

УДК 629 73.001.63

*На правах рукописи*

Чжан Сюань

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЁТА КОМБИНИРОВАННЫХ  
БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ С УЧЁТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ**

Специальность 2.5.14  
«Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Сарбаев Борис Сафиулович**

Официальные оппоненты:

**Лебедев Константин Нитович**, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника Центра прочности АО ЦНИИСМ, г. Хотьково

**Татусь Николай Алексеевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (ИВГПУ)

Защита диссертации состоится «23» декабря 2021 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.08 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета 24.2.331.08

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.08  
к.т.н., доцент



Луценко А.Ю.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования.**

Комбинированные баллоны высокого давления (КБВД), т. е. композитные баллоны высокого давления с несущим металлическим лейнером, широко применяются в разнообразных изделиях современной техники. Основными преимуществами таких конструкций по сравнению с цельнометаллическими баллонами являются высокие удельные прочность и жесткость, стойкость к агрессивным средам, износостойкость, безопасная форма разрушения и др. Они превосходят цельнокомпозитные баллоны с полимерным лейнером по параметрам газопроницаемости и сопротивления циклически изменяющимся термосиловым нагрузкам.

На практике КБВД, предназначенные для хранения сжатого газа при давлениях  $10\div 40$  МПа, должен выдерживать нагрузку, включая циклическую, в течение длительного времени без разрушения и потери герметичности. При этом экспериментальные исследования баллонов показывают, что деформирование конструкции является нелинейным, в том числе при разгрузке и повторном нагружении. Для обеспечения надёжной и безопасной работы и уменьшения риска возникновения аварийных ситуаций необходимо адекватно оценивать напряженно-деформированное состояние как лейнера, так и многослойного композиционного материала (КМ). В этой связи при их проектировании помимо линейно упругого поведения необходимо рассматривать пластическое деформирование, предшествующее предельному состоянию. Результаты, вытекающие из указанного подхода, могут быть полезными при разработке критериев малоциклового усталости материала лейнера и композитного слоя.

Учёт пластических деформаций также необходим при обосновании безопасных режимов некоторых технологических операций. В частности, при изготовлении КБВД применяется предварительная опрессовка давлением, превышающим эксплуатационное давление. После этой операции в материале лейнера возникают пластические деформации, позволяющие повышать малоцикловую прочность конструкции. Однако при этом на этапе разгрузки лейнер сжимается внешним контактным давлением, обусловленным воздействием многослойного материала. В итоге может произойти нежелательная потеря устойчивости тонкостенного лейнера.

В данной диссертационной работе рассматриваются КБВД двух типов, КБВД типа 2 и 3. Для таких КБВД разрабатываются методы расчёта напряженно-деформированного состояния, в которых учитываются пластические деформации как в металлическом лейнере, так и в КМ. Предложенные расчётные зависимости удобны для решения практических задач. Они могут быть полезными на этапе предварительного проектирования КБВД, а также при проведении расчётов напряженно-деформированного состояния композитных конструкций с более сложными геометрическими характеристиками.

### **Цель и задачи работы.**

Целью работы является разработка методов проектного и поверочного

расчётов цилиндрической части КБВД типов 2 и 3 для летательных аппаратов (ЛА) с помощью различных вариантов теории пластичности изотропного и ортотропного тел.

**Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:**

1. Применительно к КБВД типа 2 развитие существующего метода расчёта и проектирования, основанного на соотношениях деформационной теории пластичности изотропного тела; разработка метода расчёта и проектирования с применением соотношений теории пластичности с изотропным упрочнением, основанной на ассоциированном законе течения и поверхности нагружения Треска-Сен-Венана.

2. Разработка расчётных соотношений и вычислительного алгоритма для выполнения поверочного расчёта цилиндрической части КБВД типов 2 и 3 с применением теорий пластичности с трансляционным упрочнением для изотропного и ортотропного тел.

3. Теоретическое описание деформирования КБВД при разгрузке, анализ остаточных напряжений и деформаций, прогнозирование поведения при повторном нагружении, обоснование давления предварительной опрессовки.

4. Проектирование цилиндрической части КБВД, анализ её напряжённо-деформированного состояния и массовых характеристик на основании полученных расчётных соотношений, применение современных конечно-элементных программ комплексов для верификации полученных результатов и сравнительного анализа.

**Объектом исследования** является цилиндрическая часть КБВД типов 2 и 3, предназначенных для длительного хранения сжатого газа на борту ЛА.

**Методы и средства исследования.**

При решении поставленной задачи были использованы теории пластичности, а именно: деформационная теория пластичности для изотропного тела, теория пластичности с трансляционным упрочнением для изотропного и ортотропного тел, основанные на концепции поверхности нагружения и ассоциированном законе течения. Для численного интегрирования полученных уравнений и верификации результатов применяется метод переменных параметров упругости в сочетании шаговым нагружением, методы компьютерного моделирования с применением программного комплекса ANSYS.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Получены обобщимые аналитические зависимости для расчёта и проектирования цилиндрической части КБВД типа 2, основанные на соотношениях теории пластичности с поверхностью нагружения Треска-Сен-Венана.

2. Разработаны расчётные соотношения и вычислительный алгоритм на основе теории пластичности с трансляционным упрочнением как для изотропного, так и для ортотропного тел, позволяющие адекватно описывать нелинейное деформирование при разгрузке и повторном нагружении КБВД типов 2 и 3.

**Практическая значимость** определяется расчётными соотношениями

для определения толщин стенки лайнера и композитного слоя на цилиндрической части КБВД типа 2; способом обоснования давления предварительной опрессовки с учётом требований нормативной документации; способом расчёта разрушающего давления для КБВД типов 2 и 3 с учётом пластического деформирования материалов лайнера и композитного слоя.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Способ расчёта цилиндрической части КБВД типа 2 на основе деформационной теории пластичности с учётом нелинейного упрочнения материала лайнера.

2. Расчётные соотношения для определения толщин стенки лайнера и композитного слоя на цилиндрической части КБВД типа 2, основанные на гипотезе равнонапряжённости лайнера.

3. Обозримые аналитические зависимости для расчёта напряжений и деформаций на цилиндрической части КБВД типа 2, полученные с помощью соотношений теории пластичности, основанной на поверхности нагружения Треска-Сен-Венана.

4. Способ получения матрицы упругопластических характеристик для многослойного материала на цилиндрической части КБВД типа 3, основанный на соотношениях теории пластичности изотропного и ортотропного тел с трансляционным упрочнением, а также способ численного интегрирования соответствующих дифференциальных зависимостей.

5. Разработанный для КБВД типа 3 метод анализа остаточных напряжений и деформаций при разгрузке, прогнозирования деформирования при повторном нагружении, обоснования давления предварительной опрессовки, расчёта разрушающего давления с применением соотношений теории пластичности с трансляционным упрочнением.

**Достоверность и обоснованность** положений и выводов, приведенных в диссертации, обосновывается применением соотношений теории пластичности для изотропного и ортотропного тел, основанных на классической концепции поверхности нагружения и ассоциированном законе течения, положений механике композитных материалов, апробированных численных методах и программных комплексах. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, заимствованными из опубликованных работ других авторов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих научно-технических конференциях и семинарах: XLIV академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства «Королевские чтения 2020». (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020.); IV Международной молодёжной конференции «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники». (Москва, МГТУ им.

Н. Э. Баумана, 2020); VI международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики». (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020); семинаре кафедры прикладной механики МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021); Московском ежемесячном семинаре молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения им. Ю.Н.Работнова (Москва, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, 2021).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 5 научных статьях, в том числе в 2 публикациях в изданиях из перечня ВАК РФ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка использованной литературы, включающего 137 научных трудов на русском и иностранных языках. Работа изложена на 146 страницах, содержит 48 рисунков 11 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы.

**В первой главе** приведены примеры применения КБВД в современных ЛА различного назначения с перечислением его отличительных достоинств. Изложены конструктивно-технологические особенности КБВД, соответствующие различным требованиям эксплуатации и технологиям изготовления. Рассмотрены эффективность и работоспособность наиболее распространенных КБВД, связанные с физико-механическими свойствами применяемых материалов и геометрическими характеристиками баллонов.

Среди многочисленных публикаций по расчёту КБВД следует выделить работы И.Ф. Образцова, В.В. Васильева, В.Д. Протасова, В.А. Бунакова, А.Б. Миткевича, К.Н. Лебедева, И.К. Лебедева, Н.Г. Мороза, П.А. Зиновьева, А.А. Криканова и др. При разработке КБВД для ЛА распространены проектные расчёты, основанные на анализе предельного состояния конструкции. В большинстве отечественных и зарубежных публикаций предполагается, что в предельном состоянии металлический лейнер деформируется как идеально пластическое тело, а однонаправленный волокнистый композит представляет собой систему упругих нитей, воспринимающих только растягивающую нагрузку. Как известно, такой подход приемлем для конструкций, которые однократно подвергаются эксплуатационной нагрузке в течение весьма ограниченного времени.

В ряде публикаций показано, что эффективные и надёжные методы расчёта КБВД должны учитывать пластические деформации как в металлическом лейнере, так и в КМ. В работе под пластическим деформированием понимается необратимое деформирование, не зависящее от фактора времени. Как в

проектных, так и в поверочных расчётах для описания пластического деформирования металлического лейнера применяются соотношения деформационной теории пластичности. Известно, что в таком подходе не удаётся адекватно описывать деформирование конструкции при сложном нагружении. Более предпочтительным является применение теории течения Прандтля-Рейсса с изотропным упрочнением. В ряде публикаций для описания нелинейного деформирования однонаправленного ВКМ применяется модель, предложенная С.Т. Sun и J.L. Chen. В этой модели предполагается, что однонаправленный ВКМ состоит из упругих волокон и изотропного пластического связующего. При этом для описания пластического поведения связующего применяются соотношения теории течения с изотропным упрочнением. В других работах для описания деформирования многослойного КМ в составе КБВД применяются нелинейные модели деформирования, предполагающие постепенное уменьшение жесткостных свойств в направлении поперёк волокон и при чистом сдвиге в плоскости армирования при возрастании внешних сил. Такие модели КМ по существу являются эмпирическими и не имеют строго теоретического обоснования.

Также рассмотрены наиболее распространенные численные способы для решения нелинейных задач при расчёте КБВД, в том числе метод последовательных приближений, переменных параметров упругости в сочетании с шаговым нагружением. Отмечены публикации, посвящённые разработке численных методов на основе метода конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния и оптимального проектирования КБВД с применением современных программных пакетов ANSYS, LS-DYNA, NASTRAN и др. Такие программные пакеты позволяют разрабатывать чрезвычайно подробные конечно-элементные модели и проводить расчёты в геометрически и физически нелинейных постановках.

В заключении отмечено, что учёт пластических деформаций как в материале лейнера, так и в КМ необходим для расчёта и проектирования металлокомпозитного баллона давления. При этом применение адекватных моделей нелинейного деформирования, является важной задачей. Следует учитывать то, что разработка КБВД включает расчёт и проектирование цилиндрической части, днища, а также конструкции баллона в области полюсного отверстия. Цель настоящей работы заключается в разработке методов проектного и поверочного расчётов цилиндрической части КБВД типов 2 и 3 для ЛА с помощью различных вариантов теории пластичности изотропного и ортотропного тел.

**Во второй главе** разработан метод расчёта напряжений и деформаций на цилиндрической части КБВД типа 2. Напряжения, действующие на бесконечно малый элемент цилиндрической части, показаны на Рис.1.

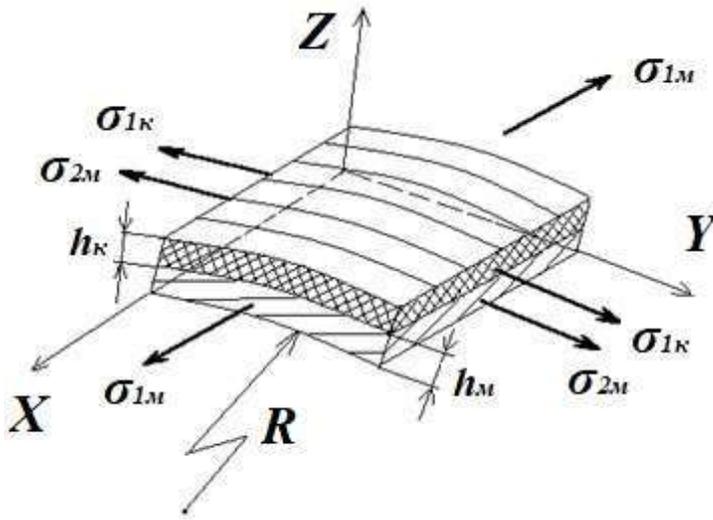


Рис.1. Напряженное состояние элемента цилиндрической части

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{2M} &= \frac{pR}{2h_M} \frac{2+\nu}{1+\gamma} \left(1 - \frac{2h_M}{R}\right), & \sigma_{1K} &= \frac{pR}{2h_M} \frac{E_1 \left[2-\nu \left(1 - \frac{2h_M}{R}\right)\right]}{E(1+\gamma)}, \\ \varepsilon_{1M} &= \frac{pR}{2h_M} \frac{(1+\gamma) \left(1 + \frac{2\nu h_M}{R}\right) - 2\nu - \gamma \nu^2 \left(1 - \frac{2h_M}{R}\right)}{E(1+\gamma)}, & \varepsilon_{2M} &= \frac{pR}{2h_M} \frac{2-\nu \left(1 - \frac{2h_M}{R}\right)}{E(1+\gamma)}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь  $E$ ,  $\nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала лейнера соответственно,  $E_1$  – продольный модуль КМ,  $\gamma = E_1 h_K / (E h_M)$ . Если не учитывать действие радиального напряжения  $\sigma_{3M}$ , что допустимо для случая  $\frac{(h_K + h_M)}{R} \ll 1$ , то формулы (2) упростятся к виду

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{2M} &= \frac{pR}{2h_M} \frac{2+\nu\gamma}{1+\gamma}, & \sigma_{1K} &= \frac{pR}{2h_M} \frac{E_1(2-\nu)}{E(1+\gamma)}, \\ \varepsilon_{1M} &= \frac{pR}{2h_M} \frac{1-2\nu+\gamma(1-\nu^2)}{E(1+\gamma)}, & \varepsilon_{2M} &= \frac{pR}{2h_M} \frac{(2-\nu)}{E(1+\gamma)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для описания пластического деформирования материала лейнера за пределами упругости так же, как и в работах В.В. Васильева и Н.Г. Мороза, применяются соотношения деформационной теории пластичности с линейным упрочнением

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{1M} &= \frac{\sigma_{1M} - \nu \sigma_{2M} + \nu p}{E} + \frac{1}{E_{ps}(\sigma_i)} \left( \sigma_{1M} - \frac{\sigma_{2M} - p}{2} \right), \\ \varepsilon_{2M} &= \frac{\sigma_{2M} - \nu \sigma_{1M} + \nu p}{E} + \frac{1}{E_{ps}(\sigma_i)} \left( \sigma_{2M} - \frac{\sigma_{1M} - p}{2} \right), \\ \varepsilon_{3M} &= -\frac{\nu(\sigma_{1M} + \sigma_{2M}) + p}{E} - \frac{1}{2} \frac{1}{E_{ps}(\sigma_i)} (\sigma_{1M} + \sigma_{2M} + 2p). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь  $E_{ps}(\sigma_i) = \sigma_i / \varepsilon_{ip}$  – секущий модуль пластических деформаций на диаграмме деформирования  $\sigma_i - \varepsilon_{ip}$ . Интенсивность напряжения  $\sigma_i$  подсчитывается по формуле

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{1M}^2 - \sigma_{1M} \sigma_{2M} + \sigma_{2M}^2 + p(\sigma_{1M} + \sigma_{2M}) + p^2}. \quad (5)$$

Для безмоментной цилиндрической части и нитяной модели однонаправленного ВКМ справедливы следующие соотношения статики

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{2M} h_M + \sigma_{1K} h_K &= pR, \\ \sigma_{1M} &= \frac{pR}{2h_M}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Напряжения и деформации в слоях при линейно упругом деформировании получаются следующими зависимостями

В данной диссертации разработан метод расчёта, основанный на решении систем нелинейных алгебраических уравнений с применением соотношений (4). Рассмотрены случаи линейного и нелинейного упрочнений материала лейнера. В случае линейного упрочнения деформирование материала за пределами упругости при  $\sigma_{11} \geq \sigma_T$ , где  $\sigma_T$  - предел текучести, описывается зависимостью

$$\sigma_{11} = \left(1 - \frac{E_k}{E}\right) \sigma_T + E_k \varepsilon_{11}, \quad (6)$$

где  $E_k$  – касательный модуль упругопластических деформаций. Деформирование материала с нелинейным упрочнением за пределами упругости описывается зависимостью

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} + a(\sigma_{11} - \sigma_T)^n, \quad (7)$$

где  $a$  и  $n$  – материальные параметры.

На основе уравнений равновесия (1) и формул (4)-(7) получены нелинейные алгебраические уравнения для линейного и нелинейного упрочнений, которые при заданном давлении  $p$  можно решить численно относительно интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , например, с помощью пакета *MatLab*. Зная  $\sigma_i$ , можно определить и другие параметры напряженно-деформированного состояния цилиндрической части.

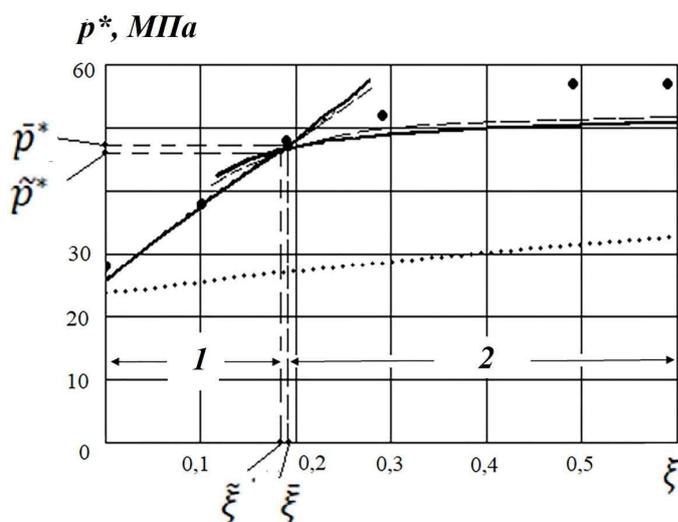


Рис.2. График зависимости разрушающего давления от параметра  $\xi = \frac{h_k}{h_m}$ :

- - эксперимент из работы В.В. Васильева и Н.Г. Мороза;
- - линейное упрочнение металла;
- - - - нелинейное упрочнение металла;
- ++++ - давление начала пластичности в лейнере

В рамках данного подхода можно рассчитать давление разрушения цилиндрической части. Под разрушением понимается исчерпание несущей способности либо композитного слоя, либо лейнера. Поэтому рассмотрены два механизма разрушения. Показано (Рис.2), что в диапазоне 1 разрушение баллона происходит от разрыва волокон композитного слоя, а в диапазоне 2 - от разрыва металлического лейнера. Отмечено, что величина давления  $p^*$ , найденная для материала лейнера с нелинейным упрочнением, лучше соответствует экспериментальным данным, чем величина, рассчитанная для материала лейнера с линейным упрочнением.

С помощью полученных результатов можно обосновать проектирование



$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{1M} &= \frac{E_p(1-A\nu)+B}{E(E_p+B)} \sigma_{1M} - \frac{B\nu\sigma_T}{E(E_p+B)}, \quad \varepsilon_{2M} = \frac{A(E+E_p)-\nu(E_p+B)}{E(E_p+B)} \sigma_{1M} - \frac{(E-B)\sigma_T}{E(E_p+B)}, \\ \sigma_{2M} &= \frac{E_p(2+\nu\gamma)}{E_p+\gamma(E_p+E)} \sigma_{1M} + \frac{E\gamma\sigma_T}{E_p+\gamma(E_p+E)}, \quad \sigma_{1K} = \frac{2(E_p+E)-\nu E_p}{\gamma(E_p+E)+E_p} \cdot \frac{E_1}{E} \sigma_{1M} - \frac{E_1\sigma_T}{\gamma(E_p+E)+E_p}, \end{aligned} \right\} (8)$$

где  $A = \frac{2+\nu\gamma}{1+\gamma}$ ,  $B = \frac{E\gamma}{1+\gamma}$ ,  $E_p$  - модуль линейного упрочнения на диаграмме деформирования  $\sigma_{2M} - \varepsilon_{2M}^p$ . В данных расчётных зависимостях не учитывается радиальное напряжение в лейнере.

В работе представлен анализ деформирования при  $\sigma_{1M} \geq \sigma_{1M}^*$ , т. е. после прохождения траектории нагружения через угловую точку С. Показано, что единственно возможным является вариант нагружения по траектории СЕ, в соответствии с которой  $\sigma_{1M} = \sigma_{2M}$ . Из этого следует, что при  $\sigma_{1M} \geq \sigma_{1M}^*$  лейнер является ранапряжённым. В этом случае напряженно-деформированное состояние лейнера описывается следующими равенствам

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{1M} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{E_p} - \frac{1-3\gamma(1-\nu)}{E\gamma} \right] (\sigma_{1M} - \sigma_{1M}^*) + \frac{(1-\nu)\gamma\sigma_T}{E\gamma - E_p[1-\gamma(1-\nu)]}, \\ \varepsilon_{2M} &= \frac{(\sigma_{1M} - \sigma_{1M}^*)}{E\gamma} + \frac{\sigma_T}{E\gamma - E_p[1-\gamma(1-\nu)]}, \quad \sigma_{2M} = \sigma_{1M}, \quad \sigma_{1K} = E_1 \varepsilon_{2M}. \end{aligned} \right\} (9)$$

$$\text{где } \sigma_{1M}^* = \frac{E\gamma}{E\gamma - [1-\gamma(1-\nu)]E_p} \sigma_T.$$

В отличие от подхода, основанного на применении деформационной теории пластичности, здесь не требуется применение численных методов для решения систем нелинейных алгебраических уравнений.

Для сравнения разработан способ расчёта цилиндрической части КБВД типа 2 на основании соотношений теория течения Прандтля-Рейсса для материала с линейным упрочнением. Получена следующая нелинейная система дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varepsilon_{2M}^p}{d\sigma_0} &= \frac{(A-0,5)(1-\nu)^2\sigma_0^2 - B(2-\nu)^2 - 2A+0,75)\sigma_0\varepsilon_{2M}^p + B^2(A-0,5)(\varepsilon_{2M}^p)^2}{[(1-A+A^2)E_p + (A-0,5)^2B]\sigma_0^2 + B(1-2A)(E_p+B)\sigma_0\varepsilon_{2M}^p + B^2(E_p+B)(\varepsilon_{2M}^p)^2}, \\ \frac{d\varepsilon_{1M}^p}{d\sigma_0} &= \frac{(\sigma_0 - 0,5\sigma_{2M})^2 + (\sigma_0 - 0,5\sigma_{2M})(\sigma_{2M} - 0,5\sigma_0)\frac{d\sigma_{2M}}{d\sigma_0}}{E_p[(1-A+A^2)\sigma_0^2 + B(1-2A)\sigma_0\varepsilon_{2M}^p + B^2(\varepsilon_{2M}^p)^2]}, \\ \frac{d\sigma_{2M}}{d\sigma_0} &= A - B \frac{d\varepsilon_{2M}^p}{d\sigma_0}. \end{aligned} \right\} (10)$$

где  $\sigma_0 = \frac{pR}{2h_m}$ , начальные условия:  $\sigma_0 = \sigma_{0T}$ ,  $\varepsilon_{1M}^p = \varepsilon_{2M}^p = 0$ ,  $\sigma_{2M} = \sigma_{2MT}$ . Величины  $\sigma_{0T}$  и  $\sigma_{2MT}$  определяются в соответствии с равенством для  $\sigma_{2M}$  из (3) и условием начала пластичности  $\sigma_i = \sigma_T$ .

Система уравнений (10) интегрируется численно. Такой подход является более сложным по сравнению с предложенным выше. Диаграммы деформирования, рассчитанные по формулам (9) и (10), качественно совпадают.

На основании зависимостей (8) предложен способ расчёта толщин лей-

нера и композитного слоя на цилиндрической части КБВД типа 2. Предполагается, что при расчётном давлении  $p = \bar{p}$  для композитного слоя выполняется условие  $\sigma_{1к} = F_{+1}$ , а для лайнера – условие равнонапряжённости  $\sigma_{1м} = \sigma_{2м}$ . Из уравнений (1) и формул (8) следуют выражения для определения толщин  $h_m$  и  $h_k$ . Они представлены в виде

$$h_m = \frac{\bar{p}R}{2E} \frac{1+k_p(1-\nu)}{\varepsilon_T+k_p\varepsilon_1}, \quad h_k = \frac{\bar{p}R}{2F_{+1}},$$

где  $k_p = \frac{E_p}{E}$ ,  $\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E}$ ,  $\varepsilon_1 = \frac{F_{+1}}{E_1}$ .

В данной главе изложены результаты весового анализа КБВД типа 2 со сферическими днищами. Радиус и длина цилиндрической части известны. Рассматриваются различные комбинации материала лайнера и композита, состоящие из алюминиевого сплава АД33, титанового сплава ВТ1, стали Х18Н10 для материала лайнера и стеклопластика, углепластика, органопластика для композитного слоя. Расчёты выполнены с применением соотношений, основанных на поверхности нагружения Треска-Сен-Венана, а также теории течения Прандтля-Рейсса. Теоретические результаты показывают, что наибольший весовой эффект достигается при использовании алюминиевого лайнера и композитного слоя из органопластика.

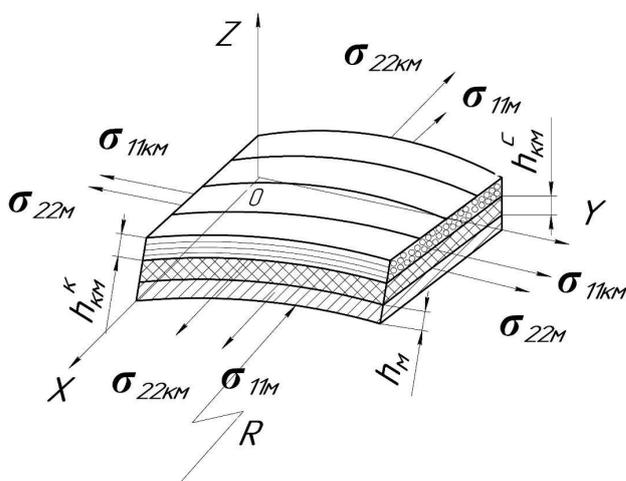


Рис.4. Напряжения, действующие в слоях КБВД типа 3

В четвертой главе разработаны расчётные соотношения и вычислительный алгоритм для выполнения поперечного расчёта цилиндрической части КБВД типов 2 и 3 с применением теории пластичности изотропного и ортотропного тел с трансляционным упрочнением для лайнера и однонаправленного ВКМ соответственно. В данной главе объектом исследования является цилиндрическая часть КБВД типа 3 (Рис. 4).

Для неё справедливы следующие соотношения статики:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11м} h_m + \sigma_{11км} h_{км} &= PR/2, \\ \sigma_{22м} h_m + \sigma_{22км} h_{км} &= PR. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

На основании равенств (11) и соотношений закона Гука получены расчётные зависимости для линейно упругого деформирования. Зависимости средних напряжений  $\{\sigma_c\}$  от средних деформаций  $\{\varepsilon_c\}$  в цилиндрической части КБВД типа 3 представлены в матричной форме

$$\{\sigma_c\} = [G_c]\{\varepsilon_c\}.$$

Здесь  $[G_c]$  - матрица упругих характеристик многослойного материала, вычисляемая по формуле

$$[G_c] = [D_M]\delta_M + [D_{KM}]\delta_{KM},$$

$$\text{где } \delta_M = \frac{h_M}{h_M + h_{KM}}, \delta_{KM} = 1 - \delta_M, [D_M] = \begin{bmatrix} E' & E'v & 0 \\ E'v & E' & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix}, \text{ здесь } E' = \frac{E}{1-\nu^2}, G = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Матрица жёсткости многослойного КМ  $[D_{KM}]$  определяется по формуле

$$[D_{KM}] = \sum_{i=1}^n [T_{1i}][D_K][T_{1i}]^T \delta_i,$$

где  $\delta_i = \frac{h_i}{H_{KM}}, H_{KM} = \sum_{i=1}^n h_i, h_i$  - толщина  $i$ -го монослоя из ВКМ,  $n$  - количество монослоёв,  $[D_K]$  - матрица жесткости монослоя

$$[D_K] = \begin{bmatrix} E'_1 & E'_1\nu_{21} & 0 \\ E'_2\nu_{12} & E'_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix},$$

где  $E_1, E_2, G_{12}$  - модули упругости монослоя,  $\nu_{12}, \nu_{21}$  - его коэффициенты Пуассона, здесь  $E'_1 = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, E'_2 = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}$ . Матрица преобразования поворота системы координат  $[T_{1i}]$  определена так

$$[T_{1i}] = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi_i & \sin^2 \varphi_i & \sin 2 \varphi_i \\ \sin^2 \varphi_i & \cos^2 \varphi_i & -\sin 2 \varphi_i \\ -\sin \varphi_i \cos \varphi_i & \sin \varphi_i \cos \varphi_i & \cos 2 \varphi_i \end{bmatrix},$$

где  $\varphi_i$  - угол армирования  $i$ -го монослоя, ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

При пластическом деформировании лайнера для цилиндрической части вводится матрица упругопластических касательных жесткостей

$$[D_{ep}] = [D_M^{ep}]\delta_M + [D_{KM}]\delta_{KM}.$$

В случае применения для лайнера теории пластичности изотропного тела с трансляционным упрочнением матрица упругопластических касательных жесткостей  $[D_M^{ep}]$  имеет вид

$$[D_M^{ep}] = \begin{bmatrix} E' - y_1^2 & E'v - y_1y_2 & -y_1y_3 \\ E'v - y_1y_2 & E'v - y_2^2 & -y_2y_3 \\ -y_1y_3 & -y_2y_3 & G - y_3^2 \end{bmatrix}.$$

Здесь введены следующие обозначения

$$y_1 = E'(s_{11}^0 + \nu s_{22}^0)/C, \quad y_2 = E'(s_{22}^0 + \nu s_{11}^0)/C, \quad y_3 = 2Gs_{12}^0/C,$$

$$C = \sqrt{L^2 + E'[(s_{11}^0)^2 + (s_{22}^0)^2 + 2\nu s_{11}^0 s_{22}^0] + 4G(s_{12}^0)^2},$$

где  $L^2 = \frac{4}{9} \sigma_T^2 \frac{de_{ij}^p}{d\xi_p} \frac{dr_{ij}}{d\xi_p}, (d\xi_p)^2 = \frac{2}{3} de_{ij}^p de_{ij}^p$  - параметр Одквиста,  $e_{ij}^p$  - девиатор

пластической деформации,  $s_{ij}^0 = s_{ij} - r_{ij}$  – девиатор активных напряжений;  $s_{ij}$  – девиатор напряжений. Для девиатора добавочных напряжений  $r_{ij}$  применены равенства, заимствованные из статьи Б.С.Сарбаева

$$dr_{ij} = \frac{2}{3} R de_{ij}^p - \alpha r_{ij} \frac{d\xi_p}{1 + \beta \xi_p}. \quad (12)$$

В формуле (12) должно быть  $\alpha > 0, R > 0, \beta > 0$ . Эти параметры материала определяются при обработке экспериментальных данных для материала лейнера. Для сравнения в работе получена матрица упругопластических касательных жесткостей изотропного тела  $[D_M^{ep}]$ , основанная на соотношениях теории течения Прандтля-Рейсса. В этом случае для линейного упрочнения имеем

$$\left[ D_{M(\text{изо})}^{ep} \right] = \begin{bmatrix} E' - n_1^2 & E'v - n_1n_2 & -n_1n_3 \\ E'v - n_1n_2 & E' - n_2^2 & -n_2n_3 \\ -n_1n_3 & -n_2n_3 & G - n_3^2 \end{bmatrix}.$$

Здесь введены следующие обозначения

$$n_1 = 3E'(s_{11} + vs_{22})/J, \quad n_2 = 3E'(s_{22} + vs_{11})/J, \quad n_3 = 6Gs_{12}/J$$

$$J = \sqrt{4\sigma_i^2 E_p + 9E'[(s_{11})^2 + (s_{22})^2 + 2vs_{11}s_{22}] + 4G(s_{12})^2}.$$

В данной диссертации рассматривается нелинейное деформирование однонаправленного ВКМ. Для его описания применяются соотношения теории пластичности ортотропного тела с трансляционным упрочнением при плоском напряжённом состоянии, предложенные Б.С. Сарбаевым. Для нагружения вдоль волокон принимается линейно упругое деформирование. Уравнение поверхности нагружения имеет такой вид

$$B_{22}s_{22}^2 + B_{33}s_{12}^2 = \sigma_{22T}^2,$$

где  $B_{22} = 1, B_{33} = (\sigma_{22T}/\sigma_{12T})^2, \sigma_{22T}$  и  $\sigma_{12T}$  – пределы текучести однонаправленного ВКМ при растяжении поперёк волокон и при чистом сдвиге в плоскости армирования. Активные напряжения рассчитываются по формулам

$$s_{22} = \sigma_{22} - r_{22}, s_{12} = \sigma_{12} - r_{12}.$$

Для добавочных напряжений принимаются выражения

$$r_{22} = \int_0^{z_p} R_{22}(z_p - z'_p) \frac{d\varepsilon_{22}^p}{dz'_p} dz'_p; \quad r_{12} = \int_0^{z_p} R_{33}(z_p - z'_p) \frac{d\gamma_{12}^p}{dz'_p} dz'_p, \quad (13)$$

где  $dz_p = d\xi_p/f(\xi_p)$  – временноподобный параметр, отражающий историю нагружения. Параметр упрочнения определяется по формуле

$$(d\xi_p)^2 = (d\varepsilon_{22}^p)^2 + B_{33}^{-1}(d\gamma_{12}^p)^2.$$

Матрица упругопластических касательных жесткостей для однонаправленного ВКМ  $[D_{KM}^{ep}]$  получена в следующем виде

$$[D_k^{ep}] = [D_k] - \frac{\{y\}\{y\}^T}{\sigma_{22T} C^2},$$

где  $\{y\} = [D_k]\{x\}$ ,  $C^2 = \frac{\{x\}^T [D_k] \{x\}}{\sigma_{22T}} + L^2$ . Здесь  $L^2 = \sigma_{22T} \frac{d\{\varepsilon_p\}^T}{d\xi_p} \frac{d\{r\}}{d\xi_p}$ ,  $\{x\} = [B]\{s\}$ ,  $d\{\varepsilon_p\} = (0, d\varepsilon_{22}^p, d\gamma_{12}^p)^T$  - вектор приращения пластической деформации;  $\{r\} = (0, r_{22}, r_{12})^T$  - вектор добавочных напряжений. Для матрицы  $[B]$  имеем

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} \end{bmatrix}$$

В интегральных выражениях (13) применены экспоненциальные ядра следующего вида

$$R_{22}(z_p) = R_{22} \exp(-\alpha_{22} z_p); \quad R_{33}(z_p) = R_{33} \exp(-\alpha_{33} z_p).$$

В работе предложен численный способ интегрирования определяющих соотношений с применением метода шагового нагружения и переменных параметров упругости.

Для демонстрации поверочных расчётов с применением полученных расчётных зависимостей и предлагаемого численного способа решения выполнен анализ напряжений и деформаций в цилиндрической части КБВД типа 3. Исходные данные и результаты эксперимента заимствованы из работы Serkan Kangal. В указанной работе для описания деформирования однонаправленного ВКМ применяется закон Гука. В данной диссертации помимо линейной модели ВКМ используются также соотношения теории пластичности ортотропного тела с трансляционным упрочнением. Для сравнения результатов выполнен расчёт в пакете ANSYS с применением модели постепенной деградации поведения материала. В обоих случаях для лейнера используются соотношения теории течения Прандтля-Рейсса. Полученные результаты приведены в Таблице 1. Показано, что учет неупругих деформаций ВКМ позволяет получить теоретические результаты, удовлетворительно совпадающие с известными экспериментальными данными.

Таблица 1.

Разрушающие давления, рассчитанные по разным моделям

Эксперимент (МПа)	Предлагаемая нелинейная модель ВКМ (МПа)	Разность (%)	МКЭ (МПа)	Разность (%)	Линейная модель ВКМ (МПа)	Разность (%)
91,9	89,9	-2,22	89,4	-2,80	85,4	-7,61

Выполнен анализ остаточных напряжений и деформаций после разгрузки, а также получены диаграммы деформирования при повторном нагружении. Рассмотрен вариант КБВД типа 3 из работы В.В. Васильева (Рис.5). В данном случае для материала лейнера применяются соотношения теории пластичности изотропного тела с трансляционным упрочнением. Для сравнения

приведены результаты расчёта на основе метода конечных элементов и теории течения Прандтля-Рейсса. В обоих случаях используется линейная модель для ВКМ.

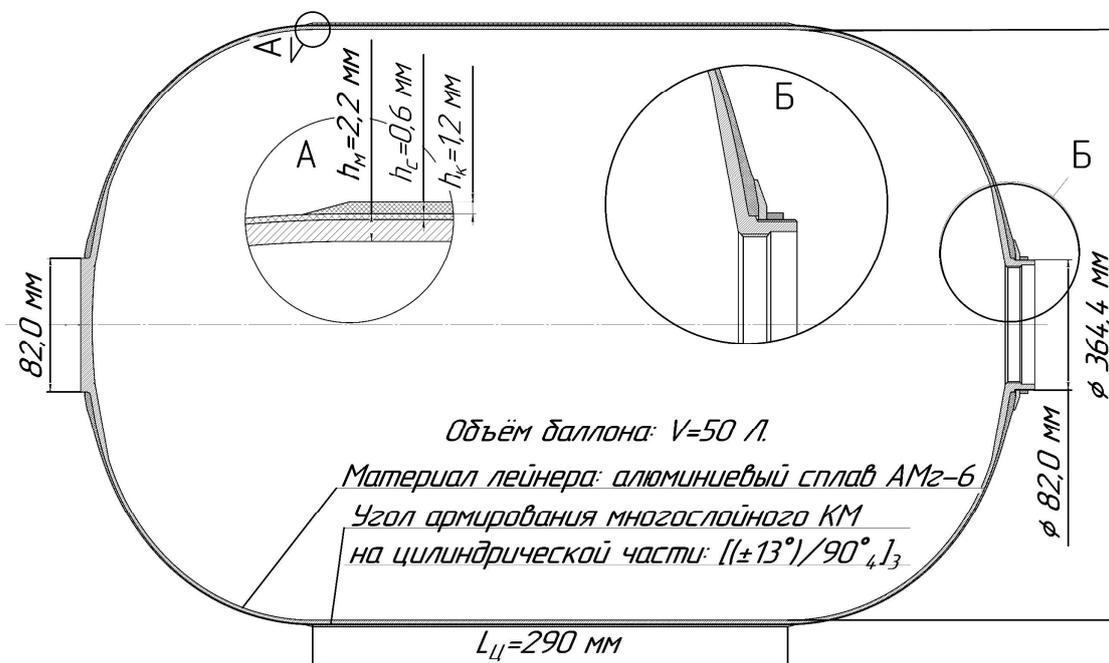


Рис.5. КБВД типа 3 с алюминиевым лайнером и композитными слоями из углепластика

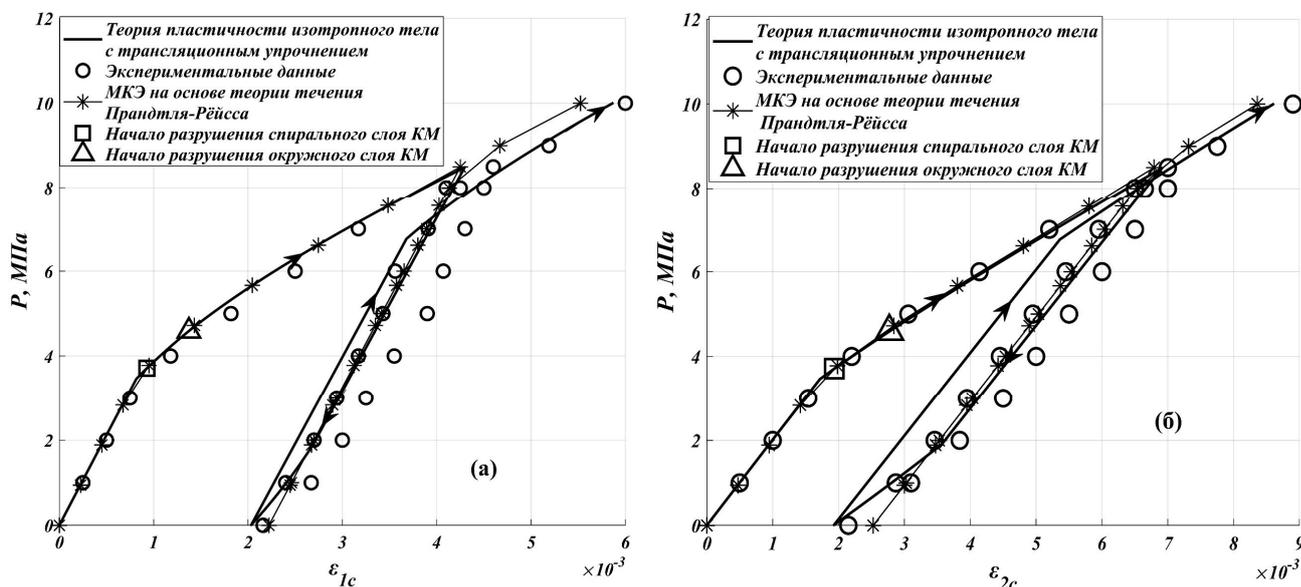


Рис.6. Зависимости осевой (а) и окружной (б) деформаций цилиндрической части КБВД от давления при активном нагружении и разгрузке

Показано, что модель, основанная на соотношениях теории течения Прандтля-Рейсса с изотропным упрочнением, не позволяет адекватно описывать нелинейное деформирование конструкции и образование петель гистерезиса при повторном нагружении (Рис.6). При этом полученные остаточные де-

формации после разгрузки превышают деформации, зафиксированные в эксперименте. После разгрузки в материале лайнера сохраняются сжимающие остаточные напряжения, которые могут вызывать потерю устойчивости тонкостенного лайнера. Выполнен расчёт допускаемого давления предварительной опрессовки (ДПО) рассматриваемого баллона в соответствии со стандартом DOT-CFFC. Для сравнения приведены результаты расчёта, полученные с применением соотношений как теории пластичности изотропного тела с трансляционным упрочнением, так и теории течения Прандтля-Рейсса. Для обоих вариантов используется линейная модель для однонаправленного волокнистого КМ.

Таблица 2.

Допускаемые диапазоны ДПО, рассчитанные по двум моделям

Номер условия по DOT-CFFC.	Трансляционное упрочнение	Изотропное упрочнение
№1	$6 \text{ МПа} \leq P_{\text{п}} \leq 8,4 \text{ МПа}$	$6 \text{ МПа} \leq P_{\text{п}} \leq 7,2 \text{ МПа}$
№2	$\geq 6,1 \text{ МПа}$	$\geq 6,1 \text{ МПа}$
№3	$\leq 7,1 \text{ МПа}$	$\leq 6,8 \text{ МПа}$
№4	$\leq 11 \text{ МПа}$	$\leq 8,1 \text{ МПа}$
ДПО	$6,1 \text{ МПа} \leq P_{\text{п}} \leq 7,1 \text{ МПа}$	$6,1 \text{ МПа} \leq P_{\text{п}} \leq 6,8 \text{ МПа}$

Из полученных результатов (см. Таб.2) следует, что учёт трансляционного упрочнения материала лайнера расширяет диапазон допускаемого ДПО.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Разработаны методы анализа напряженно-деформированного состояния цилиндрической части КБВД типов 2 и 3 с рабочим давлением 10÷40 МПа на основании различных теорий пластичности. Для описания деформирования изотропного материала лайнера применены деформационная теория, теория течения Прандтля-Рейсса, теория течения на основе поверхности нагружения Треска-Сен-Венана, теория пластичности с трансляционным упрочнением. Для анализа нелинейного деформирования однонаправленного КМ используются соотношения теории пластичности ортотропного тела с трансляционным упрочнением.

2) Показано, что при выполнении проектных расчётов цилиндрической части КБВД типа 2 целесообразно использовать соотношения деформационной теории пластичности, а также соотношения теории течения на основе поверхности нагружения Треска-Сен-Венана. В последнем случае на основе гипотезы равнонапряжённости металлического лайнера можно получить обозримые аналитические зависимости, удобные в практических расчётах.

3) Для выполнения поверочных расчётов цилиндрической части КБВД типов 2 и 3 в диссертации разработан способ получения матрицы упругопластических характеристик многослойных материалов на основе соотношений

теории пластичности изотропного и ортотропного тел с трансляционным упрочнением и разработан способ численного интегрирования определяющих соотношений с применением метода переменных параметров упругости и шагового нагружения. С его помощью выполнен анализ нелинейного деформирования цилиндрической части КБВД, включающий нелинейную разгрузку, образование петли гистерезиса при повторном нагружении. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными.

4) Предложенные в диссертации методы расчёта позволяют выполнить: а) расчёт предельной нагрузки для КБВД; б) анализ массовых характеристик цилиндрической части с учётом нелинейного поведения лейнера и многослойного КМ; в) обосновать давление предварительной опрессовки в соответствии с требованиями современной нормативно-технической документации. Представлены соответствующие расчёты, которые в ряде случаев уточняют известные результаты.

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Сарбаев Б.С., Чжан С. Вариант расчёта цилиндрической части композитного баллона высокого давления с несущим металлическим лейнером // Конструкции из композиционных материалов. № 2 (158), 2020; С. 3-11.

2. Сарбаев Б.С., Чжан С. Расчёт цилиндрической части металлокомпозитного баллона давления // Композиты и наноструктуры, том 12; выпуск 4(48), 2020. С.144-150.

3. Сарбаев Б.С., Чжан С. Расчёт цилиндрической части комбинированного баллона давления с помощью соотношений деформационной теории пластичности // IV Международная молодёжная конференция «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники». Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. Сборник докладов. С. 71-77.

4. Сарбаев Б.С., Чжан С. Расчёт напряжений и деформаций в цилиндрической части композитного баллона высокого давления с несущим металлическим лейнером // Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства, 44-е, 28-31 января 2020 года : сборник тезисов : в 2 т. / РАН, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. - Т. 2. - С. 92-93.

5. Сарбаев Б.С., Чжан С. Расчёт остаточных напряжений и деформаций в цилиндрической части композитного баллона давления с несущим металлическим лейнером // Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики», Москва, 2–4 декабря 2020 г.: Материалы конференции. Часть 2. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана. с.174-178. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-4-2068.