

ӘСКЕРИ ІС
MILITARY SCIENCE
ВОЕННОЕ ДЕЛО

УДК 621.3

DOI 10.52167/1609-1817-2024-134-5-526-538

А.Е.Комекбаев¹, М.Р.Нургужин², К.А.Алипбаев³

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Национальный центр космических исследований и технологий, Алматы, Казахстан

³Energo University, Алматы, Казахстан

E-mail: komekbayev.a@spaceres.kz

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ
КОНСТРУКЦИИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ СВЕРХЛЕГКОГО КЛАССА**

Аннотация. В последние годы наблюдается рост сложности и требований к проектированию ракет-носителей, что делает актуальным непрерывное совершенствование методик расчета параметров их силовой конструкции. Современные исследования фокусируются на разработке и использовании теоретических, численных и экспериментальных методов, которые позволяют оценить прочность и устойчивость конструкций.

В статье проведен всесторонний обзор различных подходов к расчету параметров силовой конструкции ракет-носителей. Внимание уделено как традиционным методам, таким как использование классических механических моделей и конечно-элементного анализа (КЭА), так и инновационным методам, представленным в последних публикациях и исследовательских проектах. Анализируются как теоретические аспекты, так и практическое применение этих подходов.

Приведены ключевые примеры успешного применения различных методов в современных проектах по разработке ракет-носителей. Особое внимание уделено работам, в которых сочетаются теоретические, численные и экспериментальные методы, что позволяет достичь высокой точности и надежности конструкций. Обсуждаются преимущества и недостатки каждой методики, а также возможности их оптимизации.

Проанализированы сильные и слабые стороны различных методов, а также возможные пути их интеграции для достижения наилучших результатов. Особое внимание уделено перспективным направлениям для дальнейших исследований и улучшений в области расчета силовой конструкции ракет-носителей, что позволит повысить их надежность и эффективность в сложных эксплуатационных условиях.

Ключевые слова. Ракеты-носители, силовая конструкция, методики расчета, конечно-элементный анализ, теоретические модели, численные методы, экспериментальные методы, оптимизация конструкции, лабораторные испытания, натурные испытания, деструктивное тестирование, неразрушающий контроль, прочность материалов, жесткость конструкции.

Введение.

Проектирование и разработка ракет-носителей является одной из наиболее сложных и многогранных задач в современной инженерии. Совершенствование технологий в области космических исследований и требований к безопасности заставляют инженеров постоянно искать новые методы и подходы для создания надежных и эффективных конструкций. Силовая конструкция ракеты-носителя, являющаяся основным

элементом, определяющим ее структурную целостность и рабочие характеристики, нуждается в детальном анализе и всесторонней оценке на всех этапах разработки.

Исторически методы расчета параметров силовых конструкций ракет базировались на классических теоретических моделях, включающих законы механики и материаловедения. Однако с введением более сложных и многокомпонентных систем в современные ракеты возникла необходимость в развитии более точных и адаптивных методик расчета. Появление компьютеров и развитие численных методов, таких как конечно-элементный анализ (КЭА), открыло новые возможности для проектирования и оптимизации конструкций. Это позволило с высокой точностью моделировать поведение материалов и конструкций под воздействием различных нагрузок.

Экспериментальные методы играют ключевую роль в проектировании и верификации параметров силовой конструкции ракет-носителей. Эти методы включают проведение лабораторных и натурных испытаний для проверки и коррекции теоретических и численных моделей. Экспериментальные исследования позволяют выявлять реальные механические и тепловые параметры конструкции, обеспечивая высокую надежность и безопасность ракетных систем.

В последние годы наблюдается значительное увеличение количества разработчиков небольших ракет-носителей, способных выводить до 1000 кг на низкую орбиту Земли [1]. Эта тенденция стимулируется правительственными программами и быстрым развитием CubeSat и наносателлитов. Более 100 организаций по всему миру работают над новыми ракетами этого класса [2]. Несмотря на кажущуюся конкурентную и неблагоприятную рыночную среду, появляются новые участники, в том числе из таких неожиданных рынков, как Китай. Все они вдохновлены успехом SpaceX и надеются удовлетворить спрос, вызванный мега-конstellациями спутников.

Настоящая статья посвящена анализу существующих методик расчета параметров силовой конструкции ракет-носителей с акцентом на теоретические, численные и экспериментальные подходы. Комбинирование этих методов позволяет получить наиболее полное представление о текущем состоянии методов проектирования и выявить направления для их дальнейшего совершенствования.

Таким образом, в условиях растущей конкурентной среды и повышенных требований к надежности ракетных систем, комплексное применение различных методик расчета параметров силовой конструкции становится не только возможным, но и необходимым.

Цель данной статьи — провести аналитический обзор существующих методик расчета параметров силовой конструкции ракет-носителей сверхлегкого класса, выявить их основные принципы и подходы, а также проанализировать их эффективность и возможности оптимизации.

Научная новизна данной статьи заключается в систематизации и сравнительном анализе современных методов расчета параметров силовой конструкции ракет-носителей. Несмотря на значительное количество исследований в этой области, многие из них фокусируются на отдельных аспектах проектирования, не предлагая целостного подхода. В нашем обзоре мы стремимся объединить различные методики и подходы, что позволяет получить более полное представление о существующих техниках и их применении в современных условиях. Например, работа Yan H. и Zhang X. 2023 года [3] иллюстрирует успешное применение комплексного подхода к проектированию малокалиберной сверхзвуковой ракеты, сочетая теоретические, численные и экспериментальные методы для достижения оптимальной конструкции. Подобные исследования подчеркивают важность интеграции различных методов для повышения точности и надежности конструкций.

Кроме того, научная новизна проявляется в выявлении и анализе перспективных направлений для дальнейших исследований и оптимизаций методов расчета. В работе

Park Y. K. 2023 года [4] рассматривается проектирование и верификация электрического насоса для небольшого двигателя на жидком топливе, что демонстрирует возможности использования новых технологий и материалов для улучшения характеристик силовых конструкций. Еще один пример — исследование Reinhold H. 2024 года [5], где проводится оптимизация и разрушительное тестирование вафельных цилиндров для маломасштабных ракетных корпусов. Эти исследования подчеркивают необходимость дальнейшего развития методов расчета и экспериментальной верификации для достижения максимально возможной эффективности и надежности в условиях реальных эксплуатационных нагрузок.

Ракеты-носители легкого и сверхлегкого класса

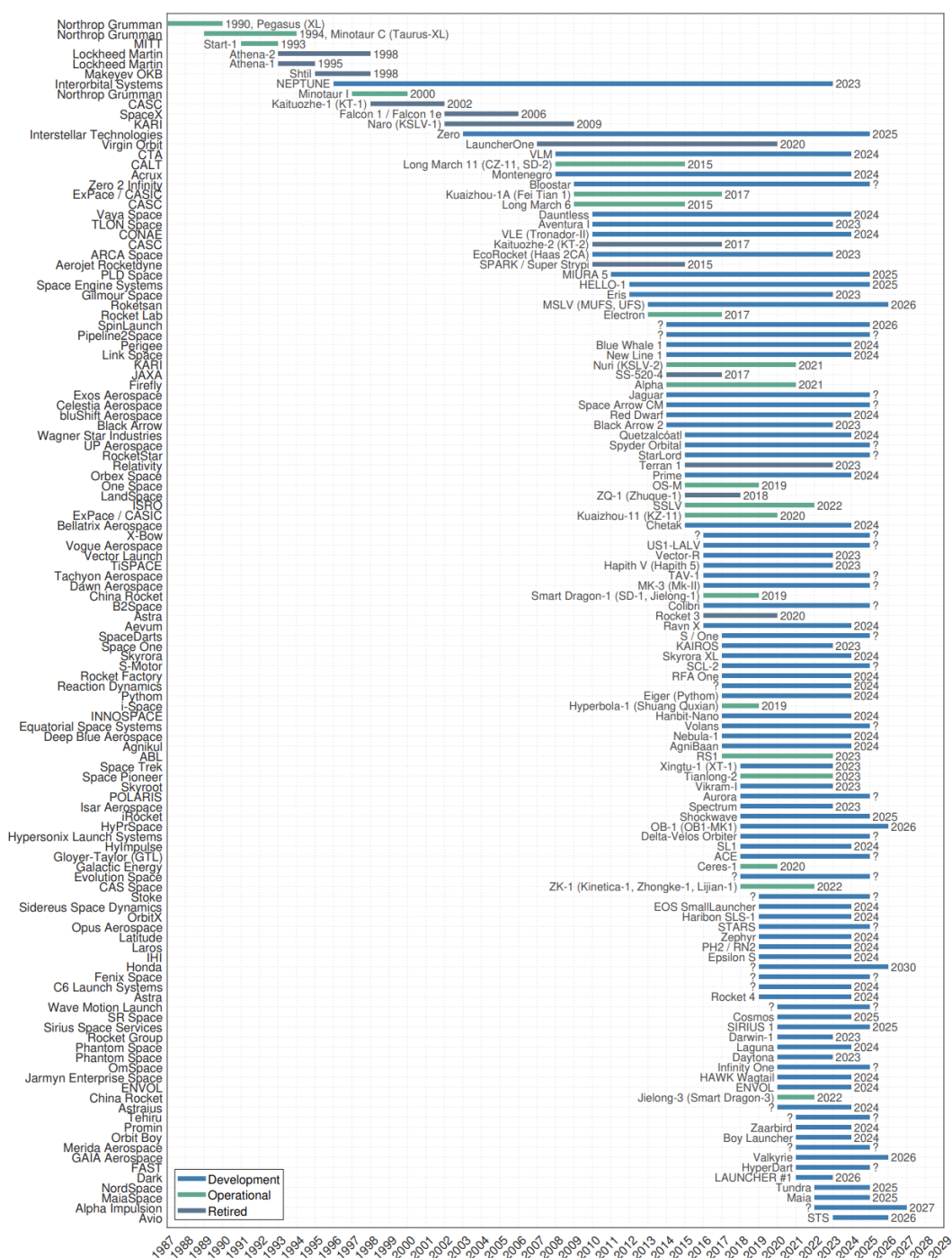


Рисунок 1 – Годы запуска ракет-носителей легкого и сверхлегкого класса [2]

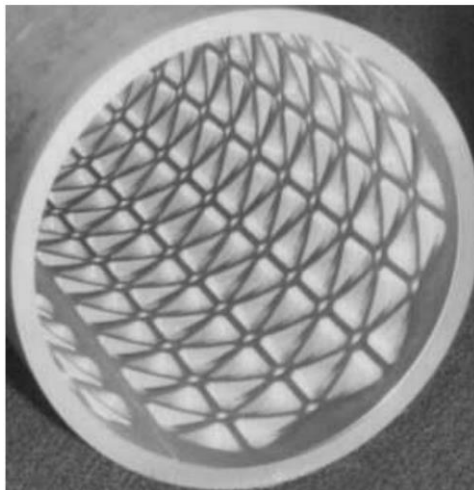


Рисунок 2 – Цилиндрическая оболочка вафельного типа [5]

Материалы и методы.

В данной статье применены следующие методы исследования: аналитический обзор существующих методик расчета параметров силовой конструкции ракет-носителей, включающий изучение и систематизацию литературных источников по рассматриваемой теме. Также был проведен сравнительный анализ различных теоретических, численных и экспериментальных подходов, описанных в последних публикациях, таких как работы Yan H., Zhang X. (2023), Park Y. K. et al. (2023) и Reinhold H. et al. (2024) [3-5]. Анализ включал оценку эффективности и точности этих методов на основе представленных в статьях данных.

Далее была выполнена классификация методов по ряду критериев, таких как точность, вычислительная сложность, стоимость и применение на практических примерах. Классификация включала обобщение информации из различных источников с целью выявления ключевых характеристик и особенностей каждого метода. Завершением метода исследования стало определение перспективных направлений для дальнейших исследований и оптимизации существующих методик, основываясь на выявленных сильных и слабых сторонах существующих подходов, описанных в работах Mathesius K. J. [6] и Little B., Jugroot M. [7]. Эти методы позволяют получить всестороннее представление о текущем состоянии методов расчета параметров силовой конструкции ракет-носителей и выявить направления для их дальнейшего совершенствования.

Методы расчета параметров силовой конструкции.

Теоретические подходы к расчету параметров силовой конструкции ракет-носителей основаны на классических механических моделях и методах оптимизации. Эти методы включают аналитические решения задач, касающихся статической и динамической прочности конструкций, и обычно являются первым шагом в процессе проектирования.

Классические механические модели.

Основой теоретических подходов являются классические механические модели, такие как теория балки, оболочки и пластины. Эти модели позволяют аналитически описывать поведение конструктивных элементов под воздействием различных типов нагрузок. Например, теория упругости и прочности материалов может быть использована для оценки напряжений и деформаций в различных частях конструкции ракеты.

1. Используется для анализа длинных, узких частей конструкции, которые можно представить как одномерные объекты. Например, рассмотрение корпуса ракеты как балки позволяет оценить его поведение под воздействием осевых сил и моментов изгиба.

2. Применяется для анализа тонкостенных цилиндрических структур, таких как топливные баки и корпус ракеты. В этом контексте теория оболочки помогает определить критические нагрузки, ведущие к избыточной деформации или потере устойчивости.

3. Используется для анализа плоских конструктивных элементов, таких как элементы обшивки или межбаковые перегородки. Теория пластин позволяет учитывать сочетание нормальных и касательных напряжений в плоскости элемента.

Методы оптимизации.

Методы оптимизации служат для улучшения характеристик конструкции, таких как минимизация массы при сохранении прочности и жесткости. Один из подходов к оптимизации заключается в применении вариационных методов, позволяющих найти экстремальные значения функционалов, описывающих поведение конструкции. Работы Pal Y. (2021) [8] демонстрируют применение таких методов при разработке методов улучшения механических характеристик гибридных ракетных двигателей.

1. Вариационные методы: Эти методы применяются для определения оптимального распределения материалов или формы конструктивных элементов. Например, можно использовать вариационные принципы для минимизации массы ракеты при заданной устойчивости к нагрузкам.

2. Методы многокритериальной оптимизации: Такие методы позволяют учитывать несколько критериев одновременно, например, минимизацию массы при максимальной прочности и минимальных вибрациях. Исследования Foster K. (2020) [9] показывают, как многокритериальная оптимизация может быть использована для достижения баланса между различными характеристиками конструкции малокалиберной сверхзвуковой ракеты.

Применение в современных исследованиях.

Современные исследования активно используют теоретические подходы для разработки и верификации моделей силовой конструкции ракет-носителей. Например, работы Mathesius K. J. (2023) [6] и Little B., Jugroot M. (2020) [7] демонстрируют интегрированный подход, сочетающий теоретические модели с численными методами и экспериментальными данными для достижения высокой точности и надежности конструкций. Эти исследования подчеркивают важность комплексного подхода и адаптации теоретических моделей к условиям реальной эксплуатации, что позволяет улучшить параметры конструкции и повысить их надежность.

Таким образом, теоретические подходы являются важной составляющей процесса проектирования и оптимизации силовых конструкций ракет-носителей. Они обеспечивают фундамент для дальнейшего численного моделирования и экспериментальной верификации, позволяя достичь высокой точности и надежности конструкций в условиях реальной эксплуатации.

Численные методы.

Численные методы, такие как конечно-элементный анализ (КЭА), играют ключевую роль в современном проектировании и оптимизации силовой конструкции ракет-носителей. Эти методы позволяют с высокой точностью моделировать поведение сложных конструктивных элементов под воздействием различных нагрузок, что крайне важно для обеспечения надежности и безопасности ракеты.

Конечно-элементный анализ (КЭА).

КЭА является основным инструментом численного анализа в инженерных приложениях. Метод основывается на дискретизации сложных геометрических объектов на конечное число простых элементов (конечных элементов), для которых решаются уравнения механики в дискретной форме. Это позволяет моделировать поведение конструкций, учитывая сложные граничные условия и неоднородные материалы.

1. Моделирование геометрии и сетка конечных элементов: Первым шагом в КЭА является создание геометрической модели объекта и построение сетки конечных элементов. Для высокоточных расчётов выбирается плотная сетка, что позволяет точно моделировать сложную геометрию и локальные эффекты. К примеру, в работе Qin J. (2023) [10] использован КЭА для проектирования и проверки устойчивости конструкции спутниковой платформы, где сложная геометрия и локальные напряжения играют критическую роль.

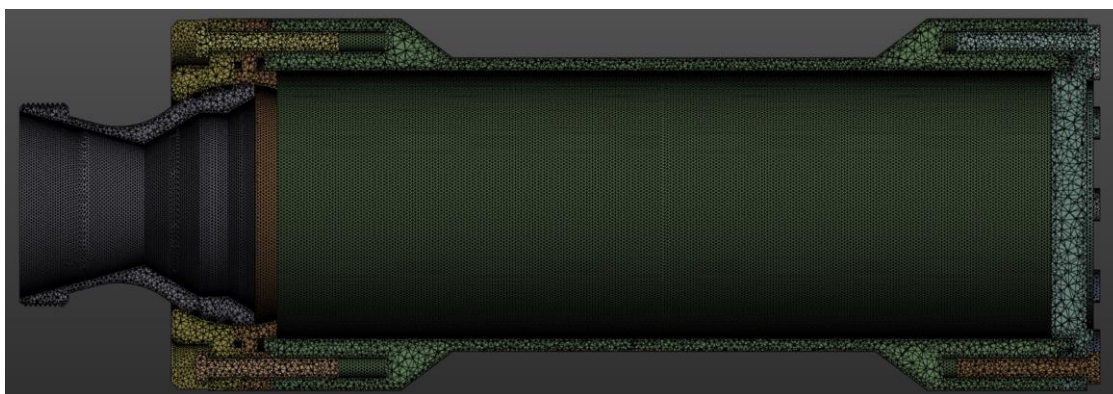


Рисунок 3 – Моделирование геометрии и сетка конечных элементов на примере твердотопливного ракетного двигателя

2. Применение материалов к модели: следующим этапом является выбор подходящих материальных моделей, которые описывают напряженно-деформированное состояние материалов под воздействием внешних нагрузок. Это могут быть линейные или нелинейные модели, учитывающие пластичность, ползучесть и другие эффектные механизмы материала. Работа Solomon G., AlemayehuAdde Y. (2020) [11] демонстрирует использование материальных моделей для анализа и оптимизации сопловой части ракетных двигателей.

3. Граничные условия и нагрузки: определение граничных условий и нагрузок является важным аспектом КЭА. Это включает в себя моделирование всех внешних сил, моментов, теплового воздействия и других факторов, влияющих на конструкцию. Правильное задание граничных условий позволяет создать точную модель рабочей среды ракеты.

4. Решение уравнений: заключительным этапом является решение уравнений метода конечных элементов, что позволяет получить распределения напряжений, деформаций и других параметров в конструкции. Современные численные методы и вычислительные мощности позволяют проводить расчеты даже для очень сложных задач.

Численные методы оптимизации.

Численные методы также используются для оптимизации конструкций, позволяя улучшать параметры, такие как масса, жесткость и устойчивость. Методы численной оптимизации включают, но не ограничиваются следующими подходами:

1. Генетические алгоритмы и эволюционные методы: Эти методы основываются на принципах естественного отбора и эволюции для нахождения оптимальных решений среди большого числа возможных вариантов. Работа Ghosh A. (2020) [12] показывает применение эволюционных методов для двухцелевой оптимизации твердотопливных ракетных моторов.

2. Методы градиентного спуска: Эти методы используются для нахождения локальных минимумов или максимумов целевой функции путем итеративного изменения параметров конструкции в направлении наибольшего убывания или возрастания функции.

Такие методы часто применяются для улучшения аэродинамических характеристик и минимизации массы ракеты.

Современные исследования активно применяют КЭА и другие численные методы для проектирования и оптимизации ракет-носителей. Например, в работе Little B., Jugroot M. (2020) [7] были использованы численные методы для проектирования гибридной системы пропульсии малых космических аппаратов. КЭА помогло оценить тепловые и механические нагрузки на конструкцию, что обеспечило высокую надежность и эффективность системы.

Еще один пример — исследование Song J. (2021) [13], где численные методы использовались для изучения теплопередачи в системе регенеративного охлаждения двигателя на жидком кислороде и метане (LOX/LCH₄). Эти методы позволили не только улучшить тепловую защиту конструкции, но и оптимизировать параметры системы охлаждения для достижения максимальной эффективности.

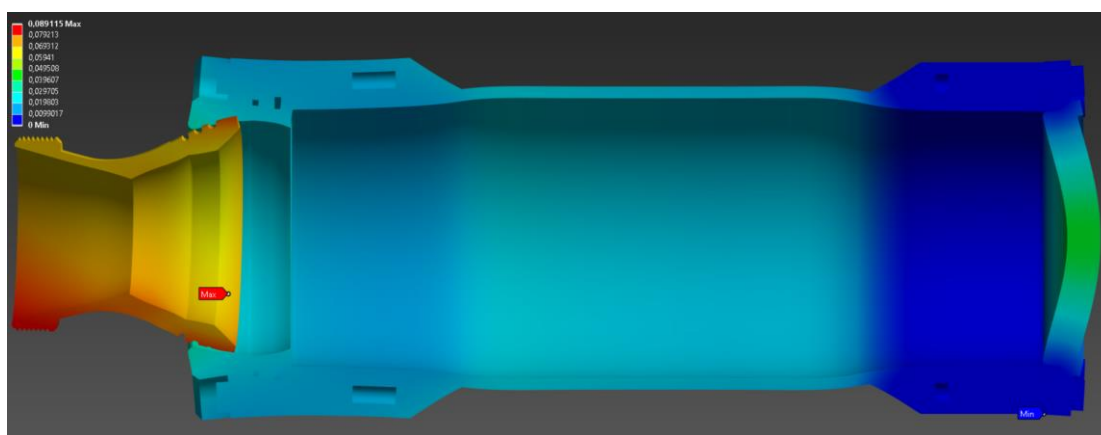


Рисунок 4 – Решение уравнений метода конечных элементов на примере эпюры деформаций твердотопливного ракетного двигателя

Результаты.

Основным преимуществом численных методов является их высокая точность и способность моделировать сложные геометрии и нагрузки, которые сложно учесть в аналитических моделях. Кроме того, численные методы позволяют проводить параметрические исследования и оптимизировать конструкции по множеству критериев.

Однако численные методы обладают и недостатками. Они требуют значительных вычислительных ресурсов и времени на проведение расчетов, особенно для сложных моделей с высокой детальностью. Кроме того, результаты численного анализа сильно зависят от качества созданной модели, выбора материальных параметров и граничных условий.

Таким образом численные методы, в частности конечно-элементный анализ, являются незаменимыми инструментами в современном проектировании силовой конструкции ракет-носителей. Они позволяют точно моделировать поведение конструкций под воздействием различных нагрузок, что критически важно для обеспечения их надежности и безопасности. Примеры успешного применения численных методов в современных исследованиях подчеркивают их важность и эффективность в разработке и оптимизации ракетных систем.

Экспериментальные методы играют ключевую роль в проектировании верификации параметров силовой конструкции ракет-носителей. Эти методы включают проведение лабораторных и натурных испытаний для проверки и коррекции

теоретических и численных моделей. Экспериментальные исследования позволяют выявлять реальные механические и тепловые параметры конструкции, обеспечивая высокую надежность и безопасность ракетных систем.

Лабораторные испытания.

Лабораторные испытания проводятся для моделирования условий, приближённых к реальным эксплуатационным, в контролируемой среде. Они позволяют оценить поведение материалов и конструктивных элементов под различными типами нагрузок — механическими, тепловыми, вибрационными и др.

1. Механические испытания: включают статическое и динамическое тестирование материалов и компонентов для определения их прочностных характеристик. Например, испытания на растяжение, сжатие и кручение позволяют определить пределы прочности, модуль упругости, коэффициент Пуассона и другие параметры.

2. Тепловые испытания: проводятся для изучения теплового поведения материалов и систем тепловой защиты. В работе Song J. (2021) [13] ключевое внимание уделено теплопередаче в системе регенеративного охлаждения двигателя, что позволяет улучшить тепловую защиту конструкции.

3. Вибрационные испытания: включают тестирование на вибрационные нагрузки, возникающие при запуске и полёте ракеты. Эти испытания позволяют выявить резонансные частоты и оценить устойчивость конструкции к вибрациям.

Натурные испытания.

Натурные испытания включают испытания в условиях, максимально приближённых к реальным эксплуатационным. Это позволяет проверить работоспособность и поведение конструкции в штатных и аварийных ситуациях.

1. Полунатурные испытания: проводятся на специальных стендах и установках, имитирующих реальные условия полета ракеты. Например, работа Park Y. K. (2023) [4] демонстрирует экспериментальную проверку электрического насоса для небольшого двигателя на жидком топливе, что иллюстрирует важность полунатурных испытаний для верификации компонентов ракеты.

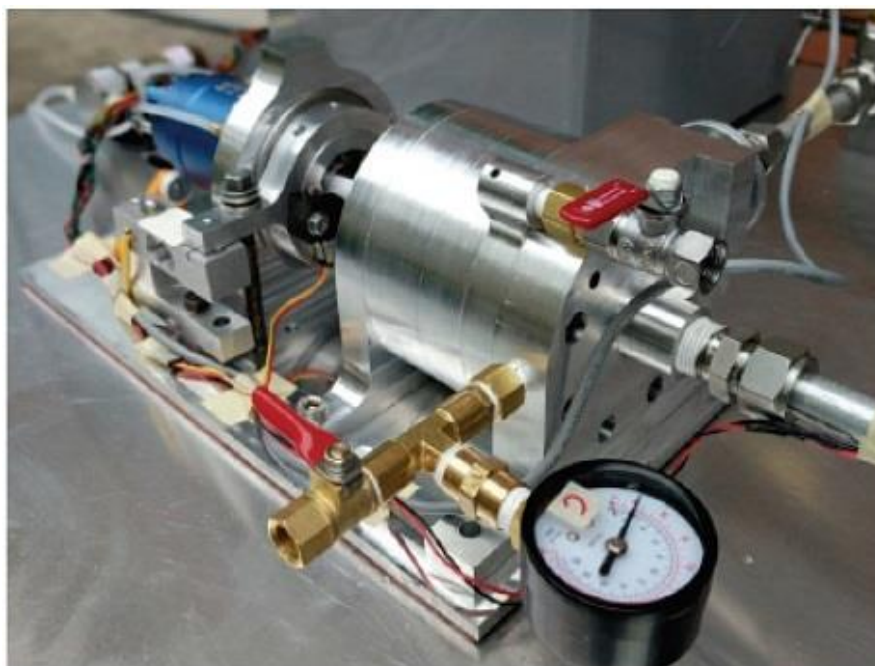


Рисунок 5 – Экспериментальная проверка электрического насоса для небольшого двигателя на жидком топливе [4]

2. Летные испытания: являются наиболее реалистичными и заключительными этапами тестирования. Летные испытания включают запуск ракеты и наблюдение за её поведением в реальных условиях полета, начиная с момента старта до достижения конечной точки. Такие испытания позволяют окончательно подтвердить рабочие характеристики конструкции и выявить возможные проблемы.

Деструктивные и неразрушающие методы контроля.

Развитие экспериментальных методов включает как деструктивное, так и неразрушающее тестирование.

1. Деструктивные методы: предполагают разрушение образца для выяснения его предельных характеристик. Работа Reinhold H. (2024) [5] рассматривает разрушительное тестирование цилиндров с вафельной структурой, что позволяет выявить максимальные нагрузки, при которых происходит разрушение конструкции.

2. Неразрушающие методы: используются для контроля и диагностики состояния материалов и элементов конструкции без их повреждения. Методы включают ультразвуковой контроль, рентгенографию, магнитное и вихревое тестирование.

Примером успешного применения экспериментальных методов является работа Mishra A. K. (2021) [14], в которой проведены натурные испытания двухступенчатой метеорологической ракеты. Испытания позволили скорректировать параметры конструкции и улучшить её характеристики.

Еще один пример — исследование Kierski J. (2023) [15], где был разработан и испытан система разделения твердотопливных ускорителей для ракеты ILR-33 Amber 2K. Эти эксперименты показали высокую надежность системы разделения и подтвердили её работоспособность в реальных условиях полета.



Рисунок 6 – Ракета носитель ILR-33 Amber 2K [15]

Обсуждение.

Основным преимуществом экспериментальных методов является их высокая точность и достоверность, так как они базируются на реальных данных и условиях.

Экспериментальные исследования позволяют не только подтвердить теоретические модели, но и выявить новые явления и эффекты, которые невозможно предусмотреть численными методами.

Однако экспериментальные методы имеют и свои недостатки. Они часто требуют значительных финансовых и временных затрат, а также сложного оборудования. Кроме того, проведение некоторых видов испытаний может быть ограничено из-за сложностей создания реальных условий полета в лабораторной среде.

Таким образом экспериментальные методы являются неотъемлемой частью процесса проектирования и верификации параметров силовой конструкции ракет-носителей. Лабораторные и натурные испытания, а также деструктивные и неразрушающие методы контроля, обеспечивают высокую точность и надежность конструкции, подтверждая её работоспособность в реальных условиях эксплуатации. Современные исследования подчеркивают важность комплексного применения экспериментальных методов для достижения максимальной эффективности и безопасности ракетных систем.

Современные исследования, такие как работы Mathesius K. J. (2023) [6] и Little B., Jugroot M. (2020) [7], показывают, что интеграция различных методов и использование новых материалов и технологий могут значительно повысить эффективность проектирования силовых конструкций ракет. Инновационные подходы, такие как биомодальное проектирование (Ghosh A. et al., 2020) [12] и новые системы отделения твердотопливных ускорителей (Kierski J. 2023) [15], являются перспективными направлениями для дальнейших исследований.

Заключение.

В данной статье проведен всесторонний обзор существующих методик расчета параметров силовой конструкции ракет-носителей, включающий теоретические, численные и экспериментальные подходы. Теоретические методы, основанные на классических механических моделях и методах оптимизации, обеспечивают фундаментальные знания и первоначальную оценку конструкций. Численные методы, такие как конечно-элементный анализ (КЭА), позволяют детализировано моделировать сложные геометрии и нагрузки, обеспечивая высокую точность расчетов и возможность проведения параметрических исследований и оптимизации. Экспериментальные методы, включающие лабораторные и натурные испытания, а также деструктивные и неразрушающие методы контроля, предоставляют реальные данные для верификации моделей и подтверждения работоспособности конструкций в условиях, приближенных к реальным эксплуатационным.

Каждый из рассмотренных подходов имеет свои преимущества и недостатки. Теоретические методы, хоть и дают общие представления о поведении конструкции, могут быть ограничены в точности и применимости к сложным системам. Численные методы предлагают высокую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов и грамотного задания граничных условий. Экспериментальные методы, несмотря на их высокую достоверность, часто являются дорогостоящими и трудоемкими.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Комплексное применение теоретических, численных и экспериментальных методов является наиболее эффективным и надежным подходом к проектированию и расчету параметров силовой конструкции ракет-носителей.

2. Современные исследования активно разрабатывают и совершенствуют методы интеграции различных подходов, что позволяет достичь более высоких характеристик прочности, жесткости и надежности конструкций.

3. Постоянное развитие численных методов и увеличение вычислительных мощностей открывают новые возможности для моделирования и оптимизации сложных конструкций при сокращении времени и затрат на разработки.

4. Экспериментальные исследования, такие как работы Reinhold H. (2024) [5] и Park Y. K. (2023) [4], подтверждают необходимость и значимость проведения натурных и лабораторных испытаний для верификации расчетных моделей и улучшения параметров конструкции.

Таким образом, для повышения надежности и эффективности ракет-носителей необходимо продолжать развитие и оптимизацию интегрированных подходов к расчету параметров силовой конструкции, опираясь на последние достижения теоретических, численных и экспериментальных методов. Это обеспечит создание более надежных и безопасных систем, способных выдерживать сложные эксплуатационные нагрузки и условия современных космических миссий.

Благодарность. Данное исследование финансируется Аэрокосмическим комитетом Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан (ИРН проекта: BR 203002/0223).

ЛИТЕРАТУРА

[1]Niederstrasser C. G. The small launch vehicle surveys a 2021 update (The rockets are flying) //Journal of Space Safety Engineering. – 2022. – Т. 9. – №. 3. – С. 341-354.

[2]Kulu E. Small launchers-2021 industry survey and market analysis //Kepler Communications. – 2021.

[3]Yan H., Zhang X. Design and optimization of a novel supersonic rocket with small caliber //Journal of Industrial & Management Optimization. – 2023. – Т. 19. – №. 5.

[4]Park Y. K. et al. Design and Verification of Electric Pump for Small LOX/Methane Rocket Engine //International Journal of Aeronautical and Space Sciences. – 2023. – Т. 24. – №. 3. – С. 955-969.

[5]Reinhold H. et al. Analysis, Optimization, and Destructive Testing of Machined Isogrid Cylinders for Small Scale Rocket Airframes //AIAA SCITECH 2024 Forum. – 2024. – С. 0561.

[6]Mathesius K. J. Integrated Design of Solid Rocket Powered Vehicles Including Exhaust Plume Radiant Emission: Massachusetts Institute of Technology, 2023.

[7]Little B., Jugroot M. Bimodal propulsion system for small spacecraft: Design, fabrication, and performance characterization //Journal of Spacecraft and Rockets. – 2020. – Т. 57. – №. 4. – С. 707-719.

[8]Pal Y. et al. Review on the regression rate-improvement techniques and mechanical performance of hybrid rocket fuels //FirePhysChem. – 2021. – Т. 1. – №. 4. – С. 272-282.

[9]Foster K. et al. Design and integration of a high-powered model rocket-I //AIAA Scitech 2020 Forum. – 2020. – С. 0145.

[10] Qin J. et al. Frequency Design and Test Verification of CAST2000 Small Satellite Platform //2023 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). – IEEE, 2023. – С. 1096-1102.

[11] Solomon G., AlemayehuAdde Y. Design and Analysis of Rocket Nozzle //IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) Vol. – 2020. – Т. 10.

[12] Ghosh A. et al. A large-scale bi-objective optimization of solid rocket motors using innovization //2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). – IEEE, 2020. – С. 1-8.

[13] Song J. et al. Study on the heat transfer characteristics of regenerative cooling for LOX/LCH₄ variable thrust rocket engine //Case Studies in Thermal Engineering. – 2021. – Т. 28. – С. 101664.

[14] Mishra A. K. et al. Conceptual design and analysis of two stage sounding rocket //International Journal of Universal Science and Engineering. – 2021. – Т. 7. – №. 1. – С. 52-72.

[15] Kierski J., Pazik A., Cieśliński D. Solid Rocket Boosters Separation System Development for the ILR-33 Amber 2K Rocket //Transactions on Aerospace Research. – 2023. – Т. 2023. – №. 3. – С. 16-27.

Арман Комекбаев, докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, Komekbayev.arman@gmail.com

Марат Нургужин, т.ғ.д., профессор, «Ұлттық ғарыштық зерттеулер және технологиялар орталығы» АҚ, Алматы, Қазақстан, Nurguzhin.m@spaceres.kz

Куаныш Алипбаев, PhD, қауымдастырылған профессор, Energo University, Алматы, Қазақстан, k.alipbayev@aes.kz

АСА ЖЕҢІЛ КЛАСТЫ ЗЫМЫРАН ТАСЫҒЫШТАРДЫҢ ҚУАТ КОНСТРУКЦИЯСЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЕСЕПТЕУДІҢ ҚОЛДАНЫСТАҒЫ ӘДІСТЕРІН ТАЛДАУ

Андатпа. Соңғы жылдары зымыран тасығыштарды жобалаудың күрделілігі мен талаптарының өсуі байқалды, бұл олардың қуат құрылымының параметрлерін есептеу әдістерін үздіксіз жетілдіруді өзекті етеді. Заманауи зерттеулер конструкциялардың беріктігі мен тұрақтылығын бағалауға мүмкіндік беретін теориялық, сандық және эксперименттік әдістерді әзірлеуге және қолдануға бағытталған.

Мақалада зымыран тасығыштардың қуат дизайнының параметрлерін есептеудің әртүрлі тәсілдеріне жан-жақты шолу жасалды. Классикалық механикалық модельдерді және ақырлы элементтерді талдауды (СЕА) қолдану сияқты дәстүрлі әдістерге де, соңғы басылымдар мен Ғылыми жобаларда ұсынылған инновациялық әдістерге де назар аударылады. Бұл тәсілдердің теориялық аспектілері де, практикалық қолданылуы да талданады.

Қазіргі заманғы зымыран тасығыш жобаларында әртүрлі әдістерді сәтті қолданудың негізгі мысалдары келтірілген. Конструкциялардың жоғары дәлдігі мен сенімділігіне қол жеткізуге мүмкіндік беретін теориялық, сандық және эксперименттік әдістерді біріктіретін жұмыстарға ерекше назар аударылады. Әр техниканың артықшылықтары мен кемшіліктері, сондай-ақ оларды оңтайландыру мүмкіндіктері талқыланады.

Әртүрлі әдістердің күшті және әлсіз жақтары, сондай-ақ жақсы нәтижеге жету үшін оларды біріктірудің мүмкін жолдары талданады. Зымыран тасығыштардың күш құрылымын есептеу саласындағы одан әрі зерттеулер мен жақсартулар үшін перспективалық бағыттарға ерекше назар аударылды, бұл олардың күрделі пайдалану жағдайларында сенімділігі мен тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер. Зымыран тасығыштар, күш конструкциясы, есептеу әдістері, ақырлы элементтік талдау, теориялық модельдер, сандық әдістер, эксперименттік әдістер, дизайнды оңтайландыру, зертханалық сынақтар, табиғи сынақтар, деструктивті тестілеу, бұзбайтын бақылау, материалдардың беріктігі, құрылымның қаттылығы.

Arman Komekbayev, doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, Komekbayev.arman@gmail.com

Marat Nurguzhin, doctor of technical sciences, professor, JSC "National Center for Space Research and Technology", Almaty, Kazakhstan, Nurguzhin.m@spaceres.kz

Kuanysh Alipbayev, PhD, associate professor, Energo University, Almaty, Kazakh, k.alipbayev@aes.kz

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR CALCULATING PARAMETERS OF THE STRENGTH STRUCTURE OF ULTRA-LIGHT CLASS LAUNCH ROCKETS

Abstract. In recent years, there has been an increase in the complexity and requirements for the design of launch vehicles, making the continuous improvement of methods for calculating the parameters of their structural framework particularly relevant. Modern research focuses on the development and use of theoretical, numerical, and experimental methods that allow for the assessment of the strength and stability of structures.

The article provides a comprehensive review of various approaches to calculating the parameters of the structural framework of launch vehicles. Attention is given to both traditional methods, such as the use of classical mechanical models and finite element analysis (FEA), and innovative methods presented in the latest publications and research projects. Both theoretical aspects and practical applications of these approaches are analyzed.

Key examples of the successful application of various methods in modern launch vehicle development projects are provided. Special attention is paid to works that combine theoretical, numerical, and experimental methods, allowing for high accuracy and reliability of the structures. The advantages and disadvantages of each method are discussed, as well as possibilities for their optimization.

The strengths and weaknesses of various methods are analyzed, along with possible ways of integrating them to achieve the best results. Particular attention is given to promising directions for further research and improvements in the field of structural framework calculations for launch vehicles, which will enhance their reliability and efficiency under complex operational conditions.

Keywords. Launch vehicles, structural framework, calculation methods, finite element analysis, theoretical models, numerical methods, experimental methods, structural optimization, laboratory testing, field testing, destructive testing, non-destructive testing, material strength, structural rigidity.

Получено: 30 май 2024 г.; принято: 03 сентябрь 2024 г.