

В. Ю. Журавлев, М. В. Кубриков

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ВЫВОРАЧИВАНИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЕЙ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

*Представлен процесс проектирования выворачивающихся металлических разделителей двигательных установок топливных баков космических аппаратов на основе использования энергетического принципа.*

*Ключевые слова: тонкостенный диафрагма-разделитель, топливный бак, выворачивание, оболочка.*

Важнейшим условием нормальной работы агрегатов космического летательного аппарата является непрерывность подачи компонентов топлива, которая может быть нарушена при наличии газовых пузырей в топливоподающих магистралях, например, при запуске в условиях невесомости или вследствие временного оголения заборного устройства, при маневре летательного аппарата. Для разграничения газовой и жидкой фаз успешно применяют механические разделители. Большинство разделителей хорошо компенсируют температурные расширения топлива.

Однако только некоторые из них имеют высокие показатели по заполнению топливом объема бака и невысокую долю остатка невывесняемого компонента. Значительного улучшения использования свободного объема бака можно добиться применением в качестве вытеснительных устройств тонкостенных металлических выворачивающихся диафрагм-разделителей.

Выворачивание разделителя осуществляется перемещением диафрагмы-разделителя за счет пластического деформирования материала ее стенки. В процессе выворачивания разделитель претерпевает большие пластические деформации, близкие к предельно допустимым для используемых материалов. Основными направлениями деформирования стенки разделителя считаются меридиональное и окружное. Разработка математической модели процесса выворачивания разделителя основана на анализе условий работы конструкции тонкостенной оболочки и учете накладываемых ограничений. В настоящее время отсутствует программное обеспечение, позволяющее моделировать процесс выворачивания металлических диафрагм-разделителей, в силу недостаточной изученности физической сути процесса. Предлагаемая программа реализует выработанный подход на основе результатов экспериментальных исследований и моделирования процесса выворачивания диафрагм-разделителей различной формы на протяжении ряда лет.

В процессе работы в промежуточном положении при симметричном выворачивании поверхность разделителя можно рассматривать состоящей из трех зон (рис. 1).

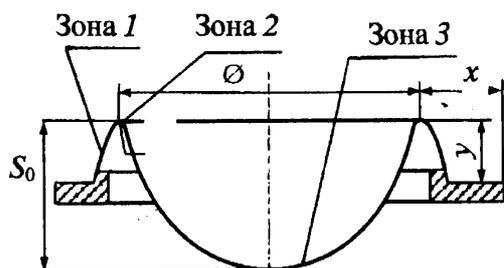


Рис. 1. Промежуточное положение диафрагмы-разделителя

Зона 1 – вывернутая часть разделителя, прошедшая пластическое деформирование. Форма и размеры этой части в процессе дальнейшего выворачивания считаются неизменными.

Зона 2 – зона пластического деформирования материала, за счет которой осуществляется процесс выворачивания, представляет собой торовую поверхность, размеры которой меняются в процессе выворачивания разделителя.

Зона 3 – срединная невывернутая часть разделителя, которая считается недеформированной, она лишь перемещается вдоль оси симметрии разделителя.

Процесс выворачивания разделителя инициируется в районе технологически сформированной периферийной торовой поверхности, примыкающей к центральной недеформированной части. Вытеснение жидкой фазы над диафрагмой-разделителем происходит за счет разности давления между газовой и жидкой фазами при перемещении центральной части разделителя, не прошедшей деформирование. Форма зоны пластической деформации считается частью торовой поверхности и перемещается вдоль меридианов по центральной зоне от периферии к центру. Радиус торовой поверхности зоны перекатывания формируется в зависимости от ряда параметров образующей и от толщины разделителя.

Процесс выворачивания центральной части происходит симметрично или с небольшой асимметрией. В процессе выворачивания нормаль к плоскости перекатывания (с выпуклой стороны зоны перекатывания) несколько отклоняется от оси симметрии разделителя. Это отклонение хаотично и направлено в сторону увеличения толщины материала в данном месте.

Радиус зоны перекатывания, как и нормаль к поверхности этой зоны, не остается постоянным. Он имеет максимальные и минимальные значения, поэтому форма торовой поверхности перекатывания не всегда симметрична.

Выворачивание диафрагмы-разделителя на заключительном этапе (при остатке объема примерно в 5 %) происходит со значительным влиянием упругих деформаций в невывернутой области, торовой и в зоне, прошедшей деформирование по схеме замедленного «хлопка». При этом выворачивание происходит на небольшом телесном угле разделителя, где разница в толщинах оказывается незначительной.

К основным параметрам процесса выворачивания металлического разделителя топливного бака следует отнести давление выворачивания, мгновенную форму раз-

делителя и вытесненный к этому времени объем. Эти параметры определяются значением радиуса перекачивания и деформациями по главным направлениям. Давление выворачивания и радиус зоны перекачивания зависит от мгновенной формы невывернутой части разделителя, т. е. от положения зоны перекачивания на невывернутой части разделителя.

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что деформирование разделителя на всем протяжении процесса выворачивания носит четко выраженный характер и сосредоточен в торовой зоне перекачивания. Под действием перепада давления на разделителе в результате деформации зоны перекачивания недеформированная часть перемещается относительно прошедшей деформирование. Для материалов, используемых при изготовлении металлических диафрагм-разделителей значения напряжений предела текучести и предела прочности близки, что позволяет заменить реальную диаграмму растяжения материала идеально-пластической диаграммой. Это обстоятельство не приводит к существенным погрешностям в расчете величин давления выворачивания.

Для идеально-пластического тела пластическое течение определяется конечной комбинацией нагрузок, путь нагружения, начальные напряжения и деформации при этом не учитываются [1]. Поэтому используется энергетический принцип механики деформируемого твердого тела.

Накопленный в математическом моделировании опыт позволил выработать определенную технологию исследования сложного технического объекта, диафрагмы-разделителя. Технология основана на анализе результатов экспериментов и построении математических моделей с использованием ЭВМ. Процесс постановки задачи, поддающийся математическому анализу, потребовал разносторонних знаний – знания конструкции исследуемого объекта, технологии его производства, условий эксплуатации и испытаний, известных экспериментальных данных по исследуемой теме и т. п.

После постановки задачи производилось построение математической модели, которая неразрывно связана с физической моделью процесса симметричного выворачивания тонкостенных оболочек вращения.

При построении математической модели процесса выворачивания диафрагмы-разделителя с пластическим деформированием материала использован энергетический принцип:

$$\int_F X_{ni} x_{ni} dF \leq \tau_s \int_F H' dV,$$

где  $X_{ni}$  – поверхностная нагрузка;  $x_{ni}$  – скорость перемещения поверхности;  $F$  – движущаяся в результате деформации поверхность;  $\tau_s$  – предел текучести материала при сдвиге;  $H'$  – кинематически возможная интенсивность скоростей деформации;  $V$  – объем пластической зоны.

Интенсивность скоростей деформации определяется по формуле

$$H' = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\eta_2 - \eta_3)^2 + (\eta_3 - \eta_1)^2}.$$

Деформация разделителя при его перемещении в торовой зоне перекачивания происходит за счет изменения кривизны меридиана в местах перехода тора к неде-

формированной части и за счет смещения материала разделителя на основном участке тора. Скорость деформации в обеих зонах определяется как отношение скорости перемещения к расстоянию до точки от недеформированного участка разделителя  $dl$ :

$$\eta_m = \frac{S\omega}{dl} \cdot (1 + \epsilon_m).$$

На основном участке тора за счет смещения материала диафрагмы-разделителя происходит изменение длины параллели. При осевой симметрии это изменение пропорционально изменению расстояния между диаметрально противоположными точками. Скорость изменения параллели определяется скоростью удаления диаметрально противоположных точек друг от друга или скоростью изменения расстояния от рассматриваемой точки до оси симметрии:

$$\eta_n = \frac{V_{mx}}{X_m} = \frac{V_{cx} + V_{мех} + V_{м\ отн\ x}}{X_m} = \frac{-V_c \cos \phi + (V_{mc} + V_{м\ отн}) \cos(\phi - \alpha_m)}{X_m}.$$

Скорость деформации толщины разделителя определяется из условия неизменности объема пластически деформируемого материала.

При построении математической модели не учитывались факторы, не оказывающие существенного влияния на ход изучаемых процессов, т. е. рассматривалась упрощенная физическая модель. Достоверность математической модели во многом зависит от полноты информации, характеризующей процесс выворачивания. Поэтому многие из характеристик, применяемых в математической модели, используются исходя из опыта предыдущих разработок.

Для практического применения разработанной модели необходимо было изучить предложенное решение и найти те или иные количественные закономерности. Именно на этом этапе использовалась реализация численных методов. Создание специального программного обеспечения позволило интерпретировать математическую модель. В дальнейшем проводилась отладка программы, проведение вычислений, сравнение с данными экспериментов и анализ результатов. Полученные результаты изучили с точки зрения их соответствия реальному процессу выворачивания разделителей, в результате чего были внесены соответствующие корректировки в математическую модель.

В результате проектирования и расчета разделителя для конкретной конфигурации бака должна быть определена его начальная и конечная формы, место закрепления в баке, характеристика перепада давления в процессе выворачивания.

Метод математического моделирования и создание программного обеспечения по реализации процесса выворачивания разделителей соединяют в себе преимущества традиционных теоретических и экспериментальных методов исследования и направлены на повышение надежности и экономической эффективности новых разработок в области конструирования и расчетов диафрагм-разделителей в составе топливных баков.

Расчет процесса выворачивания начинается с подбора путем задания вариантов начальной формы разделителя как поверхности вращения, образующая которой в общем случае может состоять из сферических, торовых, конических и цилиндрических участков. Каждый участок разбивается на некоторое количество расчетных точек в соответствии с выбранным шагом изменения длины меридиана срединной поверхности. На участках определяются основные геометрические параметры срединной поверхности разделителя. Положение срединной поверхности разделителя определяется при следующих допущениях, характеризующих процесс выворачивания:

- в процессе перекачивания разделитель деформируется, при этом максимальные значения имеют деформации параллелей, а деформации меридианов и толщины меньше первых и зависят от них;

- меридиональное сечение зоны перекачивания аппроксимируется дугой окружности с известным радиусом;

- зона перекачивания симметрична и характеризуется углом зоны пластического деформирования;

- центральная часть разделителя до зоны перекачивания не меняет своей формы, а лишь перемещается вдоль оси выворачивания;

- форма меридионального сечения вывернутой части оболочки определяется огибающей крайних точек деформированной зоны, расстояние между которыми равно диаметру деформированного в процессе выворачивания меридиана.

Решение уравнения энергетического принципа позволило найти зависимости для радиуса зоны перекачивания и давления выворачивания от параметров мгновенного положения разделителя. Это же решение дает возможность определить пластические деформации разделителя на всем протяжении меридиана по основным направлениям:

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x_c S}{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi}} \text{ – радиус зоны перекачивания;}$$

$$P = \frac{4\tau_g S}{x_c^2 \sin \varphi} \sqrt{x_c S (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi)} \text{ – давление выворачивания.}$$

Дальнейший алгоритм проектирования диафрагм-разделителей состоит из следующих этапов:

- определяются относительные деформации параллели и меридиана как функции от деформации параллели;

- определяется среднее значение относительной деформации меридиана на участке между расчетной и предыдущей точкой;

- находится величина деформации параллели;

- определяется изменение длины участка меридиана от предыдущей точки и по нему величина смещения невывернутой части разделителя, а также смещение от начального положения;

- вычисляются координаты основных точек зоны перекачивания;

- находится величина вытесненного объема, а так как поверхность выворачивающегося разделителя не выражается через элементарные функции, то общий вытесненный разделителем объем будет определяться суммированием отдельных элементарных объемов.

Разработанный программный продукт реализует представление математической модели процесса выворачивания диафрагмы-разделителя в виде графиков, таблиц и визуализации мгновенного положения разделителя. Программа разделена на несколько модулей:

- модуль ввода данных – выполняется ввод параметров материала и основных геометрических параметров диафрагмы-разделителя и оболочек топливного бака;

- модуль справки и теоретических сведений – содержит методику расчета и проектирования металлических выворачивающихся диафрагм-разделителей топливных баков жидкостных ракетных двигателей. Рассмотрена математическая модель, основные характеристики процесса выворачивания. Данные теоретические сведения приведены в помощь при обучении студентов технических специальностей. Наличие в программном обеспечении подробной справочной части позволяет использовать программу для самостоятельного изучения процесса выворачивания диафрагм-разделителей;

- модуль вывода таблиц – в таблицах собраны расчетные данные процесса выворачивания, что дает возможность их дальнейшей обработки в сторонних программах;

- модуль вывода графиков – двумерные графики будут изменяться одновременно с изменением положения разделителя. Возможности интерфейса позволяют осуществить наложение графиков и, вследствие этого, визуально выявить узловые участки процесса выворачивания. Специальные функции дают возможность импортировать полученные графики в графические файлы;

- модуль визуализации мгновенного положения разделителя отображает положение диафрагмы-разделителя в составе топливного бака. Интерфейс оформлен в виде медиаплеера, что упрощает использование программы. Пошаговое воспроизведение процесса выворачивания диафрагмы разделителя позволяет наглядно просмотреть весь процесс выворачивания и выявить особенности выворачивания.

Наличие в программе модулей позволяет адаптировать входные и выходные данные для других программ. Сохранение полученных данных осуществляется в стандартных форматах файлов (doc, .xls, .jpg, .txt, .html). Каждый документ, передаваемый в Microsoft Office, основан на шаблоне. Шаблон определяет основную структуру создаваемого документа. Использование шаблонов упрощает создание отчетов и графиков требуемой формы для использования их на производстве и в учебном процессе. Благодаря интеграции текста, формул и графиков в одном документе, можно с легкостью визуализировать, иллюстрировать и снабжать вычислительные работы подробными аннотациями. Все решения будут полностью документированы и записаны в одном месте.

Реализация математической модели в программном обеспечении позволяет осуществить большинство расчетов, связанных с процессом выворачивания разделителя, и получить ряд другой важной информации. В программе осуществлено сравнение теоретических данных с экспериментальными, что позволяет выявить особенности и проблемы процесса выворачивания диафрагмы-разделителя. Наглядность полученных данных способствует возможности наилучшим способом определить недо-

статки проектируемых диафрагм-разделителей, получить исчерпывающую информацию протекания процесса выворачивания диафрагмы-разделителя в составе топливного бака.

Апробация программы проводилась в сравнении с результатами экспериментальной диафрагмы-разделителя. Разделитель представляет собой поверхность вращения, состоящую из центрального участка сферической поверхности, плавно сопряженного с участком торовой поверхности, отбортованной по периферии в виде торовой поверхности малого радиуса для организации процесса выворачивания (рис. 2).

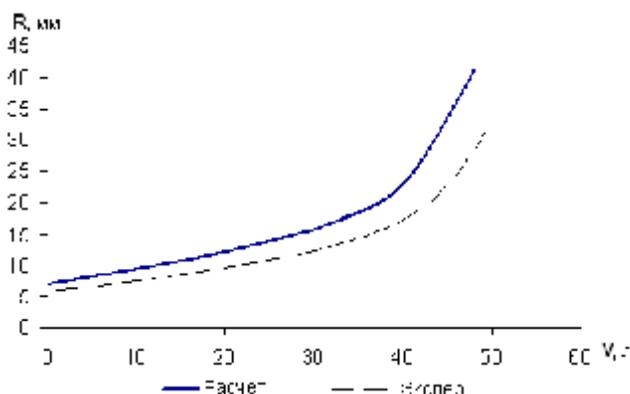


Рис. 2. Зависимость радиуса зоны перекатывания от вытесненного объема

Результаты расчета диафрагм-разделителей дают возможность оценить величины основных параметров процесса выворачивания и выполнить их конструктивные проработки в составе топливных баков.

Величина радиуса зоны перекатывания и его положение по координатам дают возможность определить положение зоны перекатывания в топливном баке в любой момент вытеснения, а величина смещения недеформированной части разделителя позволяет построить полное положение разделителя на данном расчетном шаге. Огибающая радиусов зоны перекатывания определяет положение деформированной части разделителя.

Основным достоинством программы является визуализация начальной, промежуточных и конечной форм проектируемого разделителя в зависимости от места крепления в баке относительно внутренней поверхности стенок бака. Это позволяет оперативно менять геометрические параметры участков образующей и место крепления разделителя в баке для достижения максимальной эффективности использования его объема и исключения случаев прекращения процесса выворачивания при сминании стенки разделителя внутренними поверхностями топливного бака. Для снижения перепада давления на разделителе его толщина проектируется переменной вдоль образующей.

Программа будет полезна как инженерам-конструкторам в качестве основного инструмента для сокращения сроков проектирования выворачивающихся диафрагм-разделителей топливных баков жидкостных ракетных двигателей, так и студентам в качестве дополнительного материала в курсовом и дипломном проектировании.

#### Библиографическая ссылка

1. Коровайцев А. В. Расчет осесимметричных форм равновесия упругой сферической оболочки // Известия вузов. Сер. «Машиностроение». 1978. № 3.

V. Yu. Zhuravlev, M. V. Kubrikov

### THE SOFTWARE ON REALISATION OF MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS REVERSING OF SEPARATORS OF FUEL TANKS

*The article presents model of eversible metallic separators of fuel tank motors of satellites vehicles on the basis of the energy principle.*

*Keywords: thin-walled, end-plate-umbilical connector; fuel tank, turning over; cloth.*

© Журавлев В. Ю., Кубриков М. В., 2010