

Сравнительный анализ методологий обработки прочности изделий ракетно-космической и атомной отраслей промышленности

к.т.н. Владимирова С.А., Кондратенко М.А.

ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

+7 (495) 513-59-14, S.A.Vladimirov@tsniimash.ru,

+7 (495) 513-43-26, KondratenkoMA@tsniimash.ru

Аннотация. С целью систематизации подходов к расчетно-экспериментальному подтверждению прочности вновь создаваемых изделий ракетно-космической техники, использующих ядерные источники энергии, в статье дан анализ методологий наземной отработки прочности, применяемых в ракетно-космической и ядерной технике.

Ключевые слова: отработка прочности, нормативные документы, методы испытаний, характеристики материалов.

Введение

Одним из основополагающих требований к конструкциям ракетно-космической техники (РКТ) является требование обеспечения прочности, учитываемое на всех этапах проектирования, разработки и опытной эксплуатации создаваемых изделий.

Этапы проектирования изделий и последующей их экспериментальной отработки являются основными этапами создания конструкций РКТ и включают в себя:

- разработку нормативных документов, определяющих объем отработки прочности, необходимый и достаточный для обеспечения заданной в техническом задании (ТЗ) на изделие надежности;
- разработку методов испытаний конструкции на прочность и создание необходимой экспериментальной базы;
- определение физико-механических характеристик конструкционных материалов;
- разработку методов определения различного рода нагрузок и проведение расчетов нагрузок;
- разработку методов расчетов на прочность и оптимизации габаритно-массовых характеристик создаваемых изделий;
- проведение расчетов на прочность и оптимизацию габаритно-массовых характеристик создаваемых изделий;
- проведение экспериментальной отработки прочности создаваемых изделий и их СЧ.

Стоит, однако, понимать, что обозначенные этапы отработки прочности создаваемых изделий РКТ и их составных частей (СЧ) тесно взаимосвязаны друг с другом. Так, к примеру, разработка нормативной документации, включающей объемы проведения расчетно-экспериментальных работ, невозможна без понимания используемых методов проведения расчетов на прочность, а так же закладываемых в них критериев разрушения исследуемых конструкций и степеней их достоверности. Проведение экспериментальной отработки прочности изделия невозможно без знания типовых нагрузок, действующих на него на различных этапах его эксплуатации и методов их идентификации. Разработка расчетных схем, необходимых для проведения поверочных и оценочных расчетов, так же требует знания физико-механических характеристик конструкционных материалов и критериев их разрушения.

Приведенные примеры показывают суть проблематики отработки прочности любого рода конструкций (в том числе относящихся к ядерной энергетике) – необходимости использования существующего опыта по отработке прочности рассматриваемого класса изделий. В случае отсутствия такового, должны быть использованы наработки в смежных областях,

максимально приближенных к исследуемой.

Таким образом, обобщение накопленного опыта отработки прочности изделий на этапах их проектирования, разработки и опытной эксплуатации позволяет накапливать знания и применять их при создании новых, «революционных» конструкций, разрабатываемых на стыке различных областей машиностроения.

Основные положения наземной отработки прочности

Принципы отработки прочности изделий вырабатываются десятилетиями и строятся на основе анализа результатов их эксплуатации, как положительных, так и отрицательных.

Основным принципом отработки прочности конструкции является необходимость экспериментального подтверждения любых конструктивных решений на всех этапах ее создания [1, 2]. Испытания на прочность позволяют проводить проверку соответствия полученных экспериментальным путем коэффициентов запасов прочности конструкции показателям ее надежности, закладываемым в ТЗ на ее создание.

Проведение экспериментальной отработки, в принципе, возможно как в наземных условиях, так и в процессе летной эксплуатации создаваемых изделий. Одним из главных принципов отработки прочности является приоритет наземной отработки над летными испытаниями. В ракетно-космической отрасли отступления от данного правила возможны лишь в случае невозможности имитации расчетных случаев в наземных условиях. При возникновении подобных ситуаций коэффициенты запасов прочности создаваемых конструкций увеличивают. Во всех остальных случаях первичное проведение наземной отработки прочности конструкции является обязательным.

В ядерной энергетике, в силу требований обеспечения беспрецедентной безопасности персонала и защиты от радиационного заражения окружающей среды, указанный принцип отработки прочности к «горячим» конструкциям не применим. При этом стоит понимать, что под «лётной» отработкой прочности в данном случае понимается отработка конструктивных решений на работающем реакторе, что в принципе недопустимо. К любому пуску ядерной установки в части отработки ее прочности может быть применено только одно условие – требование проведения обязательного анализа влияния принятых конструктивных решений на статистику успешной эксплуатации ядерных энергоустановок (ЯЭУ).

На последнем примере мы приходим к еще одному важному принципу отработки прочности – необходимости вынесения окончательного суждения о прочности только после проведения испытаний натурных и штатных конструкций, что, применительно к ЯЭУ, возможно лишь в процессе «лётной» эксплуатации создаваемого изделия.

Цикл прочностной отработки изделий должен содержать следующие основные этапы:

- проведение экспериментальных исследований по обоснованию выбора расчетной схемы (математической модели) проектируемой конструкции;
- определение физико-механических характеристик конструкционных материалов;
- проведение конструкторско-доводочных (КДИ), зачетных (ЗПИ) прочностных испытаний и заводских: контрольно-технологических (КТИ) и контрольно-выборочных испытаний (КВИ).

На первом этапе устанавливается расчетная схема, определяется комплекс физико-механических характеристик, влияющих на прочность создаваемой конструкции. В случае создания принципиально новых изделий с применением новых материалов, неисследованных ранее конструктивных схем и условий нагружения, в обязательном порядке проводится ряд экспериментальных работ в обоснование выбора принятой расчетной схемы.

На втором этапе определяют физико-механические характеристики используемых конструкционных материалов в условиях нагружений, максимально приближенным к условиям эксплуатации создаваемых изделий, как в условиях радиационного облучения, так и без него.

В то время как требование проведения КТИ и КВИ относится к этапу подтверждения прочности серийно выпускаемых партиями узлов и агрегатов создаваемых конструкций и

применительно к единичным деталям является необязательным, проведение КДИ и ЗПИ являются основными этапами отработки прочности вновь разрабатываемых изделий ракетно-космической и ядерной отраслей.

На этапе КДИ подтверждается прочность ранее не отработывавшихся силовых узлов и агрегатов исследуемых конструкций (трубопроводы, сосуды внутреннего давления из новых конструкционных материалов, силовые рамы конструкций и многое другое). В случае обнаружения недостаточных запасов прочности конструкция дорабатывается, и правится, при необходимости, принятая за основу расчетная схема. На этапе КДИ подтверждается правильность принятых конструкторских решений, проверяется достоверность принятых методов расчета на прочность, дорабатываются методы определения нагрузок и, тем самым, заканчивается этап проектирования изделия.

Этап ЗПИ проводится в подтверждение запасов прочности, обоснованных на этапе КДИ, с целью допуска создаваемого изделия к проведению лётных испытаний. Также на этапе ЗПИ определяются фактические запасы прочности конструкции, без знания которых невозможно проведение работ по оптимизации баланса запасов прочности и габаритно-массовых характеристик создаваемого изделия.

Нормативное обеспечение отработки прочности

Основным документом, определяющим идеологию и методологию отработки прочности, являются Нормы прочности создаваемого изделия. Нормы устанавливают требования, минимально необходимые для выдачи обоснованного заключения о прочности изделия.

Нормы прочности строятся на основе Норм и иных директивных положений, действующих для деталей и сборочных единиц создаваемого изделия. Такой подход позволяет аккумулировать в едином документе многолетний опыт в области создания и отработки соответствующих подсистем и учитывать особенности, присущие только создаваемой конструкции.

Нормы прочности должны содержать следующие основные разделы [1, 2, 4]:

- “Введение”, определяющее область применения Норм;
- “Термины и определения” основных понятий Норм;
- “Общие положения” допуска изделий к натурным (летным) испытаниям;
- “Требования к определению нагрузок”, включающие перечень и общие требования к методам расчета и определения действующих на изделие нагрузок;
- “Требования к методам проведения расчетов”, включающие методологию построения основных расчетных схем и соответствующих допустимых значений запасов прочности;
- “Требования к экспериментальной отработке” изделия.

С учетом и на основе Норм прочности составляется последующая документация, устанавливающая алгоритм прочностной отработки изделия. Основные требования к составу и содержанию такой документации для различных изделий излагаются в директивных документах соответствующих отраслей машиностроения.

Для изделий ракетно-космической отрасли основным директивным документом, регламентирующим процесс создания (исследования, разработки, экспериментальной отработки, изготовления опытных образцов, проведения летных испытаний), серийного производства, эксплуатации, обеспечения качества и надежности, является РК-11-КТ [3].

Для критического оборудования и трубопроводов ЯЭУ требования к проведению проектных, конструкторских, технологических, монтажных, эксплуатационных и ремонтных работ изложены в Правилах ПНАЭ Г-7-008-89 [4] и НП-044-03 [6], выполнение которых является обязательным в обеспечение выполнения требований положений по обеспечению безопасности ОПБ-88-97 [7] и НП-033-11 [8].

Порядок проведения автономных, комплексных и межведомственных испытаний изделий РКТ и их СЧ утверждается в разрабатываемых исполнителями программами экспериментальной отработки, включающих [1, 2]:

- перечень узлов и агрегатов создаваемого комплекса, подвергаемых испытаниям;
- цели и задачи испытаний (в том числе испытаний путем математического моделирования), а так же порядок и последовательность их выполнения;
- виды автономных и комплексных испытаний, включая огневые, прочностные, вибропрочностные, акустические, динамические, пневмогидравлические, ресурсные, механические и т.п. Количество изделий, подвергаемых автономным и комплексным испытаниям. Число испытаний;
- требования по обеспечению максимальной имитации реальных условий функционирования изделий при наземной отработке и проведению испытания изделий на предельно допустимых (экстремальных) режимах функционирования.

При этом стоит понимать, что требования, предъявляемые к содержанию программ экспериментальной отработки изделий РКТ, в полной мере применимы и к ЯЭУ, включая проведение экспериментальных обоснований основных проектных решений. При этом вопросы воссоздания и имитации аварийных ситуаций на ЯЭУ должны решаться с применением специальных методик расчета активной зоны, систем и оборудования ЯЭУ, а также верифицированного и аттестованного программно-математического обеспечения [8].

Методология проведения расчетов на прочность

Одним из обязательных этапов проектирования и отработки любого рода конструкций является проведение расчетов на прочность – анализа напряжений и деформаций, возникающих вследствие воздействия как внешних, так и внутренних температурно-силовых или иных нагрузок.

Основой для проведения анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) являются исходные данные по структуре деталей и сборочных единиц (ДСЕ) конструкции, физико-механическим характеристикам применяемых материалов, расчетным случаям и нагрузкам.

Данные по структуре ДСЕ изделия должны содержать чертежно-конструкторскую документацию с указанием применяемых материалов. Физико-механические характеристики материалов должны быть определены в соответствии действующими нормативными документами во всех диапазонах температур режимов эксплуатации создаваемого изделия.

При проведении расчетов следует учитывать наиболее неблагоприятное сочетание режимов эксплуатации создаваемого изделия с ЯЭУ, в том числе:

- максимальный и промежуточные режимы работы ядерного реактора (ЯР). При расчете на прочность учитываются нагрузки и температуры, связанные с рабочим процессом;
- режимы запуска, останова, нарушения нормальной работы и аварии ЯР. Учитываются забросы давления (в том числе, давления при гидравлическом ударе), забросы оборотов ТНА системы преобразования тепловой в электрическую энергию и резкие перепады температур;
- режим гидроиспытаний или гидроопрессовки ДСЕ изделий с ЯЭУ;
- режим технологических разгонных испытаний (для вращающихся элементов, роторов, дисков ТНА);
- режим транспортировки. Учитываются статические и динамические усилия, виброперегрузки и частоты, определяемые экспериментально при всех видах транспортировки;
- режим выведения и полёта изделий с ЯЭУ. При расчете на прочность учитываются инерционные силы.

Для каждого из режимов эксплуатации должны быть составлены расчетные схемы с определением мест приложения и величин локальных нагрузок, областей и законов изменения распределенных нагрузок и температурных полей, а также областей, подверженных радиационному облучению.

Для каждой из расчетных схем должен быть обоснован выбор метода решения систем

дифференциальных уравнений, описывающих НДС ДСЕ изделий РКТ с ЯЭУ. Методы и программное обеспечение, используемые для расчетов, должны быть верифицированы на основе сопоставления результатов расчетов типовых задач с теоретическими решениями и данными сопоставительных расчетов по другим методам и программам, используемым в практике ракетно-космической и ядерной техники или по верифицированным в установленном порядке программам.

В случае использования метода конечных элементов (МКЭ) должны быть указаны и обоснованы типы применяемых конечных элементов, а так же проведены работы по верификации достоверности полученных результатов путем сгущения конечно-элементных сеток.

В результате анализа НДС для каждой из расчетных схем должны быть определены запасы статической, длительной статической, мало – и много – цикловой, длительной циклической прочности и устойчивости. При проведении расчетов «горячих» ДСЕ ЯЭУ должны быть также учтены эффекты влияния радиационного облучения на физико-химические характеристики материалов и проведен сравнительный анализ запасов прочности с учетом и без этого влияния. По результатам проведенного анализа должно быть выдано заключение о прочности изделия.

Нормируемые запасы прочности

Запасы прочности характеризуют надежность узла и являются критериями сравнения напряженности создаваемого изделия с подобными объектами, удовлетворительно работающими в эксплуатационных условиях.

Нормы прочности регламентируют допустимые значения запасов статической, усталостной и длительной прочности основных деталей и узлов создаваемых изделий на всех этапах их разработки и эксплуатации.

Запасы прочности определяются для наиболее тяжелых условий работы изделий в наземных и летных условиях. Нормированные запасы должны обеспечиваться во всем диапазоне эксплуатационных режимов, включая расчетные аварийные.

Изделия РКТ

В ракетно-космической отрасли является обязательным определение запасов прочности по общим и местным напряжениям. Запас по местным напряжениям разрешается заменять запасом по деформациям. Так же допускается замена запасов по общим и местным напряжениям запасами по предельной несущей нагрузке и предельной деформации, полученными путем конечно-элементного моделирования процесса деформирования и разрушения конструкции [9, 10].

Под общими понимаются напряжения, возникающие в детали от действия силовых нагрузок вдали от мест крепления, стыков и других концентраторов напряжений, а также вдали от точек приложения сосредоточенных нагрузок.

При использовании конечно-элементных упругопластических расчетов в случаях, когда распределение напряжений неоднородно по сечению конструкции и трудно выделить общие напряжения, рекомендуется считать общими напряжения, осредненными по характерному сечению конструкции.

Под местными понимаются напряжения, возникающие в зонах краевого эффекта, стыков, креплений и других концентраторов напряжений и, как правило, быстро затухающие по мере удаления от этих зон, в том числе возникающие от неравномерного нагрева детали.

Нормы прочности изделий РКТ определяют следующие запасы [1, 2]:

- *Запас статической прочности по напряжениям* $K_m = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}}$, где: σ_B – предел прочности материала детали при максимально возможной рабочей температуре детали с учетом времени работы на расчетном режиме в течение гарантийного ресурса работы.

В качестве σ_{\max} принимается наибольшее из значений главных напряжений σ_1 или интенсивности напряжений σ_i (по Мизесу).

Запасы статической прочности регламентируются как по общим, так и по местным напряжениям.

- *Запас статической прочности по пределу текучести* для деталей, деформативность которых должна быть ограничена, $K_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}}$, где: σ_T – предел текучести материала при рабочей температуре.

В качестве предела текучести допускается принимать условный предел текучести материала $\sigma_{0,2}$.

Запас по пределу текучести определяется по общим напряжениям.

- *Запас статической прочности по деформациям* $K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{np}}{\varepsilon_{i\max}}$, где: $\varepsilon_{i\max}$ – максимальная интенсивность суммарных деформаций (упругих, пластических и деформаций ползучести); ε_{np} – предельная деформация.

В качестве предельной деформации рекомендуется принимать относительное удлинение по диаграмме растяжения, соответствующее наибольшей нагрузке $\varepsilon_{np} = \varepsilon_B$, при этом допускаются иные оценки предельной деформации при наличии расчетно-экспериментального обоснования деформационных границ разрушения применяемого материала.

Запас прочности по деформациям вводится в первую очередь для деталей, в которых по условиям работы (например, огневая стенка камеры сгорания или зоны концентрации напряжений) неизбежно возникновение пластических деформаций.

- *Запас статической прочности по разрушающим нагрузкам* $K_B = \frac{P_{разр}}{P_{раб}}$, где: $P_{раб}$ – максимальное значение рассматриваемого силового фактора (усилие, давление и пр.), действующего на деталь в рабочих условиях; $P_{разр}$ – значение указанного силового фактора, приводящее к разрушению детали.

Рабочие давления принимаются в расчет с учетом гидроудара. Давление гидроудара и запас прочности по разрушающим нагрузкам определяются расчетным или экспериментальным путем.

При экспериментальном определении запаса прочности по разрушающим нагрузкам учет влияния многократности запусков двигателя производится путем испытания до разрушения после многократных нагружений до контрольных нагрузок (к примеру – посредством опрессовки).

- *Запас прочности по долговечности* вводится для ДСЕ, работающих многократно при пластических деформациях, определяемый отношением $K_N = \frac{N_{пред}}{N_{раб}}$, где: $N_{пред}$ – предельное число циклов нагружения, вызывающее разрушение или нарушение функционирования детали при работе двигателя на наиболее опасном с точки зрения циклического нагружения режиме; $N_{раб}$ – максимальное рабочее (эксплуатационное) число циклов.

Расчетное предельное число циклов следует определять по кривым малоциклового усталости, полученным для данного материала в условиях рабочего диапазона температур и рабочей среды.

- *Запас усталостной прочности* $K_V = \frac{\sigma_{aN}}{\sigma_{aЭ}}$ вводится для элементов, работающих в упру-

гой области и испытывающих в процессе работы переменные нагрузки, где: σ_{aN} – ограниченный предел выносливости, соответствующий максимально возможному числу циклов нагружения, определяемый при усталостных испытаниях с соответствующей асимметрией цикла на образцах при рабочей температуре с учетом концентрации напряжений; $\sigma_{aЭ}$ – амплитуда максимального переменного напряжения в детали, измеренная на работающем двигателе или рассчитанная.

При расчетном определении запасов необходимо использовать кривые усталости, определенные по результатам усталостных испытаний образцов материала детали в условиях, максимально соответствующих эксплуатационным.

- *Запас устойчивости рассчитывается для изделий, в которых в полетных или наземных испытаниях реализуются сжимающие усилия и определяется соотношением $K_y = q_{кр}/q$, где: $q_{кр}$ – критическое значение нагрузки, вызывающее потерю устойчивости детали, узла; q – максимальное эксплуатационное значение нагрузки.*

Изделия ядерной энергетики

С целью исключения возможности создания ядерного реактора с недостаточными запасами прочности, Нормы прочности ЯЭУ обязывают проведение расчетов оборудования и трубопроводов ЯР в два этапа:

- расчет по выбору основных параметров, при выполнении которого необходимо учитывать действующие на оборудование и трубопроводы давления и усилия затяжек болтов и шпилек;
- поверочный расчет, включающий расчет на статическую, циклическую и длительную прочность, расчет на устойчивость и сопротивление хрупкому разрушению, а так же прогрессирующее формоизменение и вибропрочность.

При расчетах по выбору основных размеров повышение пределов прочности и текучести под действием облучения не учитывают. Снижение характеристик пластичности, сопротивления хрупкому, усталостному, длительному статическому разрушению и ползучести вследствие влияния облучения учитывают на втором этапе при проведении соответствующих поверочных расчетов с использованием этих характеристик.

При проведении расчетов по выбору основных параметров вводится понятие номинального допускаемого напряжения $[\sigma]$, используемого в расчетах толщин стенок и допускаемых давлений эксплуатации трубопроводов и иных сосудов:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_m^T}{n_m}, \frac{R_{mt}^T}{n_{mt}}, \frac{R_{0.2}^T}{n_{0.2}} \right\},$$

где: R_m^T , $R_{0.2}^T$, R_{mt}^T – пределы прочности, текучести и длительной прочности за время t материала при максимально температуре работы изделия.

При этом основными нормируемыми запасами являются:

- *запас прочности по временному сопротивлению n_m ;*
- *запас прочности по пределу текучести $n_{0.2}$;*
- *запас прочности по пределу длительной прочности n_{mt} ;*
- *запас прочности по условным местным напряжениям при расчетах на циклическую прочность n_σ ;*
- *запас прочности по числу циклов при расчетах на циклическую прочность n_N .*

При проведении поверочных расчетов напряжения разделяют на подкатегории как общих, так и местных мембранных, изгибных и температурных напряжений, а так же напряжений компенсации для трубопроводов и оборудования, и средних напряжений растяжения для шпилек и болтов.

Для каждой из подгрупп напряжений на главных площадках формируются так называемые приведенные напряжения, численно равные удвоенному значению максимальных кас-

тельных напряжений $(\sigma)_{ij} = 2\tau_{ij}$, на основе которых для всех расчетных режимов эксплуатации строятся различные характеристики, значения которых нормируются по отношению к номинальным допускаемым напряжениям $[\sigma]$ для каждой из подгрупп составных частей ЯЭУ.

Основными нормируемыми характеристиками при проведении поверочных расчетов являются:

- приведенные напряжения $(\sigma)_{ij} = (\sigma_i - \sigma_j), i, j = \overline{1, 3}$;
- размах приведенных напряжений $(\sigma)_R = \{(\sigma)_{ij_{max}} - (\sigma)_{ij_{min}}\}_{max}$;
- амплитуда приведенных напряжений $(\sigma)_a = \frac{1}{2} \{(\sigma)_R\}_{max}$;
- приведенные деформации $(\varepsilon)_{ij} = (\varepsilon_i - \varepsilon_j), i, j = \overline{1, 3}$;
- размах приведенных деформаций $(\varepsilon)_R = \{(\varepsilon)_{ij_{max}} - (\varepsilon)_{ij_{min}}\}_{max}$;
- амплитуда приведенных деформаций $(\varepsilon)_a = (\sigma)_a / E$.

Изделия РКТ с ЯЭУ

Нормы прочности изделий РКТ с ЯЭУ должны учитывать наработки как ракетно-космической, так и ядерной отраслей промышленности. При этом совершенно очевиден тот факт, что подходы, применяемые при определении прочностных запасов двигателей ракетных конструкций, впрямую неприменимы к ядерной энергетике, и наоборот.

Современные ракетно-космические изделия – высоконапряженные конструкции, работающие в области высоких пластических деформаций и рассчитанные на работу в течение относительно короткого периода времени. Изделие РКТ с ЯЭУ – конструкция многократного использования с многолетним ресурсом работы в условиях жесткого рентгеновского и гамма облучений. Таким образом, при разработке Норм прочности изделий РКТ с ЯЭУ должны быть ужесточены требования к запасам прочности СЧ РКТ и учтены эффекты деградации физико-механических свойств материалов вследствие их облучения.

Действующие Нормы прочности ЯЭУ – нормы, регламентирующие запасы прочности для конструкций, работающих в наземных условиях и спроектированных с учетом необходимости обеспечения высокой степени безопасности. В условиях ограниченности возможностей современных ракетных носителей в части предельно допустимого веса выводимой полезной нагрузки, а также учитывая естественные ограничения, накладываемые на предельно допустимый вес изделий РКТ с ЯЭУ, требования к прочности СЧ ЯЭУ на орбите по отношению к наземным реализациям необходимо снижать.

Таким образом, при создании Норм прочности изделий РКТ с ЯЭУ должен быть достигнут оптимальный баланс запасов прочности и веса конструкции путем обобщения существующих наработок и тщательного определения прочностных коэффициентов.

В таблице 1 представлены ограничения, накладываемые Нормами прочности ЯЭУ на максимально допустимые расчетные значения приведенных напряжений подгрупп $(\sigma)_1, (\sigma)_2$ и их размаха $(\sigma)_R$ для наиболее ответственных узлов ядерного реактора [4]. Среднестатистический запас прочности по мембранным напряжениям $(\sigma)_1$ с учетом наличия различных коэффициентов ослабления (в таблице не приведены), составляет 2.5 по отношению к пределу прочности R_m^T .

Среднестатистический запас прочности по интенсивности напряжений для ответственных узлов создаваемых изделий РКТ составляет в среднем 1.5 [1, 2].

С целью сопоставления запасов прочности изделий РКТ и ЯЭУ, необходимо привести их к общему «знаменателю», взяв за основу, к примеру, запас прочности по временному сопротивлению R_m^T .

**Допустимые величины подгрупп напряжений основных узлов ЯР, регламентируемые
Нормами прочности ЯЭУ**

	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_2$	$(\sigma)_R$
Корпуса реакторов, парогенераторов и сосудов	$\min \left\{ \frac{R_m^T}{2.6}; \frac{R_{0.2}^T}{2.0} \right\}$	* 1.3	$(2.5 - R_{0.2}^T/R_m^T) R_{0.2}^T$, но не более $2R_{0.2}^T$
Трубопроводы			–
Компенсаторы			–
Болты и шпильки	$\frac{R_{0.2}^T}{2.0}$	–	–
Страховочные корпуса и защитные оболочки	$\min \left\{ \frac{R_m^T}{1.85}; \frac{R_{0.2}^T}{1.07} \right\}$	* 1.3	–

Для приведенных мембранных напряжений $(\sigma)_1$ имеем:

$$(\sigma)_{1max} = (\sigma_i - \sigma_j)_{max} = 2 \tau_{ijmax}$$

Ограничивающее неравенство для модуля отношения октаэдрического $\tau_{ijокт}$ к максимальному касательному напряжению τ_{ijmax} запишется следующим образом:

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \leq \left| \frac{\tau_{ijокт}}{\tau_{ijmax}} \right| \leq \frac{2\sqrt{2}}{3}$$

Для интенсивности напряжений $\sigma_{и} = \sigma_{max} = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{ijокт}$ получим:

$$\sqrt{3} \tau_{ijmax} \leq \sigma_{и} \leq 2 \tau_{ijmax} = (\sigma)_{1max} \approx \frac{R_m^T}{2.5}$$

Тогда, как видно из данных таблицы 1 и предыдущих выкладок, задаваемые Нормами прочности ЯЭУ коэффициенты запаса прочности по напряжениям $K_m = \frac{R_m^T}{\sigma_{и}} \geq 2.5$, в то время как регламентируемые для изделий РКТ запасы составляют в среднем 1.5 [1, 2].

Проведенный анализ показывает наличие разницы в типовых коэффициентах запасов прочности, регламентируемых соответствующими Нормами. Так, к примеру, Нормы прочности изделий ракетно-космической отрасли регламентируют допустимое максимальное значение характеристики напряженности конструкции в условиях статического нагружения в размере, не превышающем $\sim \frac{2}{3} \sigma_B$, где σ_B – предел прочности материала, из которого она состоит. Значение аналогичной характеристики для ЯЭУ – $\sim \frac{2}{5} \sigma_B$.

Различие нормируемых коэффициентов более чем в 1.5 раза легко объяснимо. Как уже отмечалось ранее, основной объем экспериментальной отработки конструкций должен приходиться на наземные испытания. Однако, в случае ЯЭУ, проведение испытаний до разрушения основных узлов и агрегатов изделий в условиях, соответствующим расчетным схемам, моделирующим напряженное состояние с учетом наличия радиационного облучения, не представляется возможным как на этапах КДИ, так и ЗПИ. Действительно, испытание активной зоны работающего реактора до разрушения, методом перегрева тепловыделяющих элементов или разрушения контуров охлаждения по понятным причинам неосуществимо. Испытание до разрушения ядерных «горячих» узлов и агрегатов неактивной зоны реактора потребовало бы решения сложнейших проблем обеспечения безопасности персонала и окружающей среды. Необходимость проведения многократных испытаний потребовала бы создания большого количества стендов, простаивающих 99% времени в режиме дезактивации, что экономически нецелесообразно.

В силу обозначенных ограничений для ДСЕ ЯЭУ возможно лишь проведение испытаний до разрушения в условиях отсутствия радиационного облучения, что противоречит требованию основного положения отработки прочности – проведению данного рода испытаний в условиях эксплуатации изделия. В то же время, наличие интенсивного нейтронного облучения приводит к значительной потере пластичности, а также снижению сопротивления усталостному разрушению на стадиях зарождения и развития трещин у конструкционных материалов, применяемых в ЯЭУ. Данный факт заставляет разработчиков проводить имитационные испытания на математических моделях, построенных с использованием верифицированного и аттестованного специального программно-математического обеспечения, а так же вводить повышенные запасы прочности, значения которых определяются накопленной статистикой эксплуатации данного типа изделий.

Более того, специальные требования к безопасности ЯЭУ заставляют разработчиков этих изделий регламентировать давления проведения процедур гидроопрессовки, превышающие применяемые в РКТ значения на 20 – 40 %, что, естественно, приводит к появлению повышенных остаточных напряжений и деформаций, наличие которых допускается лишь при подтвержденных расчетным или экспериментальным путем высоких коэффициентах запасов прочности конструкции.

В ракетно-космическом машиностроении ограничения на проведение КДИ и ЗПИ отсутствуют, что позволяет в полном объеме определять запасы по разрушающей нагрузке и проводить работы по оптимизации весовых и прочностных характеристик создаваемых конструкций. В тех же случаях, когда проведение натуральных испытаний нецелесообразно или неосуществимо, используется подход, применяемый в атомной энергетике – вводятся повышенные коэффициенты запасов прочности, применяемые в общем машиностроении. Так, к примеру, для сосудов, работающих в условиях длительного статического нагружения внутренним давлением, запас прочности по разрушающему давлению составляет, в среднем, 2.5, в то время как для обычных сосудов он принят равным ~1.5.

Обобщая, можно сказать, что коэффициенты запасов прочности ДСЕ РКТ и ЯЭУ являются сложными функциями накопленного опыта эксплуатации данного класса изделий, степени изученности физико-механических эффектов, возникающих в конструкциях под действием различного рода нагрузок, а также статистических разбросов качества изготовления исходных полуфабрикатов и изделий в целом.

Таким образом, вопросы определения уровней запасов прочности ракетно-космических конструкций с ЯЭУ требуют тщательного изучения и обобщения накопленной статистической информации и проведения большого объема расчетно-экспериментальных исследований на соответствующих этапах работ по созданию Норм прочности изделий РКТ с ЯЭУ.

Заключение

Сравнительный анализ методологий отработки прочности ядерных и ракетно-космических изделий показывает следующее:

- в ракетно-космической технике, в связи с высокими требованиями к минимизации габаритно-массовых характеристик создаваемых изделий и регламентируемыми нормативными документами низкими запасами прочности, принята методология экспериментального подтверждения нормируемых запасов всех деталей и узлов создаваемого изделия;
- в ядерной технике, в отличие от РКТ, наоборот, традиционно не предъявляются высокие требования к габаритно-массовым характеристикам создаваемых изделий, поэтому при проектировании закладываются высокие запасы прочности, что позволяет снизить требования к экспериментальной отработке прочности узлов создаваемых конструкций.

Таким образом, рациональное применение ядерных энергоустановок в ракетно-космической технике требует проведения большого объема расчетно-экспериментальных работ по оптимизации прочностных и габаритно-массовых характеристик ядерных реакторов и их систем.

Литература

1. Методы отработки прочности ракетно-космических комплексов / Под ред. В.Ф. Грибанова. М.: Машиностроение, 1995.
2. Основы отработки прочности ракетно-космических конструкций / А.В. Кармишин, А.И. Лиходед, Н.Г. Паничкин, С.Н. Сухинин. М.: Машиностроение, 2007.
3. Положение РК-11-КТ «О порядке создания, производства и эксплуатации (применения) космических комплексов». ФКА. 2011.
4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. 1986.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-008-89 с изм. № 1. ГОСАТОМНАДЗОР России. 1989.
6. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, для объектов использования атомной энергии. НП-044-03. Госатомнадзор России. 2003.
7. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ - 88/97. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). Госатомнадзор России. 1998.
8. Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок. НП-033-11. 2011.
9. Владимиров С.А., Кондратенко М.А. Требования современных методов расчета запасов статической прочности и механическим и прочностным характеристикам материалов ЖРД // Известия МГТУ «МАМИ» № 1(23), 2015, т. 4. – с. 42-48.
10. Владимиров С.А., Горохов В.Б., Трефилов С.И. и др. Прочность и ресурс жидкостных ракетных двигателей // Современные проблемы термовязкопластичности в прикладных задачах анализа конструкций и технологий высоких параметров. Труды VI школы-семинара. – М.: Университет машиностроения, 2013. – с. 41-58.