должен быть отрегулирован на 35 градусов. Минимальная высота для завершения маневра составляет 70 км.

Шаг 3. Во время планирования космического самолета необходимо поддерживать неизменными крен и тангаж. При таком значении тангажа уровень перегрузки будет таким же, как у пассажирского самолета. Здесь важно учитывать сброс скорости до значений менее 700 м/с. Показатели высоты должны достигать 15 км.

Шаг 4. Переключение в режим полета самолета. На этом этапе угол наклона постепенно уменьшается до 10 градусов, защитные экраны двигателей открываются, двигатели включаются. На этой высоте двигатели постепенно переключаются с использования окислителя в баках на использование воздуха. Благодаря большому запасу жидкого топлива аппарат может совершать длительный перелет до аэропорта.

Шаг 5. Посадка на взлетно-посадочную полосу. Встроенная автоматика позволила успешно реализовать все этапы посадки аппарата на взлетно-посадочную полосу аэрокосмического центра.

Заключение (Выводы)

В статье представлен опыт использования имитационного моделирования для создания компьютерных моделей сложных систем на примере модели космического самолета.

Рассмотрен сложный процесс разработки и моделирования космического самолета в среде компьютерного моделирования KSP. Начальный этап разработки включал изучение существующих аналогичных проектов. После изучения аналогов было сформировано задание на проектирование, на основе которого были проведены проектные работы и моделирование. Для подтверждения успешности разработки проведено моделирование трех комплексов испытаний: наземные испытания, полеты в атмосфере и полеты в космос с возвращением на планету. Все испытания пройдены успешно. Особое внимание уделено модульности и автоматизации комплекса. В результате проведенных проектных работ создано несколько вариантов космосамолета, описаны конструктивные особенности и задачи каждого варианта. Автоматизация комплекса позволяет осуществлять полноценный полет без участия пилотов, что ранее оказалось реализовано лишь однажды на таких крупных аппаратах, как "Буран". Протестирована работоспособность всех систем. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод об успешном выполнении поставленных задач.

Литература

1. Кобелев Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем. – М.: Дело, 2003. – 336 С.

2. Волкова В.Н. Моделирование систем и процессов: учебник для вузов / В.Н. Волкова [и др.]; под ред. В.Н. Волкова, В. Н. Козлова. – 2-е изд., переработан. и доп. – М.: Издательский дом "Юрайт", 2024. – 510 с.

3. Kerbal Space Program. – URL: https://thelastgame.ru/kerbal-space-program/?ysclid=m7yqwqpkoj250974051 (дата обращения: 03.03.2025).

4. Chernenkii A.V. Study of Gas Giant Satellites System / A/V/ Chernenkii // Proc. 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2021. – P. 151-164. DOI: 10.1007/978-3-030-94202-1_15.

5. Chernenkii A.V. Implementation of Project Activities in Engineering Education on the Example of the Educational Program “Space Technologies” // Proc. 2022 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – 2022. DOI: 10.1109/Inforino48376.2020.9111759.

6. Chernenkii A.V. Results of Educational Program Implementation "Project Activities in Space Technologies" // Proc. 2024 VI International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – 2024. DOI: 10.1109/Inforino60363.2024.10551957

7/ Космический лапоть – проект «Спираль». – URL: https://back-in-ussr.com/2018/01/kosmicheskiy-lapot-proekt-spiral.html (дата обращения: 03.03.2025).

8. История программы “Спираль”. – URL: https://topwar.ru/1515-istoriya-programmy-spiral.html (дата обращения: 03.03.2025).

9. Программа "Спейс шаттл": что получилось и что нет – URL: https://topwar.ru/136809-programma-speys-shattl-chto-poluchilos-a-chto-net.html (дата обращения: 03.03.2025).

10. Все пять шаттлов: описание, достижения, интересные факты. – URL: https://zen.yandex.ru/media/cognitivepiggybank/vse-piat-shattlov-opisanie-dostijeniia-interesnye-fakty-5c6b0c0b4a187700aeb48962 (дата обращения: 03.03.2025).

11. Space Shuttle. Архив NASA о программе "Space Shuttle", 1981-2011 годы. – URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/main/index.html. (дата обращения: 03.03.2025).

12. Триумф и трагедия "Бурана". – URL: https://pikabu.ru/story/triumf_i_tragediya_burana_6285888 (дата обращения: 03.03.2025).

13. Многоразовая космическая транспортная система "Буран". – URL: https://www.roscosmos.ru/30006/ (дата обращения: 03.03.2025).

14. "Буран": разбор полета. – URL: https://buran.tass.ru/ (дата обращения: 03.03.2025).

15. Майоров М. "Буран": триумф и трагедия // Наука и техника. – 2018. – URL: https://stimul.online/articles/science-and-technology/buran-triumf-i-tragediya/ (дата обращения: 03.03.2025).

16. Многоразовый, космический, ядерный: проект самолета М-19 – URL: https://topwar.ru/159016-mnogorazovyj-kosmicheskij-jadernyj-proekt-samoleta-m-19.html (дата обращения: 03.03.2025).

17. Воздушно-космический самолет М-19 EMZ В.М. Мясищева. – URL: https://fishki.net/1699216-vozdushno-kosmicheskij-samolyot-m-19-jemz-vm-mjasiweva.html (дата обращения: 03.03.2025).

18. Для чего нужен американский секретный космический космолет Х-37В. – URL: https://pikabu.ru/story/dlya_chego_nuzhen_amerikanskiy_sekretnyiy_kosmolet_x37b_5039274 (дата обращения: 03.03.2025).

19. Boeing X-37B. Эксперимент или угроза в космосе? – URL: https://topwar.ru/162366-boeing-x-37b-jeksperiment-ili-ugroza.html (дата обращения: 03.03.2025).

20. Сверхсекретный американский космический корабль Х-37В. – URL: https://iplanets.ru/sverhsekretnyj-amerikanskij-kosmolet-x-37b (дата обращения: 03.03.2025).

21. Чем занят самый секретный американский космоплан: теории и факты. – URL: https://warhead.su/2019/11/01/chem-zanyat-samyy-sekretnyy-amerikanskiy-kosmoplan-teorii-i-fakty (дата обращения: 03.03.2025).

22. Первый полет самого большого в мире самолета Stratolaunch. – URL: https://bmpd.livejournal.com/3608332.html (дата обращения: 03.03.2025).

23. Проект двойного назначения: как США создают самолет для запуска космических ракет. – URL: https://russian.rt.com/world/article/621443-stratolaunch-samyi-bolshoi-samolyot (дата обращения: 03.03.2025).

24. Stratolaunch. – URL: http://www.airwar.ru/enc/craft/stratolaunch.html (дата обращения: 03.03.2025).

25. Конкурент "Мрии". – URL: https://strana.news/news/181271-stratolanch-vs-mrija-vse-podrobnosti-pro-samyj-bolshoj-samolet-v-mire-stratolaunch-351.html (дата обращения: 03.03.2025).

26. Арсеньев Д.Г. Механика полета: учебное пособие / Д.Г. Арсеньев, А.А. Боряев, А.Л. Куранов. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета. ун-та, 2009. – 418 с.

27. Мьинт З.М. Использование локального метода для расчета аэродинамических характеристик гиперзвуковых летательных аппаратов в переходном режиме / Зея Мьо Мьинт, А.Ю. Хлопков, Чжо Зин, Тху Рейн Тун // Электронный журнал "Известия МАИ". – 2012. – Вып. № 53.

28. Как посадить Space Shuttle из космоса. – URL: https://habr.com/ru/company/ua-hosting/blog/472212 (дата обращения: 03.03.2025).

29. Как приземляются космические – URL: https://ru-cosmos.livejournal.com/466067.html (дата обращения: 03.03.2025).

DOI: 10.24892/RIJIE/20250408

The Use of Simulation Modeling to Create Computer Models of Complex Systems, Using the Example of a Spaceplane Model

Chernenkii A.V., Sushnikov V.A.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Saint-Petersburg, Russian Federation
andrey@qmd.spbstu.ru, sushnikov_va@spbstu.ru

Abstract. **Simulation modeling is widely used in the development of complex technical systems. This type of modeling cannot be done without the help of computer tools, so the term "computer modeling" is often used to describe this process. This article discusses the use of simulation modeling to create computer models of complex systems using the example of a spaceplane model. Simulation plays a crucial role in the development of advanced technical systems such as spaceplanes. We studied the potential replacement of rockets with spaceplanes to address critical challenges in space exploration. Currently, spaceflights rely exclusively on rockets, predominantly the Soyuz system, which has reached a high technical standard. However, these systems face two major limitations: significant overloads and the limited size of spacecraft, restricting the number of cosmonauts on missions. This limitation hinders broader participation by specialists from various fields in space exploration. To overcome these challenges, we propose using spaceplanes, which offer the advantage of reusability and the capacity to transport more personnel. There are various computer simulation tools that enable users to simulate different scenarios and processes. Among the available tools, we propose the Kerbal Space Program simulator for its utility in this context. Today, there is an urgent need for next-generation spaceplanes incorporating the latest advancements in materials science and spacecraft engineering. Using simulation modeling to create computer models of spaceplanes will save time and resources in developing innovations that promise to enhance the viability of spaceplanes as the cornerstone of future space exploration.**

Keywords: **simulation modeling, spaceplane, modular, multifunctional, automatic, Kerbal Space Program.**

Библиографическое описание статьи

Чёрненький А.В. Применение имитационного моделирования для создания компьютерной модели космического самолёта / А.В. Чёрненький, В.А. Сушников // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2025. – Т.12, №4. – С. 46-53. DOI: 10.24892/RIJIE/20250408

Reference to article

Chernenkii A.V., Sushnikov V.A. The use of simulation modeling to create computer models of complex systems, using the example of a spaceplane model, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2025, vol.12, no.4, pp. 46-53. DOI: 10.24892/RIJIE/20250408
