

УДК 593.3

Канд. техн. наук В.П. Семененко

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОСТЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОПОРНЫМИ ОСНОВАНИЯМИ

Рассмотрены направления, цели и задачи исследований нагруженности элементов тонкостенных конструкций. Применен системный подход и метод суперэлементов. Дано решение двух проблемных практических задач.

Розглянуто напрямки, цілі та завдання досліджень навантаженості елементів тонкостінних конструкцій. Застосовано системний підхід і метод суперелементів. Дано розв'язання двох проблемних практичних задач.

Directions, aim and problems of investigation of thin-walled constructions elements were considered. System approach and method of superelements were applied. Solutions of the two practical problems were provided.

Практически важными и всегда актуальными являются вопросы создания оболочечных конструкций, обладающих оптимальными массогабаритными и прочностными характеристиками. Их создание требует наличия адекватных условиям эксплуатации методик определения параметров силовых элементов конструкции, проверка прочности которых включает исследование их нагруженности, напряженно-деформированного состояния (НДС), устойчивости, несущей способности в статической и динамической постановках.

Вопросы соответствия расчетной схемы работы конструкции реальным условиям ее эксплуатации приводят к необходимости уточнения существующих методик исследования или постановке новых задач. Особую важность приобретают эти вопросы для авиационной и ракетно-космической техники (РКТ). В РКТ большинство конструкций представляют собой тонкостенные оболочки вращения (цилиндрические, сферические, конические), подкрепленные продольным и поперечным силовыми наборами.

В связи с совершенствованием конструкций предъявляемые к ним требования повышаются, уровень нагрузок растет, условия эксплуатации ужесточаются. Постоянно увеличивается количество и разнообразие расчетных случаев в аварийных ситуациях как в полетных условиях, так и при наземной эксплуатации конструкции, в частности при погрузочно-

разгрузочных работах, транспортировке, сейсмическом воздействии. Необходимость предсказания поведения конструкции в этих ситуациях, ее живучести, вопросы безопасности обслуживающего персонала и экологии окружающей среды требуют, с одной стороны, комплексного подхода к учету как можно большего количества конструктивных параметров и факторов реальных условий эксплуатации, а с другой стороны, более детальных исследований влияния каждого из них на выбор оптимальной конструкции, а в конечном итоге – выработки рекомендаций для предотвращения критических ситуаций.

При наземной эксплуатации конструкции наиболее распространенными видами ее нагружения являются поперечные нагрузки. Особого внимания заслуживают нагрузки, которые распределены не по всей поверхности оболочки, а на некоторой ее части, так называемые локальные нагрузки. При использовании в качестве опорных оснований ложементов оболочечная конструкция испытывает воздействие наиболее опасной для нее радиальной локальной нагрузки. Это локальная нагрузка не что иное, как реакция взаимодействия между ложементом и конструкцией. Она получила название "контактное давление". Распределенная по определенному закону на части поверхности конструкции нагрузка приводит к появлению в районе ее действия местных изгибных деформаций, претерпе-

вающих значительные изменения в окружном направлении. При малом участке распределения локальная нагрузка вызывает концентрацию НДС в силовых элементах конструкции. В предельном случае, когда участок распределения нагрузки стремится к нулю, действие этой нагрузки представляется в виде сосредоточенной силы. При этом изгибное состояние элемента конструкции в окружном направлении может иметь существенную зону распространения в продольном направлении.

Параметры изгибного состояния в окружном направлении необходимо складывать с параметрами изгибного состояния, полученного на основе балочной теории. В расчетной схеме "балка" предполагается, что контур тонкостенной конструкции не деформируется. Поперечное сечение конструкции – окружность до и после приложения внешней нагрузки. При действии локальных нагрузок поперечное сечение не является окружностью, а испытывает изгибные деформации в окружном направлении. Именно они определяют концентрацию (пики) напряжений в районе действия локальной нагрузки.

Местные изгибные деформации в окружном направлении определяются на основе расчетной схемы "кольцо с оболочкой". "Кольцо" – расчетная схема шпангоута. С помощью этой расчетной схемы можно ставить и решать задачи о локальном нагружении и концентрации НДС в силовых элементах тонкостенных конструкций.

Особо актуальны исследования локальных деформаций конструкций, имеющих большие радиусы по сравнению с другими конструкциями. С увеличением радиуса при использовании расчетной схемы "балка" расчетная жесткость конструкции увеличивается, а при использовании расчетной схемы "кольцо" – уменьшается. Увеличение и уменьшение жесткости описываются кубической зависимостью.

Для всестороннего исследования нагруженности необходимо рассматривать не только две вышеуказанные расчетные схемы, но и многие другие. Доминирующей является та расчетная схема, в основе которой определены жесткостные параметры

имеют наименьшее значение (наибольшую податливость).

При таком уточненном подходе по сравнению с балочным рассмотрением шпангоуты с оболочками оказываются "чувствительными" к различного рода факторам, которые имеются в реальных условиях наземной эксплуатации. Влияние факторов может оказаться настолько существенным, что для некоторых конструкций их параметры выбирают не из полетных (основных) условий, а из условий наземной эксплуатации. Это приводит к увеличению массы конструкции, что крайне нежелательно для летательных аппаратов.

Исследования нагруженности силовых элементов конструкции направлены на максимальное приближение расчетной схемы конструкции к схеме ее работы в реальных условиях эксплуатации. Это достигается путем одновременного учета по возможности большего количества конструктивных параметров и факторов в разнообразных условиях эксплуатации.

Целью исследований являлось создание комплекса инженерных методов расчета прочности и работоспособности оболочечных конструкций, позволяющего проводить оперативную (без существенных временных затрат) и достоверную оценку прочности элементов конструкции и конструкции в целом на различных стадиях эскизного и рабочего проектов РКТ, выбор проектно-конструкторских и оптимальных параметров РН, а при анализе аварийных ситуаций – выработку рекомендаций.

Цель исследований достигалась путем анализа постановок и использования на практике результатов решения ряда задач, которые возникли в процессе проектирования, создания, отработки и эксплуатации изделий в течение нескольких последних десятилетий. Рассматривая с позиций настоящего времени постановки, методы решения и практическую отдачу результатов решений указанных выше отдельных задач, представляется целесообразным выбрать из них наиболее интересные и существенные задачи, сделать новыми, более обобщающими постановки задач и на осно-

ве анализа их решений определить, обосновать область применения решений частных задач.

Основные задачи исследований:

– постановка задач для определения нагруженности элементов обобщенных моделей конструкций с комплексным учетом их параметров и факторов реальных условий эксплуатации;

– описание особенностей и трудностей решения поставленных задач, их отличие от традиционных задач;

– разработка путей и методов решения поставленных задач;

– разработка методик расчета нагруженности элементов конструкции;

– всесторонние исследования и анализ влияния различных параметров и факторов в совокупности и отдельности (частные и общие выводы об их влиянии на нагруженность элементов конструкции);

– постановка и решение задач оптимизации;

– подтверждение достоверности полученных результатов;

– разработка инженерных методов расчета прочности тонкостенных конструкций при их локальном нагружении.

Удовлетворение запросам практики настоящего времени достигалось путем решения комплекса задач. Некоторые из них имели общий характер, часть задач взаимосвязана, но решаться каждая из них должна была в определенной последовательности, поэтапно, от простой к более сложной.

В качестве первого этапа исследований была рассмотрена в статической постановке задача о нагруженности силовых элементов конструкции при ее наземной эксплуатации от воздействия поперечных локальных нагрузок.

Объектами исследований выбирались обобщенные модели оболочечной конструкции и опорного основания, которые являлись типичными для современных изделий РКТ (рис. 1).

Обобщенная модель оболочечной конструкции была представлена составной тонкостенной конструкцией в виде длинной цилиндрической оболочки 1, подкрепленной множеством шпангоутов 2. К любому из шпангоутов могут быть подсоединены сферические 3 или конические 4 днища, имеющие на узких краях подкрепляющие шпангоуты 5. Цилиндрические оболочки могут быть частично заполнены жидкостью с удельным весом γ , содержать упругий наполнитель, который характеризуется коэффициентом жесткости C_3 или испытывать воздействие равномерного внутреннего давления q (рис. 1, а). Шпангоуты и цилиндрические, сферические конические днища могут отличаться друг от друга соответствующими геометрическими и жесткостными характеристиками.

Наиболее распространенными конструкциями опорных оснований являлись ложементы. Ложемент состоял из накладки (прокладки) 6, основания 7 и системы его закрепления на опоре 8 (рис. 1, а, б).

Под произвольным опорным основанием понималось различное сочетание конструкции накладок, оснований ложемента и системы его закрепления. Основание ложемента, как правило, выполнялось в виде незамкнутого криволинейного бруса различной высоты. Возможны наличие вырезов у бруса (рис. 1, б), а также несовпадение радиусов кривизны внутренней поверхности бруса (с учетом накладки) и контактируемой с ним внешней поверхности шпангоута (рис. 1, в).

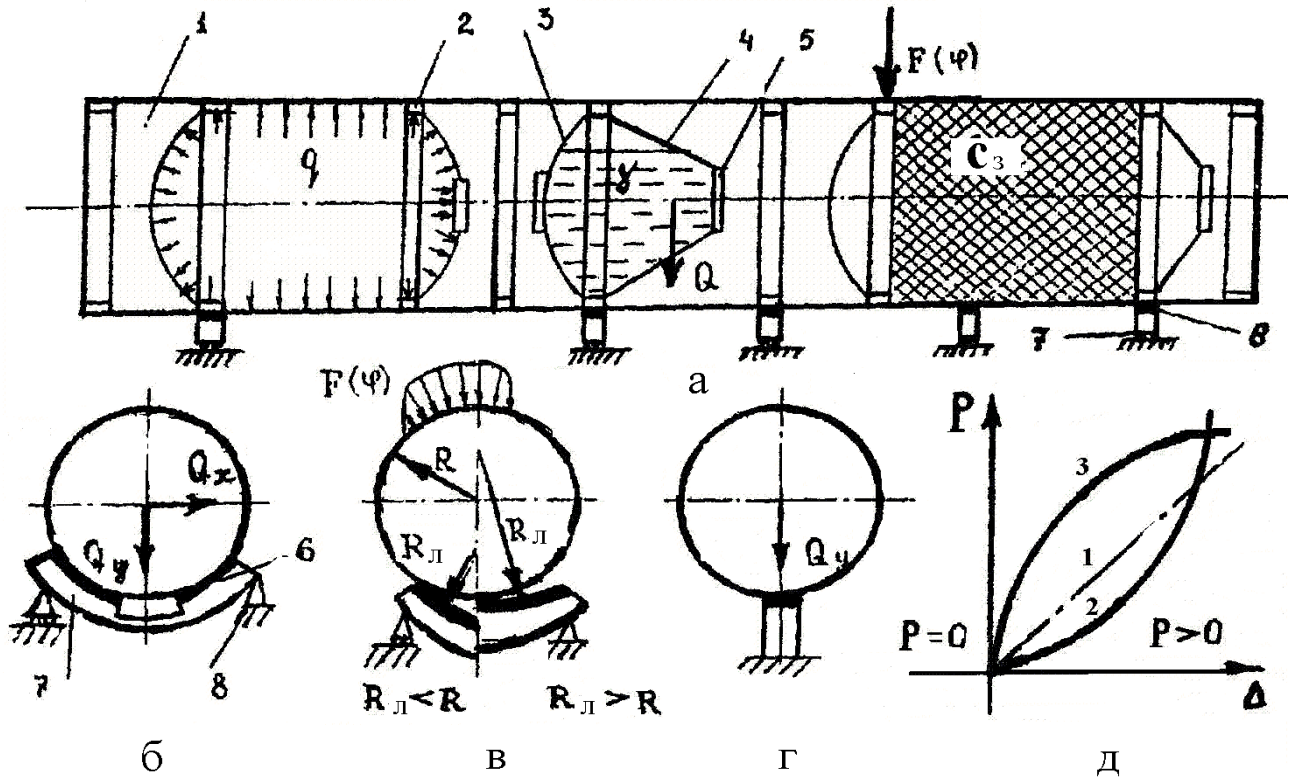


Рис. 1. Обобщенные модели исходных конструкций

Накладка состоит из тонкого металлического листа, на котором – слой резины, масленита или текстолита. Накладка располагалась по всему периметру ложемента или дискретно: на некоторых ее частях различной протяженностью, в том числе сосредоточенно (рис. 1, з). Зависимость прокладки от ее перемещения может быть описана линейной или нелинейной функцией. В теоретических расчетах наибольшее распространение, как самая простая, получила линейная зависимость (рис. 1, д, линия 1). В реальных условиях эксплуатации указанная зависимость – нелинейная. В большинстве случаев нелинейность характеризуется вогнутой кривой (рис. 1, д, кривая 2). Крайне редко эта зависимость имеет выпуклую кривую (рис. 1, д, кривая 3).

Оболочечная конструкция находилась на нескольких ложементах, расположенных, как правило, под силовыми шпангоутами. Силовые шпангоуты непосредственно воспринимали воздействие поперечных нагрузок: перегрузок n_x, n_y , внешних локальных нагрузок $F(\varphi)$ и нагрузок от ложементов – реакция взаимодействия шпангоута и ло-

жемента. Эта реакция представлялась в виде радиальной локальной нагрузки – контактное давление.

Заданными (исходными) значениями служили параметры и характеристики оболочечной конструкции, ложементов, перегрузок и внешних локальных нагрузок. Неизвестными являлись характеристики нагрузки на шпангоут от ложементов – закон распределения в окружном направлении на участке действия нагрузки – и суммарное значение усилия, приходящееся на каждый из шпангоутов, а также значения внутренних усилий и моментов в поперечном сечении шпангоута и прилегающих к нему оболочках.

Представленные в таком виде модели оболочечной конструкции, ложемента и их нагружения являются обобщением ранее рассматриваемых постановок задач. Данная постановка задач наиболее полно по сравнению с существующими отражает реальную схему работы конструкции при ее наземной эксплуатации. Появляется возможность учитывать многие конструктивные параметры в их совокупности. Из этих

обобщенных моделей могут быть достаточно просто получены разнообразные конкретные конструкции.

При рассмотрении статической задачи под термином "нагруженность силового шпангоута" понималось определение параметров радиальной локальной нагрузки, т.е. значения суммарного усилия на каждом из шпангоутов – задача о распределении общего веса конструкции Q в продольном направлении (между ложементом), и закона распределения этого суммарного значения в окружном направлении на каждом из шпангоутов (контактное давление).

В понятие термина "нагруженность" было включено определение распределения нагрузки, приходящейся на шпангоут и прилегающие к нему оболочки. Здесь определяются не напряжения, а значения усилий и моментов в поперечных сечениях шпангоута и оболочках.

Определение законов распределения контактного давления в окружном направлении по периметру шпангоута и распределения значений усилий в шпангоуте и оболочках получило название "контактные задачи".

Решение контактной задачи взаимодействия шпангоута и ложементов требует наличия функции Грина для тонкостенной конструкции. Она может быть получена на основе решения контактной задачи сопряжения шпангоута и оболочек. Поэтому вначале была поставлена задача контактного взаимодействия шпангоута и оболочек [1].

Одной из особенностей в постановке задачи контактного сопряжения являлось то, что для ее решения необходимо знать закон распределения контактного давления. Он, в свою очередь, зависит от жесткостных параметров тонкостенной конструкции и ложементов. Если жесткостные параметры ложементов можно задать в первом приближении, то выбор жесткостных параметров конструкции определяется на основе закона распределения контактного давления. Он заранее не известен. Получается взаимосвязь между заданием и определением ис-

ходных и конечных данных для решения двух контактных задач.

Постановка двух контактных задач относится к статически неопределимым задачам. Их отличие от традиционных постановок аналогичных задач заключалось в довольно высокой степени статической неопределимости. Более того, к высоким степеням статической неопределимости каждой из контактных задач добавилась их взаимосвязь. Чем выше степень статической неопределимости задачи, тем больший порядок разрешающей системы. Поэтому при разработке методики исследования были определены пути и способы, которые позволили бы уменьшить порядок разрешающей системы.

Для раскрытия статической неопределимости задачи используют два основных метода: метод сил и метод перемещений.

При решении контактной задачи взаимодействия шпангоута и ложементов применялся метод сил. За основные неизвестные были приняты законы распределения контактных давлений на каждом из шпангоутов. Через это взаимодействие были выражены все остальные компоненты НДС ложементов и тонкостенной конструкции. Такой подход потребовал определять функции Грина для тонкостенной конструкции при произвольном (неизвестном) локальном нагружении. Здесь использовался метод перемещений.

На рис. 2 представлены основные положения, позволяющие раскрыть суть подходов к постановке контактных задач, выбора путей и способов преодоления указанных выше особенностей, а также методов решения контактных задач [1, 2].

При решении задач использовался метод тригонометрических рядов. Неизвестный закон контактного давления $P(\varphi)$ был представлен рядом Фурье по окружной координате φ (рис. 2, б). С помощью такого представления решение сложной задачи состояло из ряда решений более простых задач. Они определялись номером гармоники n . Каждой задаче был придан физический смысл.

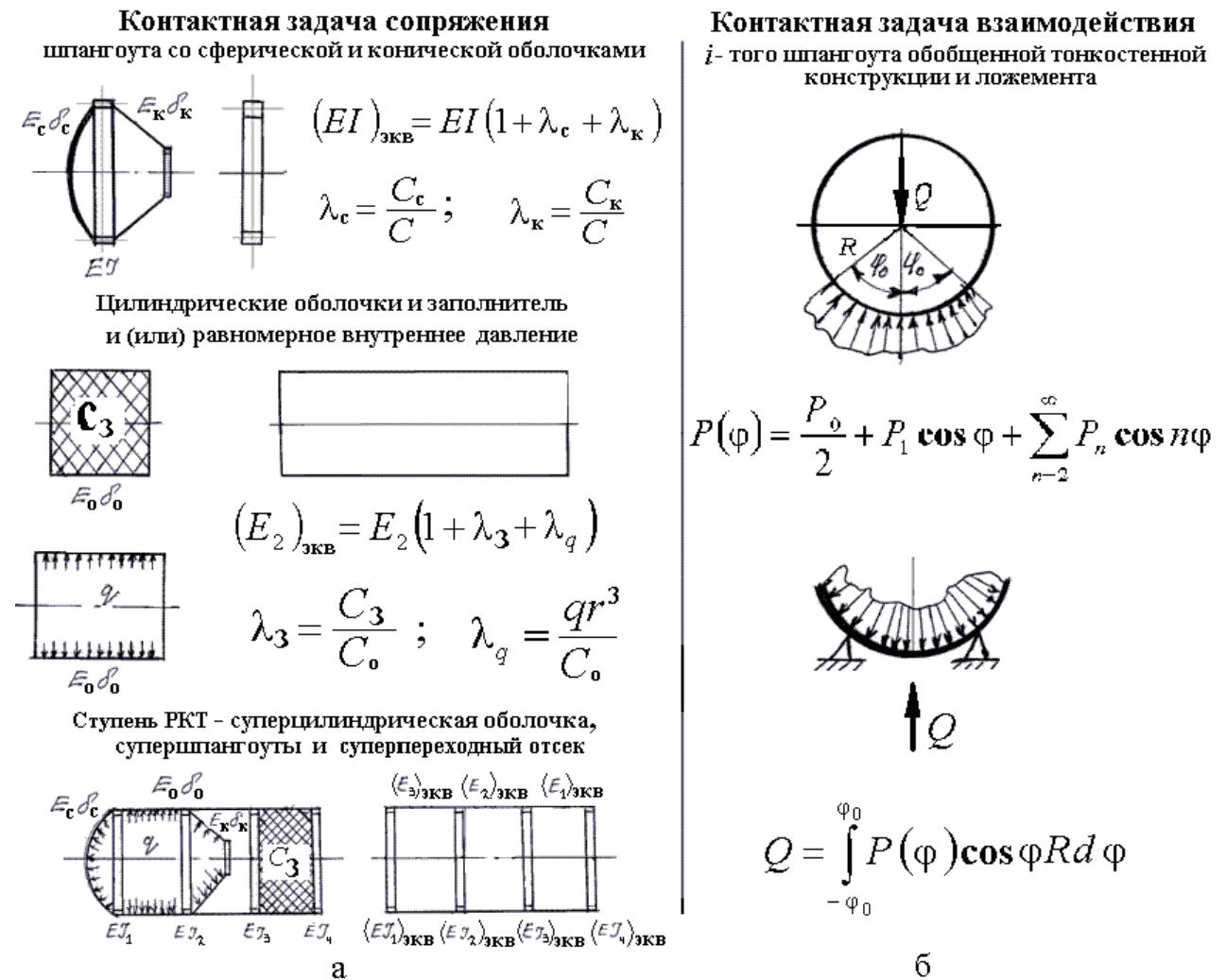


Рис. 2. Контактные задачи сопряжения (а) и взаимодействия (б)

Для нулевой гармоники нагружение шпангоута определялось как равномерное распределение в окружном направлении по периметру шпангоута. Амплитуда нагрузки определялась коэффициентом Фурье $P_0/2$. Эта нагрузка вызывала в шпангоуте деформацию растяжения-сжатия в окружном направлении и получила название "осесимметричная задача".

При $n=1$ (первая гармоника) конструкция нагружалась косинусоидальной нагрузкой $P_1 \cos \varphi$. Такой вид нагружения не вызывал каких-либо деформаций в шпангоуте в окружном направлении. Контур поперечного сечения конструкции оставался окружностью. Эта задача имеет два названия. По виду нагружения – антисимметричная, по виду деформации – балочная.

Для $n \geq 2$ характерно циклическое нагружение шпангоута, описываемое вы-

ражением $P_n \cos n\varphi$. Этот вид нагружения вызывает изгибные деформации шпангоута в окружном направлении. С его помощью описана локальность нагружения, определяются концентрация и пики компонентов НДС шпангоута и оболочек. Эта задача названа циклической.

Полное НДС элементов конструкции определяется путем суммирования результатов решения всех перечисленных выше задач – осесимметричной, балочной и циклической.

На основе ортогональности тригонометрических функций решение каждой задачи при определении функции Грина можно рассматривать отдельно, независимо друг от друга.

Осесимметричная задача достаточно хорошо освещена в литературе. Решение балочной задачи выполняем с помощью формул сопротивления материалов. Менее раз-

работаны постановки и решения задач об определении НДС элементов конструкции при циклическом нагружении.

Основное внимание в настоящей работе уделено задачам при циклическом нагружении.

При постановке контактной задачи взаимодействия шпангоута и оболочек был применен системный подход [3]. В его основе лежат системные анализ и синтез. При системном анализе происходит декомпозиция исходной конструкции на составляющие. Она определяет различные уровни разделения.

При определении уровней декомпозиции тонкостенной конструкции и конструкции ложементов были выбраны термины, которые обычно применяются в практике конструирования и изготовления РКТ.

За нулевой уровень декомпозиции была принята исходная конструкция, представленная на рис. 1.

На начальном этапе исследований тонкостенная конструкция отделялась от ложементов. Таким образом, получался первый уровень декомпозиции. Он был представлен тонкостенной конструкцией и конструкцией ложементов в их первоначальном неразделенном виде. Это этап системного анализа (разделения). Синтез заключался в том, что взаимная работа разделенных конструкций учитывалась реакцией взаимодействия. На конструкцию и ложемент действовал один и тот же вид (закон) реакций.

В дальнейшем декомпозиция конструкции и ложементов происходила аналогичным образом.

Уровни декомпозиции тонкостенной конструкции: ступени, отсеки, подконструкции, суперэлементы, элементы, конечные элементы. Для ложементов – подконструкции, суперэлементы, элементы, конечные элементы.

К уровню элементов были отнесены шпангоуты, цилиндрические, сферические, конические оболочки, прокладка ложементов, опорное основание ложементов.

Порядок разрешающей системы зависит от того, для какого уровня декомпозиции она записана. Ее можно записать для любого уровня декомпозиции. В литературе

встречаются случаи, когда решение задачи предполагается записать для первого уровня декомпозиции тонкостенной конструкции. Описание поведения конструкции основано на получении одного интегродифференциального уравнения. Возникают сложности в получении этого уравнения, его решении и практическом применении.

Другим крайним случаем является самый высокий уровень декомпозиции – конечные элементы. При большом их количестве разрешающая система имеет большой порядок. При численной реализации не всегда могут быть получены решения с необходимой точностью даже при наличии мощных ПК. Здесь необходимо следить за тем, чтобы определитель системы был достаточно хорошо обусловлен. Недостаточная обусловленность определителя может быть вызвана или существенной разницей в жесткостных параметрах соседних элементов конструкции, или когда значение диагонального члена матрицы разрешающей системы равно или меньше суммы недиагональных членов матрицы.

В настоящей работе разрешающая система для тонкостенной конструкции записана для уровня суперэлементов. Суперэлемент объединяет несколько элементов [4]. Суперэлемент отличается от обычного элемента своими увеличенными жесткостными характеристиками. Они определялись на основе постановки и решения частных задач.

Из исходной тонкостенной конструкции выделены подконструкции, объединяющие в себе несколько элементов (рис. 2, а). Первая подконструкция состояла из шпангоута и двух присоединенных к нему оболочек: сферической и конической. Каждый элемент имел свои собственные жесткостные характеристики: EI – жесткость поперечного сечения шпангоута при изгибе, $E\delta$ – жесткость оболочек на растяжение-сжатие. На основании решения частной задачи о контактном взаимодействии шпангоута с одной сферической и одной конической оболочками было получено аналитическое выражение, с помощью которого можно определить увеличение жесткости шпангоута за счет оболочек. Это увеличение определялось значениями λ . В данном случае

оно отражает отношение коэффициента жесткости оболочки к коэффициенту жесткости шпангоута. При $\lambda = 0$ значение жесткости шпангоута равно значению собственной жесткости шпангоута. Жесткость оболочек на растяжение-сжатие "включена" в изгибную жесткость шпангоута с помощью значения λ . Этот способ (путь) называют методом эквивалентной или приведенной жесткости. В конечном итоге вместо подконструкции, состоящей из трех элементов, можно в дальнейшем рассматривать один, но суперэлемент, супершпангоут с эквивалентной изгибной жесткостью $(EI)_{\text{экв}}$.

Аналогичным образом определялось увеличение жесткостных параметров для суперцилиндрической оболочки. Подконструкция – цилиндрическая оболочка с заполнителем или равномерным внутренним давлением заменялась одной суперцилиндрической оболочкой с увеличенным модулем упругости материала оболочки в кольцевом направлении $(E_2)_{\text{экв}}$.

На рис. 2, а показан один из вариантов ступени РКТ. Ступень состояла из трех отсеков: один – с давлением, другой – с заполнителем, а между ними – переходный отсек. Имелись также днища. На основе решения вышеприведенных частных задач удалось расчет этой ступени свести к расчету суперцилиндрической оболочки, подкрепленной рядом супершпангоутов, и суперпереходного отсека.

Переходный отсек, как правило, подкрепляется шпангоутами. Ввиду их малой жесткости по сравнению с силовыми шпангоутами, их жесткостные параметры можно включить в толщину цилиндрической оболочки δ .

Таким образом, переход от нескольких элементов к суперэлементам осуществлялся путем включения в изгибную жесткость шпангоута – жесткости днищ, в модуль упругости цилиндрической оболочки – жесткости заполнителя и значение внутреннего давления, в толщину цилиндрической оболочки переходного отсека – жесткости подкрепляющих шпангоутов.

Разрешающая система контактной задачи сопряжения суперэлементов – это система линейных алгебраических уравнений

с преобладающими значениями диагональных членов матрицы. Коэффициентами матрицы является отношение жесткостных параметров круговых колец и тонких оболочек. Для сферических и конических оболочек использовалась безмоментная теория тонких оболочек. Для цилиндрической оболочки была разработана методика, позволяющая применять безмоментную, полубезмоментную и моментную (пологие) теории оболочек. Порядок системы – $2N$, где N – количество шпангоутов.

Для определения закона распределения контактного давления были получены две системы уравнений.

Первая система – система интегральных уравнений-неравенств. С помощью использования тригонометрических рядов она преобразовывалась в бесконечную систему нелинейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов Фурье P_n . Здесь в отличие от задачи контактного сопряжения нет возможности рассматривать каждую гармонику в отдельности. Решение системы проводилось методом редукции. Неизвестные зоны контакта находились на основе простых интеграций. После получения решения проверялось выполнение условия регулярности системы.

При невыполнении условия регулярности системы решение задачи о контактном взаимодействии проводилось по другой системе. В этом случае закон контактного давления в зоне его действия разделялся на ряд участков. На каждом участке действовало P_i , которое принималось за основное неизвестное. Такой подход аналогичен методу конечных элементов, только дискретизации подлежит не сама конструкция, а внешнее нагружение. Порядок разрешающей системы $i+2$, где i – количество участков разбиения контактного давления.

Разработанная методика определения распределения общей нагрузки в продольном и окружном направлениях обобщает известные ранее аналогичные методики. Обобщение состоит в одновременном учете параметров и жесткостных характеристик элементов тонкостенной конструкции и опорных оснований.

Описывают поведение конструкции на основе балочной теории, теории тонких колец и тонких оболочек. Благодаря комплексному подходу учитываются изгибные деформации конструк-

ции как в продольном, так и в окружном направлениях. Перемещения конструкции как жесткого целого за счет деформации элементов опорного основания также могут быть определены на основании разработанной методики.

Одним из основных элементов опорного основания, которые обычно учитываются на первых этапах исследования распределения контактного давления, является прокладка ложемента. Она обладает наибольшей податливостью по сравнению с другими элементами основания. Существенное влияние на распределение давления оказывает односторонний нелинейный характер зависимости реакции прокладки от ее перемещения. Благодаря наличию допусков на изготовление конструкций возможен первоначальный (до деформации) зазор между конструкцией и ложементом. На практике это означает различие в их радиусах. Разработанная методика позволяет учитывать несовпадения радиусов ложемента и конструкции. Она также позволяет учитывать влияние на закон распределения контактного давления деформации криволинейного бруса под действием этого давления.

В заключение рассмотрены результаты исследований нагруженности двух конкретных конструкций.

На примере первой конструкции исследуется закон распределения контактного давления в окружном направлении для одного ложемента. Для одного ложемента нет

необходимости рассматривать распределение нагрузки по длине конструкции.

Во второй задаче исключается распределение нагрузки в окружном направлении путем представления основания в виде сосредоточенной опоры. Протяженность опоры в окружном направлении достаточно мала, так что ее воздействие на корпус конструкции представлено в виде сосредоточенного усилия. В продольном направлении опорное основание распространено по всей длине конструкции. Принято также, что значения жесткостных параметров основания намного превосходят значения местных жесткостных параметров корпуса. Таким образом, исключается податливость самого основания.

На рис. 3 представлена первая конструкция, схема ее нагружения и этапы исследования, в результате которых была выявлена причина потери устойчивости первоначальной формы сферического днища.

Конструкция состояла из цилиндрической оболочки, подкрепленной тремя шпангоутами. К шпангоуту, находящемуся посередине оболочки, было подсоединено сферическое днище. Этим же шпангоутом конструкция опиралась на ложемент (рис. 3, а, б).

Основание ложемента было выполнено в виде незамкнутого криволинейного бруса (рис 3, б). Угол охвата бруса был выбран достаточно большим $2\varphi_0 \cong 120^\circ$.

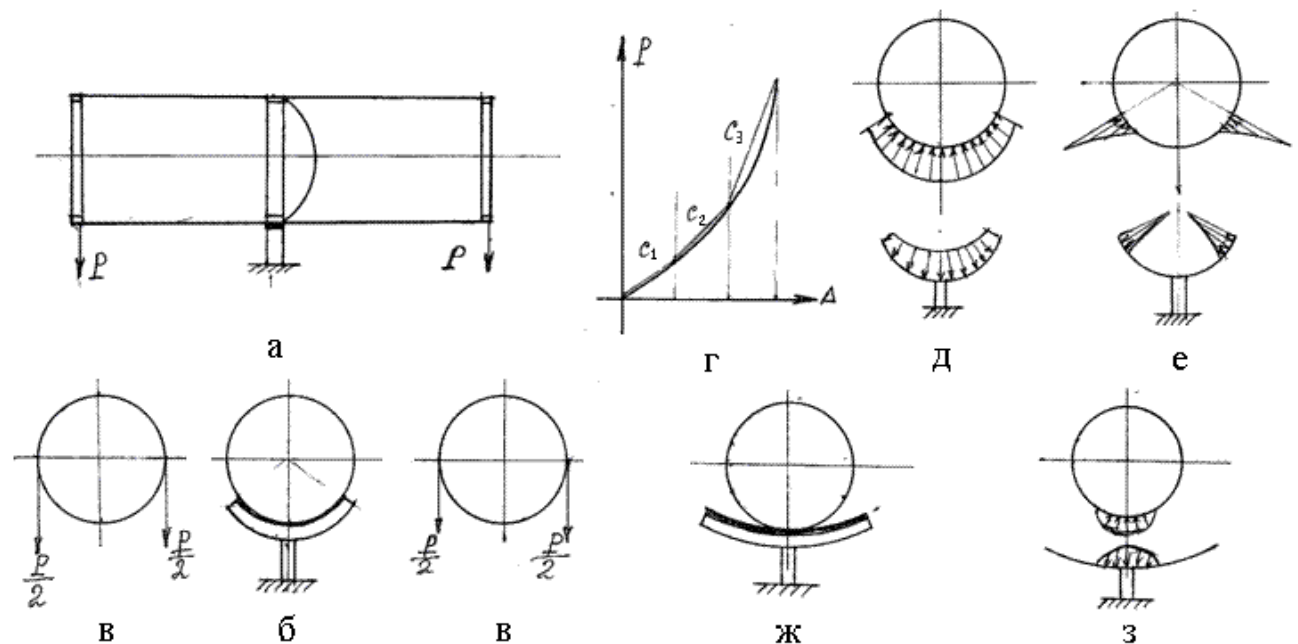


Рис. 3. Испытываемая конструкция (а), схема ее нагружения (б, в) и этапы решения проблемы потери устойчивости первоначальной формы сферического днища (г, д, е, ж, з)

Очевидно, преследовалась цель – распределить радиальную локальную нагрузку на как можно большей протяженности. Предполагалось, что таким образом удастся снизить ее интенсивность и добиться более или менее равномерного ее распределения по периметру ложементта.

В теоретических расчетах закладывалась линейная зависимость реакции от перемещения резиновой прокладки.

Нагружение конструкции осуществлялось через бандажи, которые располагались на торцевых шпангоутах (рис. 3, в).

При экспериментальных исследованиях этапы нагружения проводились в следующем порядке. Вначале была опрессовка до нагрузки $0,67P$, где P – максимальное значение нагрузки, затем – разгрузка до $P_{\min} \geq 0$. Дальнейшее нагружение проводилось этапами. После проведения экспериментальных исследований было обнаружено, что сферическое днище потеряло свою первоначальную форму.

Для выяснения причин потери устойчивости был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований.

Анализ результатов теоретических исследований, проведенных до экспериментальных исследований, показал следующее.

Закон распределения локальной нагрузки не был определен на основании решения контактной задачи взаимодействия. Он был взят на основании рекомендаций: для шпангоута со сферическим днищем закон распределения нагрузки близок к равномерному или косинусоидальному закону. Существенным моментом оказалось второе предположение: закон распределен по всему периметру ложементта. При таких предположениях уровень НДС в элементах конструкции и ложементе невысок.

Экспериментальные исследования жесткостной характеристики прокладки ложементта показали ее односторонность и нелинейность. На рис. 3, г представлена диаграмма $P = f(\Delta)$ – экспериментальная зависимость реакции резиновой прокладки ложементта P от ее перемещения Δ . Односторонний характер работы прокладки выражается в том, что при отрицательных пе-

ремещениях ($\Delta < 0$) ее реакция отсутствует, т.е. $P = 0$. Весь участок нелинейной характеристики ($\Delta > 0$, жирная линия) был разделен на три равномерных участка. Каждый участок характеризовался своим коэффициентом жесткости C_1, C_2, C_3 . Причем $C_3 > C_2 > C_1$. В данном случае нелинейность характеристики прокладки ложементта проявляется в возрастании ее жесткостных характеристик с увеличением значений нагрузки или перемещений прокладки.

Результаты решения контактной задачи взаимодействия шпангоута и ложементта с учетом нелинейности и односторонней работы прокладки ложементта показали следующее.

Косинусоидальный закон распределения контактного давления в окружном направлении реализуется при малых значениях нагрузки P . Он определен первым участком диаграммы $P = f(\Delta)$ и характеризуется наименьшим значением жесткости прокладки C_1 . При этом законе контакт шпангоута и ложементта происходит по всему его периметру. Причем значение давления в центре ложементта больше значения давления на его краях (рис. 3, д).

При увеличении нагрузки P , когда ее значение определяется не только первым, но и вторым участком диаграммы и характеризуется параметрами C_1, C_2 , происходит выравнивание значений контактного давления в центре и на краях ложементта. Оно близкое к равномерному по всему периметру ложементта.

Если значение нагрузки находится, в основном, в пределах второго участка диаграммы C_2 , то значение контактного давления на краях ложементта превосходит его в центре ложементта.

Особенностью закона распределения контактного давления в окружном направлении при нахождении нагрузки в пределах второго и третьего участков диаграммы C_2, C_3 является проявление одностороннего характера работы прокладки ложементта. Контактуют ложемент и шпангоут не по всему периметру ложементта. Зона контакта в центре ложементта отсутствует, происходит возрастание давления на краях ложементта.

Для третьего участка диаграммы C_3 характерна концентрация (пики) давления на краях ложементов (рис. 3, *е*). В предельном случае, когда коэффициент жесткости ложементов равен бесконечности $C_3 = \infty$, распределение контактного давления по окружной координате представляется в виде двух сосредоточенных сил по краям ложементов.

В результате нагружения конструкции и ложементов пиками давлений их НДС существенно отличается от того НДС, которое получено при распределенном контактном давлении по всему периметру ложементов. Для сферического днища уровень НДС уменьшается, для криволинейного бруса – увеличивается.

В процессе проведения опрессовки, очевидно, в кривом бруске возникли пластические деформации от действия контактного давления, которое было представлено в виде пиков давлений на краях криволинейного бруса. При разгрузке в результате остаточных пластических деформаций радиус криволинейного бруса стал больше радиуса шпангоута. Радиусы конструкции и ложементов не совпадают (рис. 3, *ж*).

При дальнейшем поэтапном нагружении закон распределения контактного давления концентрировался в центральной его части (рис. 3, *е*). При таком виде нагружения уровень НДС в сферическом днище значительно увеличивался по сравнению с двумя предыдущими случаями нагружения. Шпангоут нагружался силой, близкой к сосредоточенной. Вся эта нагрузка была воспринята сферическим днищем, так как оно имело наибольшие жесткостные характеристики по сравнению с другими элементами конструкции. В результате уровень действующих сжимающих усилий в сферическом днище превысил критическое значение, и днище потеряло свою первоначальную форму.

Одним из преимуществ инженерных методов, обобщающих ранее проведенные исследования, является то, что на основании анализа коэффициентов разрешающей системы можно получить простые аналитические выражения для определения области применения частных расчетных схем.

Основой коэффициентов разрешающей системы контактного взаимодействия кон-

струкции и ложементов являются три коэффициента жесткости: C_L – прокладки ложементов, C_B – конструкции при ее рассмотрении как балки ($n=1$), C_{OB} – конструкции при ее рассмотрении как оболочки (расчетная схема "кольцо с оболочкой" $n \geq 2$). В зависимости от соотношения этих коэффициентов можно определить следующие расчетные схемы.

При $C_L \ll C_B$ и $C_L \ll C_{OB}$ – абсолютно твердое тело на упругих опорах. Для $C_L \approx C_B$ и $C_B \ll C_{OB}$ – балка на упругих опорах. При $C_L \approx C_{OB}$ и $C_{OB} \ll C_B$ – оболочечная конструкция на упругих опорах. Для $C_L \gg C_B$ и $C_B \ll C_{OB}$ – балка на жестких опорах. При $C_L \gg C_{OB}$ и $C_B \gg C_{OB}$ – оболочка на жестких опорах. Для $C_L \approx C_B \approx C_{OB}$ – оболочечная конструкция – балка на упругих опорах.

На рис. 4 представлена тонкостенная конструкция, опирающаяся на сосредоточенную в окружном направлении опору по всей ее длине. Такой вид нагружения возможен при сейсмическом нагружении, когда на конструкцию перемещается опора на Δ . Необходимо определить нагрузку, приходящуюся на каждый из одиннадцати шпангоутов. Она была определена на основе расчетной схемы "оболочка на жестких опорах".

Результаты расчетов представлены в таблице.

Распределение нагрузки в продольном направлении представлено в виде относительных значений сосредоточенных усилий на каждом из одиннадцати шпангоутов. Анализ представленных результатов показал, что значения усилий пропорциональны местной, локальной жесткости конструкции. Эта жесткость определялась собственной жесткостью шпангоута и наличием подсоединения к нему днища или оболочки.

В крайней левой колонке таблицы дана нумерация шпангоутов, которая соответствует нумерации шпангоутов, показанной на рис. 4.

В колонке 1 представлены значения усилий при учете только собственной жесткости шпангоутов. Это так называемая расчетная схема "изолированное кольцо". Здесь не учтена жесткость днищ, цилиндрических оболочек и запол-

нителя. Анализ этих данных дает основание полагать, что более 65% нагрузки приходится на шпангоуты 8, 10 и 11. Шпангоуты 1 и 6 практически не нагружаются.

В последней строке таблицы представлена сумма относительных значений усилий. При данной постановке задачи, когда нагрузка определена как перемещение опоры на конструкцию на Δ , сумму усилий можно рассматривать как обобщенную характеристику жесткости конструкции. Для расчетной схемы "изолированное кольцо" значение этой жесткости минимально по сравнению с другими рассмотренными выше случаями.

В колонке 2 даны результаты расчетов для случая, когда к шпангоутам под номерами 2, 3, 4, 5, 8, 9 подсоединены днища. Здесь локальная жесткость конструкции определяется суммар-

ной жесткостью шпангоута и подсоединенного к нему днища. Местная жесткость конструкции в районе шпангоутов с днищами возросла практически на два порядка по сравнению с расчетной схемой "изолированное кольцо" (колонки 1 и 2, сравнение значений усилий для рассматриваемых шпангоутов). Суммарная жесткость конструкции увеличилась в 58 раз (последняя строка таблицы колонок 1 и 2).

В колонке 3 локальная жесткость конструкции определялась жесткостью шпангоутов, днищ и подсоединенных к шпангоуту бесконечно длинных цилиндрических оболочек с учетом наличия в некоторых из них упругого заполнителя. Основную нагрузку берут на себя шпангоуты с днищами. Суммарная жесткость конструкции с учетом подсоединения цилиндрических оболочек возросла в 1,92 раза.

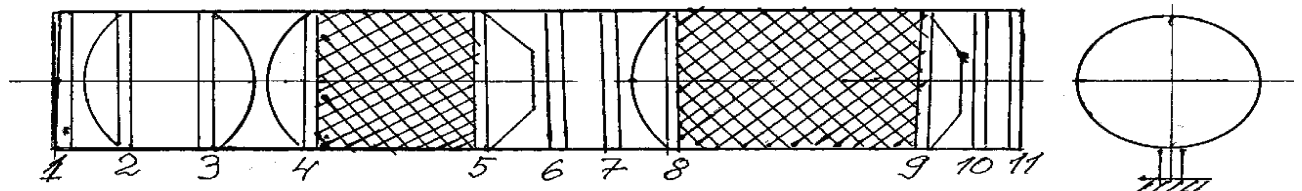


Рис. 4. Опираие тонкостенной конструкции на сосредоточенную опору, распространенную по всей длине этой конструкции

Значения относительных нагрузок на шпангоуты в зависимости от расчетной схемы и исчерпания несущей способности днищ

Номер шпангоута	Расчетная схема			Исходная конструкция	Последовательность разрушения конструкции, потеря устойчивости днища ($\delta_i = 0$) на i -том шпангоуте		
	"изолированные кольца"	"кольца и днища"	"кольца днища" "длинные оболочки"		$\delta_2 = 0, \delta_3 = 0$	$\delta_8 = 0$	$\delta_9 = 0$
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,0	0,0	0,0068	0,006	0,004	0,004	0,004
2	0,00046	0,022	0,0336	0,03	0,0053	0,0051	0,0051
3	0,00036	0,108	0,129	0,146	0,0233	0,0226	0,02
4	0,00022	0,014	0,57	0,065	0,053	0,052	0,0513
5	0,00018	0,015	0,513	0,05	0,058	0,0285	0,028
6	0,0	0,0	0,0014	0,001	0,001	0,0008	0,0006
7	0,00088	0,00088	0,0083	0,027	0,027	0,011	0,011
8	0,00136	0,165	0,342	0,332	0,33	0,078	0,077
9	0,00086	0,133	0,242	0,197	0,197	0,0196	0,008
10	0,00275	0,00275	0,108	0,132	0,132	0,013	0,013
11	0,0011	0,0011	0,0025	0,015	0,0144	0,014	0,002
Σ	0,008	0,462	0,885	1,0	0,845	0,542	0,22

В колонке 4 представлено распределение нагрузки по длине исходной нагрузки. Оно отличается от распределения нагрузки в колонке 3 тем, что здесь цилиндрические оболочки конечной длины. Более 50% нагрузки приходится на шпангоуты 8 и 9.

В колонках 5, 6 и 7 показана последовательность разрушения конструкции. В первую очередь, несущую способность теряли днища как наиболее нагруженные силовые элементы по сравнению с другими элементами конструкции. Зная значение нагрузки на каждом из шпангоутов с днищами, были определены значения действующих сжимающих усилий в днищах. Сравнение этих значений с критическими позволило определить, на каком из шпангоутов подсоединенное к нему днище теряет свою первоначальную форму. Для данной конструкции последовательность потери устойчивости первоначальной формы днища должна была реализовываться вначале в днищах, находящихся на шпангоутах 2 и 3, затем на шпангоуте 8, после на шпангоуте 9. Данные, представленные в колонках под номерами 5, 6 и 7, позволяют делать выводы о том, как влияет потеря несущей способности каждого из рассмотренных днищ на распределение нагрузки в продольном направлении. Также можно делать заключение, в какой степени снижается жесткость конструкции при потере устойчивости первоначальной формы каждого из днищ.

Выводы

1. В качестве объектов исследования выбраны обобщенные модели тонкостенной конструкции и опорных оснований. Эти обобщения проведены на основе анализа конструкций ракетно-космической техники.

2. Рассматривалась наземная эксплуатация тонкостенной конструкции, которая испытывала поперечную локальную нагрузку – реакцию взаимодействия между ней и опорными основаниями (контактное давление).

3. Нагруженность тонкостенной конструкции определялась распределением общей внешней нагрузки по ее длине и за-

конам контактного давления в окружном направлении.

4. В понятие нагруженности включено определение внутренних силовых факторов в шпангоуте и прилегающих к нему оболочек (сферических, конических и цилиндрических).

5. Выделены два вида контактных задач: контактная задача сопряжения шпангоута и оболочек и контактная задача взаимодействия шпангоута и опорного основания (ложемента).

6. Рассмотрены особенности контактных задач, их взаимосвязь и отмечена достаточно большая степень статической неопределенности.

7. Для уменьшения порядка разрешающей системы контактной задачи сопряжения шпангоута и оболочек использовались системный подход и метод суперэлементов.

8. Методика определения закона распределения контактного давления в окружном направлении (контактная задача шпангоута и ложемента) позволяет проводить одновременный учет конструктивных особенностей ложемента: односторонней нелинейной зависимости прокладки ложемента от ее перемещения, несовпадения радиусов ложемента и конструкции, и деформированного состояния незамкнутого кругового бруса ложемента от действия контактного давления.

9. Методика определения контактного давления также учитывает особенности тонкостенной конструкции: наличие подсоединения к шпангоуту сферических и конических днищ, а в цилиндрической оболочке – упругого заполнителя и внутреннего давления.

10. Совместный учет особенностей тонкостенной конструкции и ложемента позволил существенно приблизить по сравнению с существующими методиками расчетную схему к схеме работы конструкции в реальных условиях эксплуатации.

11. Коэффициентами разрешающих систем являются коэффициенты жесткости (податливости) ложемента, шпангоута, сферических, конических и цилиндрических оболочек. На основе соотношений их величин были выделены частные расчетные схемы.

12. Даны решения двух практических задач. В первой задаче исследуется закон

распределения контактного давления в окружном направлении. Во второй – рассматривается распределение общей нагрузки в продольном направлении.

13. В реальных условиях эксплуатации закон распределения контактного давления в окружном направлении может быть самого разнообразного вида. При небольших значениях жесткости прокладки ложементов контакт конструкции и ложементов происходит по всему периметру последнего. Контактное давление может быть описано косинусоидальным, равномерным, линейным или квадратичным законом. При увеличении жесткости прокладки ложементов уменьшается давление в центре ложементов и увеличивается на его краях. При больших значениях жесткости прокладки ложементов контакт конструкции и ложементов происходит не по всему периметру последнего. В центре ложементов контакт отсутствует, а на его краях имеются пики давлений. Возможна обратная картина распределения давления. Если радиус криволинейного бруса ложементов больше радиуса шпангоута конструкции, то их контакт происходит в центре ложементов. Края ложементов свободны от нагрузки.

14. При исследовании распределения нагрузки в продольном направлении была использована частная расчетная схема "оболочка на жестких опорах". Показано, что распределение нагрузки по длине конструкции определяется ее локальной жесткостью. Эта жесткость зависит от жесткости шпангоута и присоединенных к нему днищ и цилиндрических оболочек.

Практические рекомендации

1. Разработанные методики могут иметь широкое применение в решении практических проблемных вопросов.

2. На основании оценки соотношений коэффициентов жесткости элементов конструкции можно определять и обосновывать применение различных расчетных схем.

3. На основе разработанных методик можно проводить оперативную оценку нагруженности силовых элементов тонкостенной конструкции.

Направления дальнейших исследований

Будут проведены исследования по нагруженности элементов тонкостенной конструкции для различных, в том числе нештатных, случаев наземной эксплуатации.

Список использованной литературы

1. Моссаковский В.И., Гудрамович В.С., Макеев Е.М. Контактные взаимодействия элементов оболочечных конструкций. – К.: Наук. думка, 1988. – 300 с.

2. Макеев Е.М., Семенов В.П. Прочность, жесткость и устойчивость составных оболочечных конструкций при поперечном локальном нагружении// Прочность и надежность конструкции: Сб. статей. – К.: Наук. думка, 1976. – С. 132-146.

3. Образцов И.Ф., Булычев Л.А. и др. Строительная механика летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1986. – 539 с.

4. Постнов В.А. и др. Метод суперэлементов в расчетах инженерных конструкций. – Л.: Судостроение, 1979. – 354 с.

Статья поступила 14.05.2014