

УДК 629.764.07/.08:539.4

<https://doi.org/10.33136/stma2019.01.028>

Д-р техн. наук В. С. Гудрамович, канд. техн. наук В. Н. Сиренко,
канд. техн. наук Д. В. Клименко, канд. техн. наук Ю. Ф. Даниев,
д-р физ.-мат. наук Э. Л. Гарт

МЕТОДОЛОГИЯ НОРМАТИВНЫХ ОСНОВ ОБОСНОВАНИЯ РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ СТАРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Приведены результаты разработки методологии и нормативных основ расчета ресурса конструкций стартовых сооружений для вывода на околоземную орбиту ракет-носителей различного типа. Стартовые комплексы созданы во многих странах мира (Европейский союз, Индия, Китай, Корея, Россия, США, Украина, Франция, Япония и др.). Для разных стран они имеют свою специфику, исходя из типа и мощности ракет-носителей, особенностей инфраструктуры (географии расположения комплекса, номенклатуры космических объектов, уровня развития ракетно-космической техники), задач, которые решаются при пусках, и др. Решение разнообразных вопросов, возникающих при создании нормативных основ обоснования ресурса стартовых комплексов, связано с необходимостью рассмотрения сложных задач прочности и ресурса неоднородных элементов конструкций стартовых комплексов и конструкций ракетно-космической техники. Стартовые комплексы – совокупность технологически и функционально взаимосвязанных подвижных и стационарных технических средств, средств управления и сооружений, предназначенных для обеспечения и проведения всех видов работ с ракетами космического назначения. Стартовый стол, включающий в себя опорную раму, облицовку газохода и закладные элементы для крепления рамы, является одной из основных составных частей пусковой установки и во многом определяет ресурс стартового комплекса. Указаны основные достижения ученых Украины в области прочности и ресурса с учетом специфики различных отраслей техники. Отмечено, что физическая нелинейность материала и статистические подходы определяют расчет прочности ресурса. Сформулированы основные методологические этапы расчета ресурса конструкции стартового комплекса. Предельным ресурсом стартового комплекса предложено считать критическое время работы или число циклов (пусков) за это время, после проведения которых в опасных зонах несущих элементов достигаются заданные предельные состояния: критические трещины, разрушение, недопустимые пластические деформации, потеря устойчивости, развитие коррозионных повреждений и др. Дана классификация нагрузок на стартовые комплексы. Ресурс стартового комплекса связан с определением числа пусков. Используется понятие мало- и многоцикловая усталость. При создании норм прочности и основ расчета ресурса целесообразны привлечение современных методов технической диагностики, в частности голографической интерферометрии и акустической эмиссии, и разработка быстросействующих схем численных методов для оперативных расчетов при отработке проектируемых систем.

Ключевые слова: классификация нагрузок и повреждений, ударно-волновые, акустические, тепловые нагрузки, малоцикловая усталость, иерархический подход при классификации, проекционно-итерационные схемы численных методов.

Наведено результати розроблення методології і нормативних основ розрахунку ресурсу конструкцій стартових споруд для виведення на навколосезну орбіту ракет-носіїв різного типу. Стартові комплекси створено у багатьох країнах світу (Європейський Союз, Індія, Китай, Корея, Росія, США, Україна, Франція, Японія та ін.). Для різних країн вони мають свою специфіку, зважаючи на тип і потужність ракет-носіїв, особливості інфраструктури (географію розміщення комплексу, номенклатуру космічних об'єктів, рівень розвитку ракетно-космічної техніки), завдань, які вирішують під час пусків, та ін. Вирішення різних питань, що виникають під час створення нормативних основ обґрунтування ресурсу стартових комплексів, пов'язане з потребою розглядати складні завдання міцності і ресурсу неоднорідних елементів конструкцій стартових комплексів і конструкцій ракетно-космічної техніки. Стартові комплекси – сукупність технологічно і функціонально взаємозв'язаних рухомих і стаціонарних технічних засобів, засобів керування і споруд, призначених для забезпечення усіх видів робіт з ракетами космічного призначення. Стартовий стіл, до складу якого входять опорна рама, облицювання газоходу і закладні елементи для кріплення рами, є однією з основних складових частин пускової установки і значною мірою визначає ресурс стартового комплексу. Зазначено основні досягнення вчених України в галузі міцності і ресурсу, враховуючи специфіку різних галузей техніки. Відзначено, що фізична нелінійність матеріалу і статистичні підходи визначають розрахунок міцності ресурсу. Сформульовано основні методологічні етапи розрахунку ресурсу конструкції стартового комплексу. Граничним ресурсом стартового комплексу запропоновано вважати критичний час роботи або кількість циклів (пусків) за цей час, після проведення яких у небезпечних зонах несучих елементів досягаються задані граничні стани: критичні тріщини, руй-

нування, недопустимі пластичні деформації, втрата стійкості, розвиток корозійних пошкоджень та ін. Подано класифікацію навантажень на стартові комплекси. Ресурс стартового комплексу пов'язаний з визначенням кількості пусків. Використано поняття мало- і багатоциклової втоми. Створюючи норми міцності й основи розрахунку ресурсу, доцільно залучати сучасні методи технічної діагностики, зокрема голографічну інтерферометрію й акустичну емісію, і розробляти швидкодійні схеми числових методів для оперативних розрахунків під час відпрацювання проєктованих систем.

Ключові слова: класифікація навантажень і пошкоджень, ударно-хвильові, акустичні, теплові навантаження, малоциклова втома, ієрархічний підхід до класифікації, проєкційно-ітераційні схеми числових методів.

This article contains results of methodology and standards development for life prediction of launch site structures to launch various types' launch vehicles into near-earth orbit. Launch sites have been built in various countries of the world (European Union, India, China, Korea, Russia, USA, Ukraine, France, Japan, etc.). In different countries they have their own characteristics, depending on the type and performance of the launch vehicles, infrastructure features (geography of the site, nomenclature of the space objects, development level of rocket and space technology), problems that are solved during launches, etc. Solution of various issues, arising in the process of development of the standards for justification of launch site life is associated with the requirement to consider complex problems of strength and life of nonuniform structural elements of launch sites and structures of rocket and space technology. Launch sites are the combination of technologically and functionally interconnected mobile and fixed hardware, controls and facilities, designed to support and carry out all types of operations with integrated launch vehicles. Launch pad, consisting of the support frame, flue duct lining and embedded elements for frame mounting, is one of the principal components of the launcher and to a large extent defines the life of the launch site. Main achievements of Ukrainian scientists in the field of strength and life are specified, taking into account the specifics of various branches of technology. It is noted that the physical nonlinearity of the material and statistical approaches determine the strength analysis of useful life. Main methodological steps of launch site structures life prediction are defined. Service limit of launch site is suggested to be the critical time or the number of cycles (launches) over this period, after which the specified limiting states are achieved in the dangerous areas of the load-bearing elements: critical cracks, destruction, formation of unacceptable plastic deformations, buckling failure, corrosion propagation, etc. Classification of loads acting on the launch sites is given. The useful life of launch site is associated with estimation of the number of launches. Concept of low and multiple-cycle fatigue is used. Developing strength standards and useful life calculation basis, it is advisable to use modern methods of engineering diagnostics, in particular, holographic interferometry and acoustic emission, and to develop the high-speed circuits of numerical procedures for on-line calculations when testing the designed systems.

Keywords: classification of loads and failures; shock wave, acoustic and thermal loads; low-cycle fatigue; hierarchical approach in classification; projection-iterative schemes of numerical procedur.

Разработка методологии и нормативных основ расчета ресурса конструкций стартовых сооружений для вывода на околоземную орбиту ракет-носителей относится к первостепенным по актуальности задачам ракетно-космической техники (РКТ).

Стартовые комплексы (СК) разработаны во многих странах мира (Европейский союз, Индия, Китай, Корея, Россия, США, Украина, Франция, Япония и др.). Для различных стран они имеют свои особенности, исходя из мощности выводимых на орбиту ракет-носителей и их возможностей, инфраструктуры (связанной, в частности, с географией расположения СК, номенклатурой выводимых на орбиту космических объектов, уровнем развития РКТ), задач, которые решаются при пусках, и др. [1]. Это накладывает ограничения на номенклатуру задач, которые необходимо решать

при создании методологии нормативных основ обоснования ресурса СК. Укажем, что решение разнообразных вопросов, возникающих при создании этих нормативных основ, тесно связано с решением сложных задач прочности и ресурса неоднородных элементов конструкций СК и РКТ.

СК – совокупность технологически и функционально взаимосвязанных подвижных и стационарных технических средств, средств управления и сооружений, предназначенных для обеспечения и проведения всех видов работ с ракетами космического назначения (РКН) и (или) их составными частями с момента поступления РКН на стартовую позицию ракетно-космического комплекса (РКК) до их пуска, а при несостоявшемся пуске – до момента транспортирования со стартовой позиции СК.

На рис. 1–3 изображены некоторые из

стартовых комплексов.



Рис. 1. СК в виде морской платформы с подготовленной к пуску РКН «Зенит»



Рис. 2. СК Европейского союза с подготовленной к пуску РКН «Вега» (Французская Гвиана)

На этапе проектирования СК могут решаться следующие задачи:

- обоснование выбора проектного варианта при создании СК с заранее фиксированным сроком службы;
- обоснование выбора проектного варианта при создании СК с заранее фиксированным техническим ресурсом;
- обоснование выбора проектного варианта при создании СК с нефиксированными сроком службы и техническим ресурсом.



Рис. 3. СК космического центра Сичан (Китай) с подготовленной к пуску РКН CZ-5

Пусковая установка (ПУ) занимает центральное место в оборудовании СК и наряду с ракетами космического назначения является не менее важной составной частью ракетного комплекса. Именно совершенствование ПУ, во многом определяющих технический облик ракетных комплексов, позволило решать задачу обеспечения живучести. Стартовый стол (СС) является составной частью ПУ.

В периоды подготовки к старту и пуску РКН на СС возлагаются следующие основные функции:

- удержание РКН (через парковочную опору и отсек удержания);
- передача нагрузок от металлоконструкции РКН в момент пуска на монолит строительной конструкции стартового сооружения;
- отвод (совместно с газоходом) газовой струи двигательной установки (ДУ) первой ступени на безопасное расстояние от РКН при пуске;
- защита строительного сооружения газохода от воздействия высокотемпературного газового потока ДУ РКН при старте.

СС включает в себя следующие основные элементы: опорную раму, облицовку газохода, закладные элементы для крепления опорной рамы, комплект запасных частей и инструмента. Конструкция СС обеспечивает возможность его эксплуатации совместно со стартовым сооружением, системой пристартовых измерений, системой водяного охлаждения газохода. В качестве

прототипа СС на этапе проектирования могут быть взяты строительные конструкции.

Наиболее актуальной при проектировании ПУ для РКН является проблема прогнозирования и обеспечения их ресурса, что относится в первую очередь к СС. Подтверждение ресурса СС осуществляется путем проведения наземных испытаний в условиях нагружения элементов силовой конструкции СК.

К основным методологическим этапам расчета ресурса конструкции СК можно отнести следующие:

1. Классификация видов нагрузок.
2. Определение видов повреждений, вносимых в опасные элементы конструкции на различных этапах эксплуатации.
3. Выбор гипотез суммирования повреждений и критерия наступления предельного состояния.
4. Разработка подхода к определению числа пусков.

Расчеты по оценке ресурса для конкретного изделия традиционно проводятся с использованием конечно-элементного комплекса программ COSMOS/M, программ для расчета металлоконструкций, таких как NASTRAN, ANSYS, Software или других, по следующим основным шагам:

- определение нагрузок, действующих на элементы силовой конструкции, оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов и выбор наиболее опасных с точки зрения, в первую очередь, усталостных повреждений;
- выбор гипотезы суммирования повреждений и критерия наступления предельного состояния;
- определение ресурса силовой конструкции СС.

Актуальным является создание быстродействующих расчетных программ при оперативных расчетах в процессе отработки РКН.

Понятие ресурса имеет различные определения и содержание в зависимости от особенностей конструкций и эксплуатации объектов, которые изучаются. В особой мере это относится к конструкциям РКТ и СК.

Под предельным (физическим) ресурсом СК будем понимать критическое (предель-

ное) время работы τ_c или число циклов (пусков) за это время, по достижении которых в опасных зонах несущих элементов достигаются заданные предельные состояния: образование критических трещин различной физической природы, разрушение, недопустимые пластические деформации, потеря устойчивости, развитие коррозионных повреждений и др.

Основные достижения ученых Украины в области прочности и ресурса с учетом специфики различных отраслей техники отражены в ряде трудов институтов НАН Украины, из которых выделим [2, 3], и в [4–23], в которых, в частности, содержатся сведения о разработках в области прочности и ресурса конструкций РКТ в экстремальных условиях эксплуатации при нелинейных моделях деформирования материала и статистических подходах для обоснования ресурса. Именно эти понятия (физическая нелинейность, статистические подходы), определяющие основные особенности деформирования и предельных состояний элементов силовых конструкций СК и РКТ при эксплуатации, должны в первую очередь учитываться при изучении прочности и ресурса.

Отмечая методологические этапы расчета ресурса СК, сделаем некоторые замечания в связи с публикациями авторов статьи.

Вопросы классификации нагрузок рассмотрены в [14, 20]. К базовым составным частям СК, показанным на рис. 2, 3, относятся: башня обслуживания, пусковое устройство, в частности СС, кабель-заправочная колонна или мачта.

Виды повреждений, возникающих при эксплуатации техники в различных отраслях (авиация, кораблестроение, нефтегазовая техника, теплоэнергетическое и металлургическое оборудование, атомная энергетика, транспортное машиностроение), рассмотрены в вышеупомянутых сериях монографий [3]. Значительный фактический материал отражен в [19], где, в частности, большое внимание уделено деградации материалов вследствие воздействия эксплуатационных нагрузок (с приведением микрофрактограмм). При этом проводится анализ возникновения дефектов и особенно-

стей строения материала вблизи них. Информация о повреждениях материалов (в основном металлов и сплавов) в аварийных ситуациях приведена в [24].

Рассматривая вопросы классификации нагрузок, следует отметить некоторые особенности, связанные с эксплуатацией элементов СК [13–15, 20].

В общем случае можно ввести следующую классификацию воздействий:

– *статические (или квазистатические)* воздействия, которые не вызывают в конструкции значительных ускорений;

– *динамические воздействия*, которые вызывают значительные ускорения из-за своей значительной изменчивости во времени, близкой к основному тону колебаний;

– *постоянные воздействия*, которые оказывают влияние на конструкцию в течение всего срока ее службы;

– *переменные воздействия*, которые изменяют значение или направление в различные моменты времени;

– *кратковременные воздействия*, которые оказывают влияние на конструкцию в течение периода времени, значительно меньшего, чем срок эксплуатации;

– *длительные воздействия*, которые оказывают влияние на конструкцию в течение периода времени, соизмеримого со сроком эксплуатации;

– *особые воздействия*, возникающие при весьма маловероятных событиях;

– *фиксированные воздействия*, имеющие неизменное во времени распределение в пространстве;

– *свободные воздействия*, распределение которых по пространству изменяется во времени.

Рассмотрим некоторые виды воздействий, связанные с особенностью эксплуатации РН.

Ударно-волновые нагрузки

Рост тяги в процессе запуска ДУ по временному закону нарастания тяги $R_H = f(\tau)$, истечение продуктов сгорания топлива из сопел ДУ и их движение в газовой среде, ограниченной поверхностями газоходов, обуславливают супер-позицию и дифракцию волн сжатия, отходящих от

фронта раздела продуктов сгорания со средой. При этом развивается ударно-волновой процесс с избыточным давлением $\Delta P_{уд} = f(\tau)$ за волнами сжатия в среде и на поверхностях конструкций СС.

Акустические нагрузки

В полете на поверхности РН наиболее опасными являются возникающие локальные зоны пульсаций давления и акустического излучения. При старте весь РК и СС находятся в акустическом поле большой интенсивности. Уровни акустического давления определяются не только источниками турбулентных пульсаций в слое смешения струй ДУ с воздухом, но и возможным появлением автоколебательных процессов с концентрацией акустической мощности на отдельных дискретных частотах. Их природа может быть обусловлена процессами в камере сгорания струй ДУ с пусковой установкой, имеющей особенности (каналы, уступы и кромки на обтекаемых струями элементах конструкции).

Тепловые нагрузки

Элементы конструкций РКН и ПУ, кроме силового воздействия, подвергаются значительному тепловому воздействию, уровень которого определяется интенсивностью теплопередачи и высокой энтальпией продуктов сгорания топлив.

Для защиты локальных зон и отдельных агрегатов ПУ используется нанесение теплозащитных покрытий, однако основной способ снижения тепловых воздействий – ввод в струи ДУ за срезом сопел воды.

На рис. 4 показана зависимость предела прочности от температуры для некоторых сталей.

Рассмотрим некоторые виды повреждений.

Повреждения – несовершенства формы конструкций или структуры материала, возникающие в процессе эксплуатации. Очагами их развития часто являются дефекты изготовления и монтажа, характеризующие начальное состояние конструкций.

Повреждения можно разделить на силовые (механические) – разрывы, трещины, потеря устойчивости, искривления, расстройство соединений, абразивный износ и др.; температурные – коробление

и разрушение элементов при высоких температурах, хрупкие трещины при отрицательных температурах, повреждения защитных покрытий при нагреве; химические и электрохимические – коррозия металла и разрушение защитных покрытий и др.

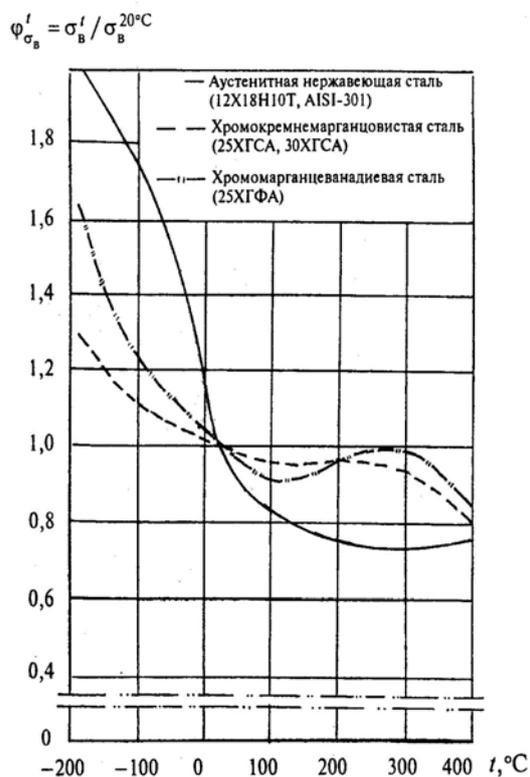


Рис. 4. Зависимость предела прочности от температуры для некоторых сталей

Повреждения от силовых воздействий часто возникают в результате несоответствия расчетных предпосылок действительным условиям работы конструкций и вызваны ошибками проектирования (неправильное определение нагрузок, внутренних усилий), отличием фактического НДС от расчетного вследствие упрощения и идеализации расчетной схемы, а также недостаточной изученности действительного характера воздействий.

Укажем, что критическим считается дефект, при наличии которого элементы конструкции функционально становятся непригодными, дальнейшее ведение работ по условиям прочности и устойчивости небезопасно.

При повышенных температурах в металле получают развитие диффузионные про-

цессы, под влиянием которых могут существенно изменяться структура и свойства металла. В этих условиях металл, в частности, разупрочняется, что может привести к аварийной потере прочности.

В условиях воздействия газов при повышенных и высоких температурах происходят активизация процессов электрохимической коррозии, усиление окисления и окалинообразование на поверхностях, соприкасающихся с активными средами.

Следует отметить, что указанные выше дефекты элементов конструкций и структуры материала носят зачастую локальный характер. Анализ многих аварийных ситуаций показывает, что при их возникновении именно локализация дефектов является наиболее опасной [16, 21, 24].

При выборе гипотезы суммирования повреждений и критерия наступления предельного состояния для оценки ресурса широко используется линейная гипотеза накопления повреждений, а в качестве критерия наступления предельного состояния принимается появление усталостной трещины в силовой конструкции.

Можно рассматривать следующий набор предельных состояний:

- потеря положения равновесия конструкции или ее части;
- местное хрупкое разрушение в ограниченном объеме или сечении конструкции;
- достижение предела текучести материала в некоторых сечениях конструкции;
- превращение конструкции в механизм;
- общая или местная потеря устойчивости;
- разрушение от усталости материала при многократном нагружении;
- деформирование конструкции, отрицательно влияющее на ее внешний вид и эффективность использования;
- местные повреждения, которые могут вызвать коррозию конструкции;
- вибрации (в частности, вследствие порывов ветра или движения механизмов).

Ресурс СК и СС связан с определением числа пусков. При решении этой достаточно сложной проблемы разрабатываются методы оценки ресурса конструкций, повреждаемых по механизму малоциклового усталости (МЦУ) [3, 6, 18, 24]. При этом

используется понятие усталости. Под усталостью будем понимать процесс постепенного накопления повреждений материала при повторно-переменных напряжениях, приводящий к изменению свойств, образованию трещин и разрушению. (Выносливость – свойство материала противостоять усталости).

Малоцикловой усталостью принято называть разрушение при повторных упругопластических деформациях. Такое разрушение происходит при числе циклов повторения $N < 10^5$.

При многоцикловой (классической) усталости усталостные повреждения происходят в основном при упругом деформировании.

МЦУ отличается от классической наличием макропластических деформаций в зоне излома. Как и при многоцикловой усталости, разрушение начинается в результате развития первоначально образовавшейся трещины. Однако механизм малоциклового разрушения значительно отличается от механизма усталостного разрушения, так как пластические деформации возникают в значительно больших объемах материала. В частности, различие сказывается в том, что сопротивление материалов МЦУ существенно зависит от их пластичности, для классической усталости такая зависимость проявляется слабо.

В машиностроении МЦУ часто определяет ресурс конструкций в связи с повторением циклов «запуск – работа – останов» [3, 6, 18, 24]. Это относится также к особенностям работы СК и СС при подготовке к пуску и пуске РН.

При проведении анализа циклической усталости можно использовать уравнение Мэнсона МЦУ [3, 6, 18]

$$e = \frac{1}{4N^{0,5}} \cdot \ln \frac{1}{1-\psi} + \frac{\sigma_{-1}}{E} \Rightarrow N = \left[\frac{\ln \frac{1}{1-\psi}}{4 \left(e - \frac{\sigma_{-1}}{E} \right)} \right]^2,$$

где e – упругопластическая деформация; N – число циклов до разрушения (ресурс); ψ – коэффициент уменьшения поперечного сечения, соответствующий достижению разрыва; σ_{-1} – предел выносливости

при симметричном цикле изменения напряжений; E – модуль упругости для начального участка диаграммы деформирования.

При сложном напряженном состоянии можно использовать модифицированное уравнение Мэнсона-Коффина

$$\Delta \varepsilon_i = \left[\ln \frac{1}{1-\Psi(t,T)} \right]^{0,6} N^{-0,6} + \frac{3,5[\sigma_{dl}(t,T) - \sigma_{mi}]}{E(T)} N^{-0,12},$$

где $\Delta \varepsilon_i$ – интенсивность размаха деформаций в опасной точке конструкции, приведенная к деформированному состоянию гладких образцов, используемых для определения стандартных характеристик материала σ_{dl} , E , Ψ ; N – ресурс; $\sigma_{dl}(t,T)$ – предел длительной прочности при максимальной температуре и времени действия расчетного режима; σ_{mi} – интенсивность среднего напряжения цикла, которое учитывается только в случае, если $\sigma_{mi} > 0$; $E(T)$ – модуль упругости при максимальной температуре цикла; $\Psi(t,T)$ – коэффициент поперечного сужения материала, зависящий от длительности нагружения t и максимальной температуры цикла T :

$$\Psi(t,T) = \Psi_0(T) t^m,$$

где $\Psi_0(T)$ – коэффициент поперечного сужения в исходном состоянии (при отнулевом цикле); m – постоянная, характеризующая скорость охрупчивания материала и определяемая по экспериментальным кривым $\Psi(t)$.

Для обеспечения запаса усталостной прочности можно вводить коэффициент запаса по ресурсу (КЗР), который имеет вид

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4,$$

где η_1 – учитывает соответствие структуры нагружения, принятой при расчете, структуре эксплуатационного нагружения; η_2 – учитывает степень опасности и контролируемости возможного разрушения элемента силовой конструкции, наступление предельного состояния которого влечет за собой отказ конструкции в целом; η_3 – принимает во внимание отклонения внешних

воздействующих факторов при эксплуатации от принятых при разработке (исследуемая конструкция может эксплуатироваться в других условиях); η_4 – учитывает разброс характеристик механических свойств материала элемента конструкции.

Уточненная при введении КЗР величина ресурса определяется следующим образом:

$$N_y = \frac{N}{\eta}.$$

Повышение вычислительной эффективности метода конечных элементов (МКЭ), который используется при расчетах элементов конструкций СК и РКТ, – актуальная задача компьютерной механики. Необходимость проведения большого объема расчетов в процессе проектирования и отработки вновь создаваемых объектов РКТ связана с необходимостью введения изменения конструктивного оформления, физико-механических свойств материалов (это особо важно при учете пластических деформаций, возникающих при высоких уровнях нагрузок, которые инициируют появление недопустимых деформаций или разрушение). Она обусловлена проведением большого числа экспериментов, что является неотъемлемой частью отработки объектов РКТ и корректирует изменение геометрии и при необходимости замену материала [9].

Использование при расчетах лицензированных пакетов программ имеет известные и часто труднопреодолимые особенности. К ним относятся: значительная дороговизна покупки и содержания таких пакетов, необходимость в дополнительных модулях, учитывающих усложненные особенности деформирования (вязкоупругость, пластичность, ползучесть и др.), значительные затраты времени при подготовке конечно-элементных моделей. Программы, по сути, являются «черным ящиком»: определены начальные и конечные этапы расчета, отсутствует возможность проследить и при необходимости корректировать промежуточные этапы.

Это делает для многих задач расчета прочности и ресурса актуальным разработ-

ку собственных расчетных программ, существенно уменьшающих компьютерное время расчета, что важно при оперативном проведении большого объема вычислений. Такие принципы расчета разрабатываются на основе проекционно-итерационных схем реализации численных методов: МКЭ, конечных разностей.

Основные идеи схем МКЭ изложены в [9, 22, 23]. Такие схемы могут быть также разработаны для метода локальных вариаций – численного метода решения вариационных задач, применимого, в частности, к решению задач локальной устойчивости оболочечных конструкций РКТ [25].

Нагрузки и механические характеристики материалов реальных элементов конструкций стартовых сооружений являются случайными величинами. В связи с этим нормы прочности должны содержать вероятностные модели факторов, характеризующих соответствующие процессы деформирования и разрушения [11, 17].

При эксплуатации стартовых сооружений возможно возникновение интенсивных внешних нагрузок (землетрясение, аварийные ситуации, воздействие агрессивных сред и др.), что следует учитывать при разработке соответствующих расчетных моделей [11].

Стартовые сооружения могут быть отнесены к категории крупных систем высокой степени сложности, которая характеризуется соответствующей иерархичной структурой элементов. При проведении классификации оборудования используется иерархический подход [11, 26].

При создании норм прочности и основ расчета ресурса и использовании их для реальных объектов необходимо привлечение современных методов технической диагностики, в частности использование голографической интерферометрии и акустической эмиссии [4, 5, 12].

Выводы

Определены основные методологические этапы обоснования ресурса конструкций стартовых сооружений для запуска ракет-носителей. В качестве ресурса принимается критическое время работы или чис-

ло циклов (пусков) за это время, после проведения которых в опасных зонах несущих конструкций элементов стартовых комплексов достаточно задать предельные состояния: критические трещины, недопустимые пластические деформации или несовершенства формы, локальная потеря устойчивости, развитие коррозионных повреждений и др. Предложенный методологический подход может быть использован при разработке элементов конструкций СК.

Список использованной литературы

1. Виды стартовых комплексов: ГП «КБ «Южное»: Режим доступа – <http://www.yuzhnoe.com/presscenter/media/photo/techique/launch-vehique>.
2. Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл: у 5 т. / Під заг. ред. акад. НАНУ Р. М. Кушніра. – Львів: Сполом, 2006–2011. Т. 1: Термомеханіка багатокомпонентних тіл низької електропровідності. – 2006. – 300 с. Т. 2: Механотермодифузія в частково прозорих тілах. – 2007. – 184 с. Т. 3: Термопружність термочутливих тіл. – 2009. – 412 с. Т. 4: Термомеханіка намагнічуваних електропровідних термочутливих тіл. – 2010. – 256 с. Т. 5. Оптимізація та ідентифікація в термомеханіці неоднорідних тіл. – 2011. – 256 с.
3. Прочность материалов и конструкций/ Под общ. ред. акад. НАНУ В. Т. Трощенко. – К.: Академперіодика, 2005. – 1088 с.
4. Бигус Г. А. Техническая диагностика опасных производственных объектов / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев. – М.: Наука, 2010. – 415 с.
5. Бигус Г. А. Основы диагностики технических устройств и сооружений / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. – М.: Изд-во МВТУ, 2018. – 445 с.
6. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
7. Гудрамович В. С. Устойчивость упругопластических оболочек / В. С. Гудрамович. – К.: Наук. думка, 1987. – 216 с.
8. Гудрамович В. С. Теория ползучести и ее приложения к расчету элементов конструкций / В. С. Гудрамович. – К.: Наук. думка, 2005. – 224 с.
9. Гудрамович В. С. Влияние вырезов на прочность цилиндрических отсеков ракетносителей при неупругом деформировании материала / В. С. Гудрамович, Д. В. Клименко, Э. Л. Гарт // Космічна наука і технологія. – 2017. – Т. 23, № 6. – С. 12–20.
10. Гудрамович В. С. Несущая способность и долговечность элементов конструкций / В. С. Гудрамович, Е. С. Переверзев. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
11. Гудрамович В. С. Створення методології нормативних основ розрахунку ресурсу конструкції стартових споруд космічних ракет-носіїв / В. С. Гудрамович, В. Н. Сіренко, Д. В. Клименко, Ю. Ф. Даниєв // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення й експлуатації машинобудівних конструкцій: матеріали 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 2018). – Львів : Кінпатрі ЛТД, 2018. – С. 5–7.
12. Гудрамович В. С. Голографічне та акустико-емісійне діагностування неоднорідних конструкцій і матеріалів: монографія / В. С. Гудрамович, В. Р. Скальський, Ю. М. Селіванов; За ред. акад. НАНУ З. Т. Назарчука. – Львів: Простір-М, 2017. – 492 с.
13. Даниев Ю. Ф. Космические летательные аппараты. Введение в космическую технику / Ю. Ф. Даниев, Л. В. Дейченко, В. С. Зевако и др.; Под общ. ред. А. Н. Петренко. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2007. – 456 с.
14. О классификации стартового оборудования ракетно-космических комплексов при обосновании норм прочности/ А. В. Дегтярев, О. В. Пилипенко, В. С. Гудрамович, В. Н. Сиренко, Ю. Ф. Даниев, Д. В. Клименко, В. П. Пошивалов // Космічна наука і технологія. – 2016. – Т. 22, №1.– С. 3–13.
15. Кармишин А. В. Основы отработки ракетно-космических конструкций: монография / А. В. Кармишин, А. И. Лиходед, Н. Г. Паничкин, С. А. Сухинин. – М.: Машиностроение, 2007. – 480 с.
16. Моссаковский В. И. Контактные взаимодействия элементов оболочечных кон-

струкций / В. И. Моссаковский, В. С. Гудрамович, Е. М. Макеев. – К.: Наук. думка, 1988. – 288 с.

17. Переверзев Е. С. Случайные сигналы в задачах оценки состояния технических систем / Е. С. Переверзев, Ю. Ф. Даниев, Г. П. Филей. – К.: Наук. думка, 1992. – 252 с.

18. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин / Отв. ред. Н. А. Махутов. – М.: Либроком, 2008. – 576 с.

19. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Довідн. посібн. у 8 т. / За ред. акад. НАНУ З. Т. Назарчука. Т. 1. Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів. – Львів: Простір-М, 2016. – 360 с.

20. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: монография / Под ред. И. В. Бармина. – М.: Полиграфикс РПК, 2005. – Кн. 1. – 412 с.; 2006. – Кн. 2. – 376 с.

21. Hudramovich V. S. Contact mechanics of shell structures under local loading / V. S. Hudramovich // *International Applied Mechanics*. – 2009. – Vol. 45, № 7. – P. 708–729.

22. Hudramovich V. Electroplastic deformation of nonhomogeneous plates / V. Hudramovich, E. Hart, S. Rjabokon // *I. Eng. Math.* – 2013. – Vol. 70, Iss. 1. – P. 181–197.

23. Hudramovich V. S. Mutual influence of openings on strength of shell-type structures under plastic deformation / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, D. V. Klymenko, S. A. Rjabokon // *Strenght of Materials*. – 2013. – Vol. 45, Iss. 1. – P. 1–9.

24. Мак-Ивили А. Дж. Анализ аварийных разрушений / Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2010. – 416 с.

25. Hart E. L. Projection-iterative modification of the method of local variations for problems with a quadratic functional / E. L. Hart, V. S. Hudramovich // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. – 2016. – Vol. 80, Iss. 2. – P. 156–163.

26. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Махо, И. Тохакара / Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

Статья поступила 23.02.2019