

2. Двигательные установки ракет на жидком топливе / под ред. Элиот Ринг; пер. с англ. Ю.Б. Воронова, В.П. Оводова, Б.И. Трифонцева. Москва : Мир, 1966. 404 с.

3. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / В.М. Багров, А.В. Курпатенков, В.М. Поляев и др.; под ред. В.М. Поляева. Москва : УНПЦ «Энергомаш», 1997. 328 с.

4. Позднышев Н.О. Влияние деформированности структуры плетения сеток на проектные параметры сетчатых фазоразделителей. *Вісник*

*Дніпропетровського університету. Серія ракетно-космічна техніка: Зб. наук. праць. Вип. 16. Т. 2. 2012. С. 227–236.*

5. Позднышев Н.О. Гидродинамические характеристики сеток с измененной структурой плетения. *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. праць. / наук. ред. д-р техн. наук С.О. Давидов. Днепр : Пороги, 2013. Т. 15. С. 75–80*

*Надійшла до редколегії 01.06.2018 р.*

УДК 539.4: 621.81

## **ИСПЫТАНИЕ СОПЛОВОЙ МЕМБРАНЫ МИКРОГАБАРИТНЫХ РДТТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ**

**Ю.С. Прокофьев, В.В. Сатокин, Ю.Н. Бабей**

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»  
ул. Криворожская, 3, г. Днепр, 49000, Украина, e-mail: ofsale@gmail.com*

Розглянуто задачу проведення натурних випробувань соплової мембрани мікрогабаритного РДТТ, аналізу результатів і проведення числового моделювання експлуатаційного стану віртуальної копії реальної мембрани.

**Ключові слова:** мембрана, випробування, експлуатаційний стан, міцність, РДТТ.

The problem conducting field tests nozzle membrane of micro size RESF, analysis results and carrying out numerical modeling of operational state virtual copy real membrane is considered.

**Keywords:** membrane, experiment, operating state, durability, RESF.

Рассмотрена задача по проведению натурных испытаний сопловой мембраны микрогабаритного РДТТ, анализа их результатов и проведения численного моделирования эксплуатационного состояния виртуальной копии реальной мембраны.

**Ключевые слова:** мембрана, испытания, эксплуатационное состояние, прочность, РДТТ.

**Введение.** Сопловая мембрана с проточкой ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) предназначена для герметичности РДТТ и создания уровня внутрикамерного давления для начала его работы.

В статье представлены данные проведенного сравнения результатов испытаний сопловой мембраны с проточкой и результатов виртуального моделирования в комплексе ANSYS мембраны по конструкторской документации и виртуальной копии реальной мембраны.

**Цель исследований.** Государственным предприятием «Конструктор-  
© Прокофьев Ю.С., Сатокин В.В., Бабей Ю.Н., 2018

ское бюро «Южное» была поставлена задача проведения пневматических разрушающих испытаний (ПРИ) сопловой мембраны микрогабаритных РДТТ внутренним давлением до разрушения. При испытаниях возникли вопросы об уровне момента затяжки узла крепления мембраны, характере приклеивания теплозащитного покрытия к поверхности мембраны и их влиянии на характер разрушения мембраны: выщелкивание вместо вылета.

Фактическая конструкция разрушенной сопловой мембраны с соплом в корпусе РДТТ приведена на рис. 1.

Анализ состояния мембраны перед и после испытаний проводился с использованием «метода Галогена», описанного в [1].

#### **Методы и способы исследований.**

При испытаниях сопловая мембрана

закреплялась в испытательной оснастке, имитирующей ее закрепление при эксплуатации в составе РДТТ.



Рис. 1. Разрушенная мембрана с соплом РДТТ

При пневматических испытаниях сопловая мембрана подвергается воздействию внутреннего давления, имитирующего градиентный рост внутрикамерного давления при начале работы РДТТ.

Численное исследование и моделирование проводилось в комплексе конечно-элементного анализа ANSYS.

Исследование и моделирование разрушения проводилось в комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA.

#### **Результаты и их обсуждение.**

**Пневматические испытания.** На рис. 2 показана часть мембраны, разрушенной вылетом, со световым следом по «методу Галогена».



Рис. 2. Часть разрушенной мембраны

Световой след своей кривизной указывает характер деформирования

мембраны, его несимметричность и направление разрушения.

Справа от края к центру след практически радиальный, что говорит о малой величине деформирования в плоскости мембраны и деформировании большей частью в перпендикулярном направлении.

Слева след изогнут в направлении деформирования, т.е. левая часть деформировалась в направлении второго квадранта, и здесь мембрана испытала боковые перемещения при действии давления.

На рис. 3 показан анализ поверхности мембраны до испытаний.

Изменение геометрии светового луча на поверхности мембраны (внизу верхнего правого и нижнего левого снимка ширина светового следа больше) отражает изменение толщины мембраны и направление изменения, что подтверждают полученные данные для построения виртуальной 3D-копии мембраны. На рис.

4 показан анализ поверхности мембраны после испытаний давлением без градиента, при котором произошло разрушение мембраны выщелкиванием.

Изменение геометрии светового луча на поверхности мембраны отражает направление деформирования мембраны.

**Виртуальные испытания.** Для ответа на вопрос о влиянии уровня момента затяжки при креплении мембраны и схеме приклеивания теплозащитного покрытия (ТЗП) к корпусу, в месте установки РДТТ, и поверхности мембраны на характер разрушения мембраны, были построены конечно-элементные модели мембраны и мембраны с проточкой в оснастке, приведенные на рис. 5.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) мембраны с проточкой (слева) и без проточки (справа) приведено на рис. 6.



Рис. 3. Поверхность мембраны до испытаний



Рис. 4. Поверхность мембраны после испытаний

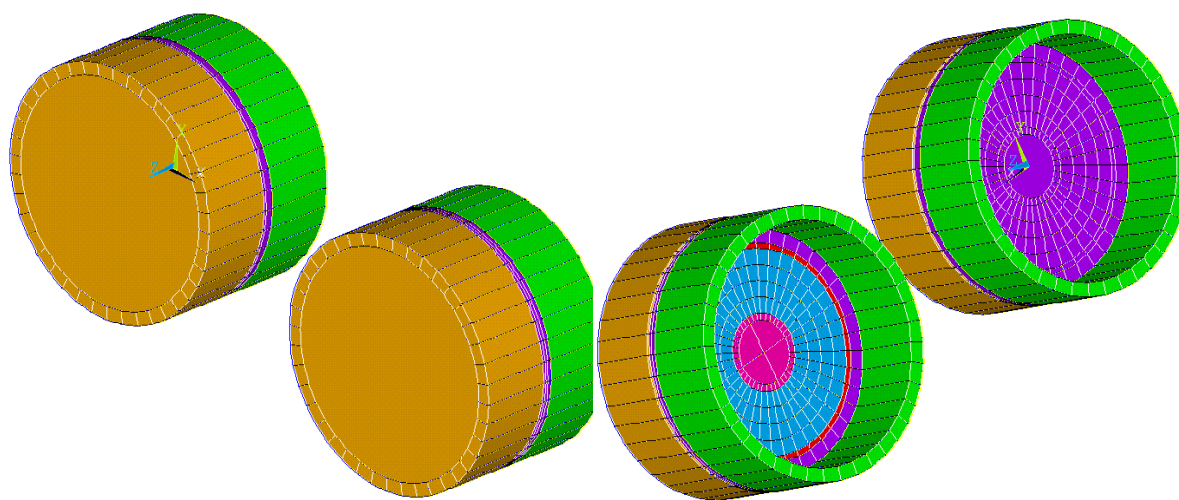


Рис. 5. Модель мембраны в оснастке

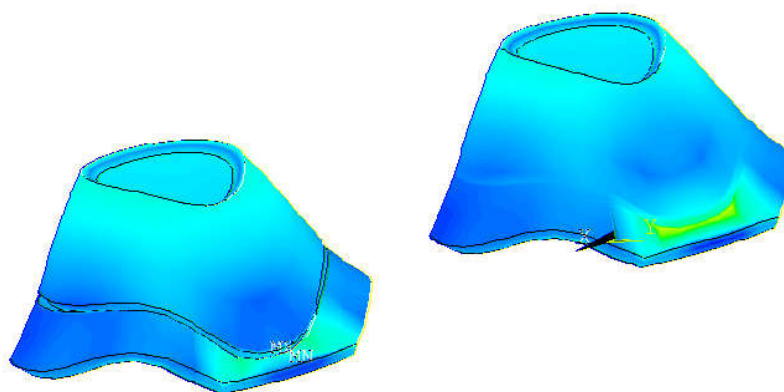


Рис. 6. НДС мембраны в оснастке



Анализ картины НДС мембраны в оснастке для различных моментов затяжки и схем приклеивания показал, что картина деформирования мембраны, соответствующая началу разрушения выщелкиванием, вместо вылета наблюдается при низком моменте затяжки с приклеиванием ТЗП к поверхности мембраны. По отдельности эти факторы не привели к разрушению мембраны выщелкиванием как при моделировании, так и при испытаниях.

Для прогнозирования НДС мембраны при различных уровнях эксплуатационных нагрузок была построена 3D-копия исследуемой мембраны с использованием программного модуля, описанного в [2].

При создании 3D-копии было обнаружено наличие утолщений по краям проточки.

В качестве расчетной схемы мембраны рассматривалась виртуальная копия реальной мембраны с имитацией условий закрепления в РДТТ. Была построена модель мембраны по документации без проточки (1) и с проточкой (2), а также виртуальная копия реальной мембраны без проточки (3), с проточкой (4), с утолщением в зоне проточки (5).

Построенные модели мембраны приведены на рис. 7. НДС указанных мембран показан на рис. 8 и 9.

Наличие изменений по толщине мембраны, учтенное при создании виртуальной 3D-копии, приводит к несимметричностям НДС, которые видны на рис. 8 и 9 для моделей 3, 4, 5, в отличие от симметричного НДС для моделей 1 и 2.

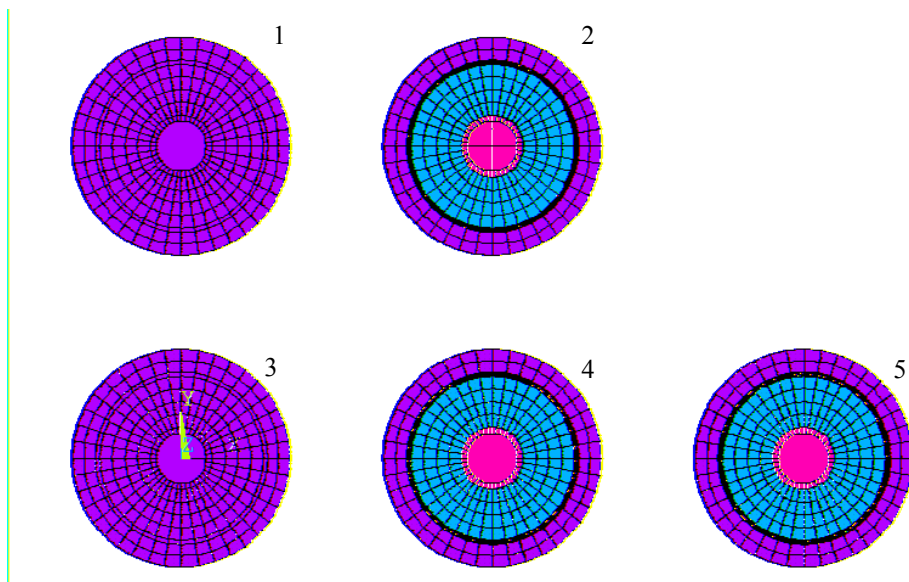


Рис. 7. Модели мембраны

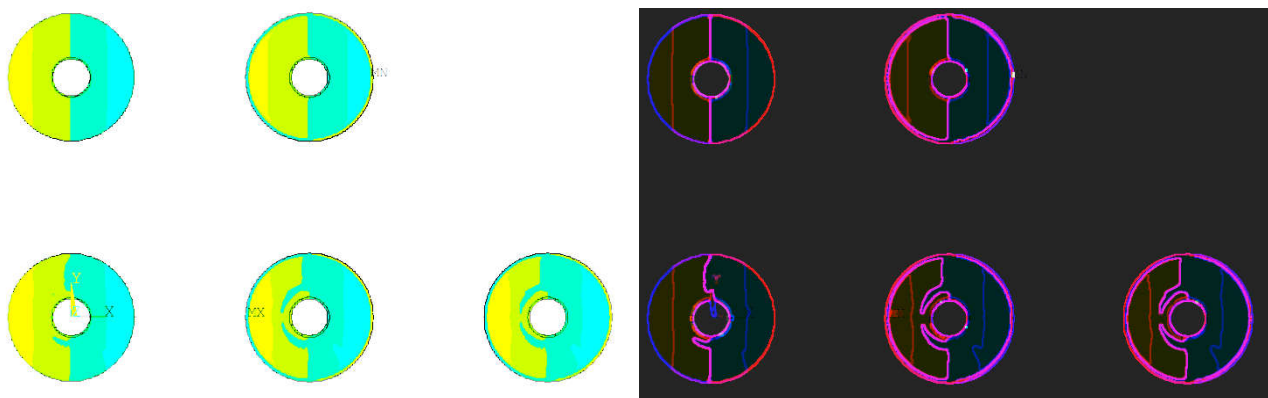


Рис. 8. Напряжения XZ

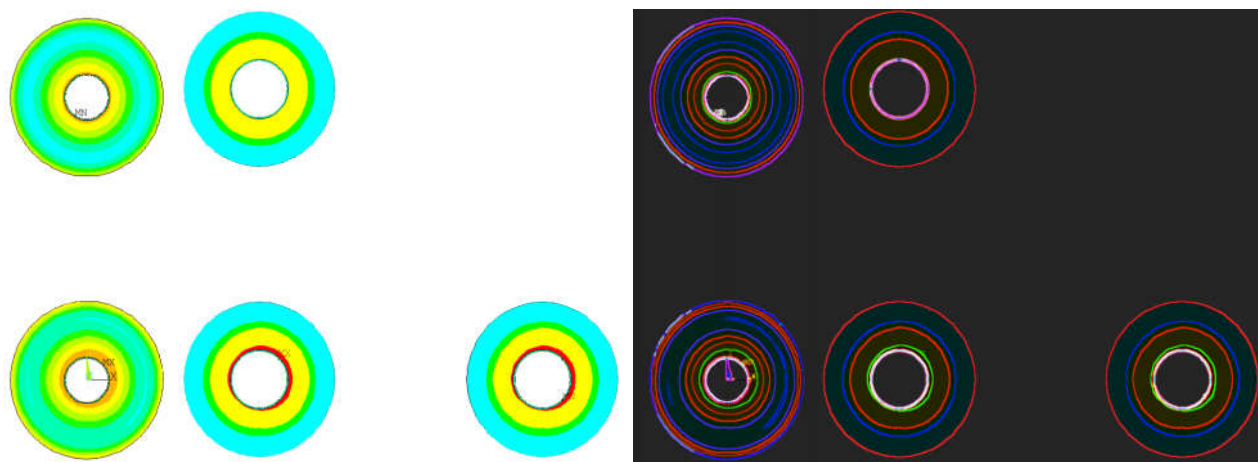


Рис. 9. Эквивалентные напряжения

Слева классическое изображение НДС, а справа картина, обработанная художественным эффектом «светящиеся края», как внутренним методом программы WORD, который позволяет более наглядно показать особенности НДС.

Анализ проведенного исследования показал, что утолщение возле проточки, создаваемое резцом, снижает уровень НДС мембраны.

**Моделирование разрушения.** Задачей моделирования разрушения было

проведение анализа схемы вылета мембраны и уровня напряжений при заданной величине разрушающей деформации, а также расчетное подтверждение времени срабатывания мембраны.

На рис. 10 показаны этапы разрушения мембраны с проточкой от воздействия внутреннего давления. Расчетное время разрушения мембраны вылетом совпадает с экспериментальным временем, как и характер разрушения.

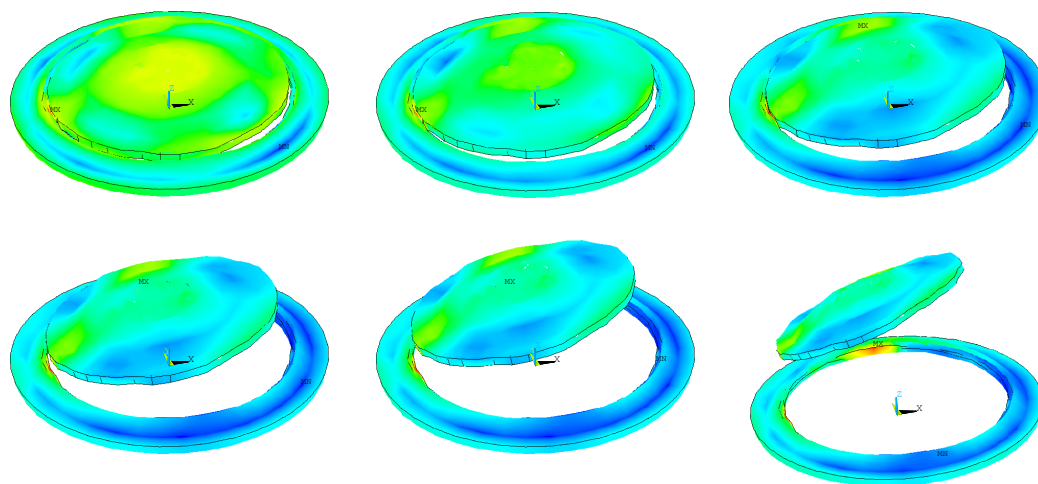


Рис. 10. Разрушение мембраны

**Выводы.** Практическая реализация результатов виртуальных испытаний позволяет подтвердить заданный уровень прочностных требований мембраны и уточнить механизм ее крепления.

Применение виртуального моделирования с созданием 3D-копии мембраны позволяет не только минимизировать

объем экспериментальной отработки, но и уточнить уровни НДС.

Реализация «метода Галогена» позволяет определять зоны максимального деформирования мембраны и позволяет при испытаниях более эффективно проводить наблюдения за состоянием объекта.

ПРИ проводились в феврале 2018 года.

#### **Библиографические ссылки**

1. Сатокин В.В., Мусиенко П.Б., Виртуальные испытания корпуса сопла РДТТ. *Космическая техника. Ракетное вооружение*. Днепр, ГП «КБ «Южное». 2015. № 3. С. 46–49.

2 Сатокин В.В. Разработка и апробация программного модуля для построения виртуальных моделей реальных конструкций в комплексе ANSYS. *Космическая техника. Ракетное вооружение*. Днепропетровск, ГП «КБ «Южное». 2016. № 2. С. 57–59.

*Надійшла до редколегії 01.08.2018 р.*

УДК 629.78.064.5

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА С ЦЕЛЮ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

В.А. Пырец, В.С. Рева, К.Н. Земляной, О.В. Гаврилов, К.В. Безручко

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени акад. М.К. Янгеля, ул. Криворожская, 3, г. Днепр, 49008, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com*

Розглянуто питання визначення гарантованого залишкового терміну служби акумуляторної батареї, який дозволяє точно визначити параметри і характеристики, а також спрогнозувати їх у процесі її життєвого циклу. Розглянуто один із способів підтвердження працездатності хімічних джерел струму і визначення їх подальшої безвідмовної роботи, якими є прискорені кліматичні випробування. Також приведено залежність розрядної ємності хімічних джерел струму у вигляді математичних моделей, що дозволяє при відомій по результатах вимірювань ємності при прискорених кліматичних випробуваннях визначити характеристики хімічних джерел струму при нормальних умовах і навпаки.

**Ключові слова:** хімічне джерело струму, ємність, експериментальна база, математична модель.

In the article the question definitions of the guaranteed residual service life of the storage battery, which allows you to accurately determine the parameters and characteristics, and also to predict them in the course of its life cycle. One of the methods of confirming the operability of chemical current sources and determining their further failure-free operation is considered, which are accelerated climatic tests. Also shown is the discharge capacity of chemical sources of current in the form of mathematical models, what makes it possible to determine the characteristics of chemical sources of current under normal conditions, and vice versa, when the capacitance is known from measurements of accelerated climatic tests.

**Keywords:** chemical current source, capacity, experimental base, mathematical model.

Рассмотрен вопрос определения гарантированного остаточного срока службы аккумуляторной батареи, который позволяет точно определить параметры и характеристики, а также спрогнозировать их в процессе ее жизненного цикла. Рассмотрен один из способов подтверждения работоспособности химических источников тока и определения их дальнейшей безотказной работы, которыми являются ускоренные климатические испытания. Также приведена зависимость разрядной емкости химических источников тока в виде математических моделей, что позволяет при известной по результатам измерений емкости при ускоренных климатических испытаниях определить характеристики химических источников тока при нормальных условиях и наоборот.

**Ключевые слова:** химический источник тока, емкость, экспериментальная база, математическая модель.

**Введение.** Одной из важнейших задач систем электроснабжения (СЭС) как стационарных, так и подвижных стартовых комплексов является обеспечение бесперебойности электропитания технологического оборудования, участвующего в подготовке и пуске ракеты космического назначения (РКН). Для этих задач в СЭС применяются источники бесперебойного

питания (ИБП), накопителем электрической энергии в которых являются химические источники тока (ХИТ). При эксплуатации ИБП основными параметрами, характеризующими состояние ХИТ, являются емкость, заряженность, напряжение разомкнутой цепи, внутреннее сопротивление, вольт-амперные и зарядно-напряженные характеристики. Реальное

© Пырец В.А., Рева В.С., Земляной К.Н., Гаврилов О.В., Безручко К.В., 2018