

УДК 629.7.063.6

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-223-232

Для цитирования: Климовский Д. А., Журавлев В. Ю. Уточнение границ зоны пластических деформаций диафрагмы топливного бака // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 2. С. 223–232. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-223-232.

For citation: Klimovskiy D. A., Zhuravlev V. Yu. [Clarification of the plastic deformations zone borders for the fuel tank diaphragm]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 2, P. 223–232. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-223-232.

Уточнение границ зоны пластических деформаций диафрагмы топливного бака

Д. А. Климовский*, В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: Klinsky92@yandex.ru

Актуальным направлением теоретических и практических исследований в области ракетостроения является обеспечение бесперебойной и надежной работы жидкостных ракетных двигателей. Надежная работа и запуск двигателя в условиях невесомости невозможны без гарантированного разделения жидкой и газовой фазы в топливном баке. Для решения данной задачи применяются металлические выворачивающиеся диафрагмы-разделители. Исследование процесса выворачивания металлических диафрагм-разделителей позволяет проектировать их для топливных баков различного размера и формы по заданным параметрам вытеснения компонента и является актуальным объектом исследования.

Известные математические зависимости не обладают достаточной точностью и соответствуют результатам экспериментов. Для повышения качества проектирования при использовании любого деформационно-энергетического подхода необходимо повысить точность определения границ зоны пластического деформирования диафрагм на различных этапах выворачивания. Уточнение границ этой зоны возможно при использовании современных средств компьютерного моделирования.

Приведено описание и результат моделирования металлических диафрагм с различными геометрическими параметрами, нагруженных равномерным давлением, с учетом пластических свойств материала в программном комплексе MSC NASTRAN. В результате работы определена уточненная зона пластических деформаций металлических выворачивающихся диафрагм топливных баков. Введены новые углы, описывающие эту зону. Получены зависимости этих углов от угла торовой области, не зависящие от геометрических параметров диафрагмы. Выявлены условия, при которых использование уравнения энергетического принципа нецелесообразно из-за наличия мембранных напряжений.

Ключевые слова: диафрагма-разделитель, конечно-элементное моделирование, осесимметричный конечный элемент, MSC NASTRAN.

Clarification of the plastic deformations zone borders for the fuel tank diaphragm

D. A. Klimovskiy*, V. Yu. Zhuravlev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: Klinsky92@yandex.ru

A relevant area of theoretical and practical research in the field of rocket science is ensuring the uninterrupted and reliable operation for liquid rocket engines. Reliable operation and engine start in zero gravity is impossible without guaranteed separation of the liquid and gas phases in the fuel tank. This problem is solved by the introduction of metallic reversible diaphragm separators. The eversion process research for the metal diaphragm separators allows you to design them for fuel tanks of various sizes and shapes according to the specified parameters of the displacement of the component. This is an actual object of research.

The known mathematical dependencies do not have sufficient accuracy and correspondence to experimental results. To improve the quality of design when using any deformation-energy approach, it is necessary to increase the accuracy of determining the boundaries for plastic deformation zone of diaphragms at various stages of eversion. Clarification of the boundaries for this zone is possible using modern computer modeling tools.

The article provides a descriptions and simulation result for metal diaphragms with different geometric parameters, loaded with uniform pressure, taking into account the plastic material properties in the MSC NASTRAN software package. As a result of the work, a refined zone of plastic deformation for fuel tanks metal eversible diaphragms was determined. We have introduced new angles to describe this zone. The dependences for these angles on the angle of the torus region, independent of the geometric parameters of the diaphragm, were obtained. We also identified the conditions under which the use of the energy principle equation is inappropriate due to the presence of membrane stresses.

Keywords: diaphragm separator, finite element modeling, axisymmetric finite element, MSC NASTRAN.

Введение

К топливным бакам жидкостных ракетных двигателей малой тяги, работающих в условиях невесомости, предъявляют высокие требования по обеспечению гарантированного разделения жидкой и газовой фаз. Это необходимо для многократного запуска двигателей в условиях отсутствия гравитации [1–3].

Для обеспечения нормальной подачи жидкого компонента топлива из бака в жидкостный ракетный двигатель малой тяги необходимо гарантированное разделение жидкой и газообразной фазы, которое возможно только при механическом разделении фаз. Эффективным является использование осесимметричных металлических выворачивающихся диафрагм-разделителей [3–5] (рис. 1). Деформирование разделителя в процессе выворачивания происходит в малом объеме торовой зоны перекатывания, перемещающейся вдоль образующей, и носит четко выраженный пластический характер. Под действием распределенного давления в результате перемещения зоны пластического деформирования срединная часть разделителя находится в упругом деформированном состоянии и перемещается вдоль оси бака [3–6].

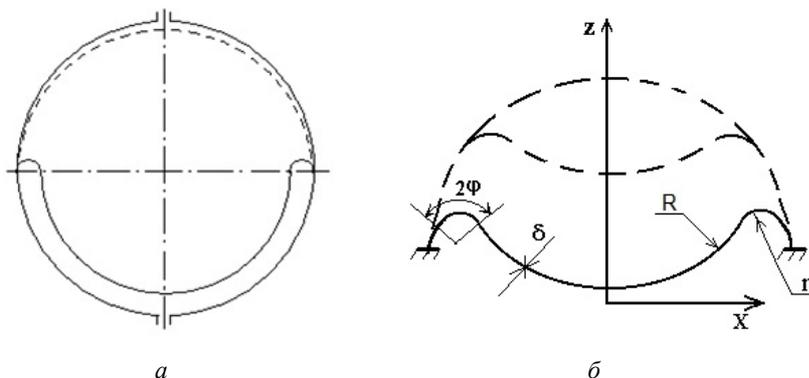


Рис. 1. Эскиз металлической диафрагмы-разделителя:
 а – в составе однокомпонентного сферического бака;
 б – с основными геометрическими параметрами

Fig. 1. Drawing of a metal diaphragm separator:
 a – as part of a one-component spherical tank; b – with basic geometric parameters

Для идеально пластического тела пластическое течение определяется конечной комбинацией нагрузок. Путь нагружения, начальное напряжение и деформации при этом не учитываются. Для определения основных параметров процесса пластического деформирования используется экстремальный принцип для идеально пластического тела, характеризующий минимальные свойства действительного поля скоростей на основе конечных пластических деформаций [3–8]:

$$\int_F X_n V_n dF \leq \tau_s \int_V H' dV, \quad (1)$$

где X_n – поверхностная нагрузка; V_n – скорость перемещения поверхности; F – движущаяся в результате деформации поверхность; τ_s – предел текучести материала при сдвиге; H' – кинематически возможная интенсивность скоростей деформации; V – объем пластической зоны.

Математические зависимости, составленные на экспериментально обоснованной физической модели пластического деформирования тонкостенных оболочек с произвольной формой образующей, не обладают достаточной точностью и соответствием результатам экспериментов. Эти расхождения объясняются принятыми без достаточного обоснования симметричными границами зоны пластического деформирования и видом поверхности, принимаемой как торовая. Для расчета параметров пластического деформирования участков оболочек при их проектировании используются требующие значительных затрат времени и средств уточняющие коэффициенты, определяемые для каждой формы образующей разделителя экспериментально и зависящие преимущественно от угла φ [4; 5]. Приведем пример формул для расчета давления выворачивания и радиуса торовой зоны для отдельных видов форм образующей на участке выворачивания [4; 5]:

$$P = \frac{4\tau_s s}{R_C^2 \sin \varphi} \cdot \sqrt{R_C s (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi)} \cdot \frac{1}{1 - k \cdot \varphi}, \quad (2)$$

$$r = 0,5 \sqrt{\frac{x_C \cdot s}{\sin \varphi - \varphi \cdot \cos \varphi}} \cdot (1 - k \cdot \varphi), \quad (3)$$

или

$$r = 0,5 \sqrt{\frac{x_C \cdot s}{\sin \varphi - \varphi \cdot \cos \varphi}} \cdot (1 - k \cdot \varphi) \cdot \left(1 - k_1 \frac{R_C - A}{R_C}\right). \quad (4)$$

Для повышения качества проектирования при использовании любого деформационно-энергетического подхода необходимо уточнить границы зоны пластического деформирования оболочки на различных этапах выворачивания разделителя.

Постановка задачи

В качестве метода решения задачи предлагается использовать конечно-элементное моделирование упруго-пластичного разделителя с последующим исследованием напряженно-деформированного состояния торового и примыкающего к нему участка оболочки. Для этого необходимо смоделировать схему нагружения диафрагмы (рис. 2).

Исследуется свободно-выворачивающаяся диафрагма, т. е. предполагается отсутствие касания вывернутой части стенок бака. С внутренней стороны на диафрагму действует перепад давления выворачивания «р». Защемляется зона крепления диафрагмы к шпангоуту бака.

Параметры численного моделирования

Для проведения исследования использован пакет компьютерного моделирования MSC NASTRAN. При численных исследованиях в подобных программных продуктах основу расчета составляет правильное приложение и учет действующих на тело нагрузок, а также создание качественной конечно-элементной модели. Создание последней всегда является сложной и трудоемкой задачей.

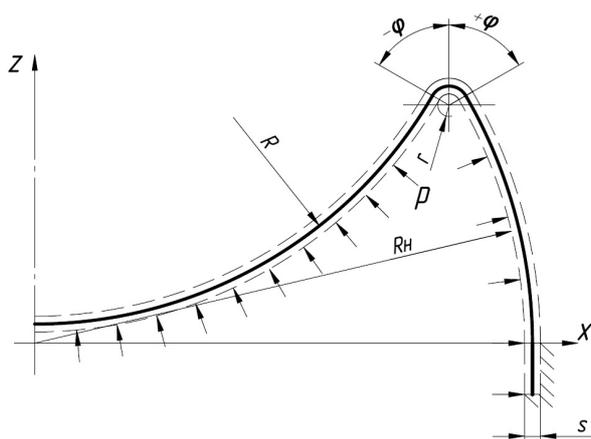


Рис. 2. Схема нагружения диафрагмы

Fig. 2. Diaphragm loading diagram

модели в торовой зоне на достаточно мелкие конечные элементы, порядка 1/20 толщины диафрагмы, для уточненного исследования распределения зон пластического деформирования.

Так как поставленная задача является осесимметричной, целесообразно использовать КЭ типа Axisymmetric из раздела объемных КЭ (Volume Elements) [10–12]. Осесимметричный КЭ представляет собой кольцеобразный элемент с треугольным или четырехугольным сечением. Данный тип КЭ строится в плоскости XZ базовой системы координат, где Z – ось вращения тела. При построении модели строится только половина сечения тела вращения, при этом модель не должна пересекать ось Z. Для сетки выбраны четырехугольные КЭ типа Quads, которые обладают лучшей сходимостью по сравнению с элементами Tri [10–14].

Результаты конечно-элементного моделирования напрямую зависят от правильности выбора типа конечных элементов (КЭ) и качественного построения конечно-элементной сетки на их основе. В работе [9] (рис. 3) для решения аналогичной задачи были использованы два типа КЭ – Brick и Tetra. С их помощью получена модель четверти диафрагмы. Однако полученная модель обладает рядом недостатков. Во-первых, необходимый объем памяти. Модель занимает порядка 8 GB дискового пространства. Это требует значительных затрат времени и ресурсов вычислительной техники на проведение расчетов и обработку результатов. Во-вторых, даже при таком объеме модели, не получается разбить сечение

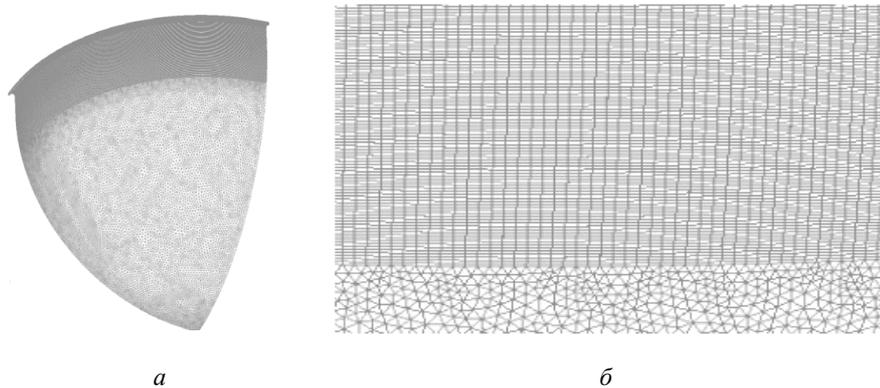


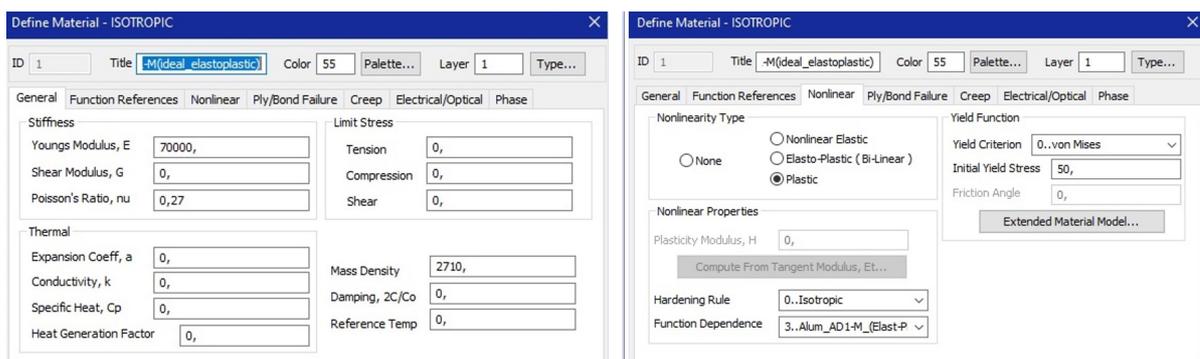
Рис. 3. Модель диафрагмы на основе КЭ Brick и Tetra:

a – четверть диафрагмы; б – зона соединения КЭ Brick и Tetra

Fig. 3. Diaphragm model based on Brick and Tetra FE:

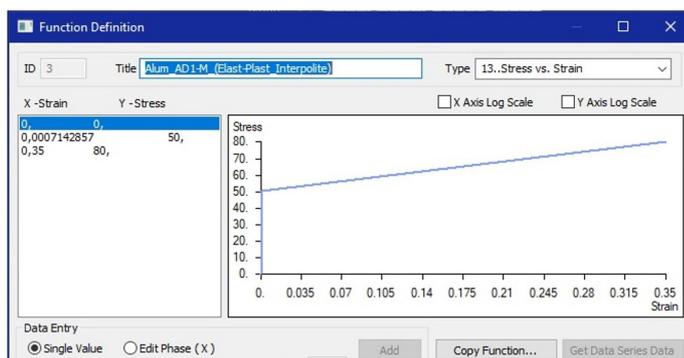
a – quarter of the diaphragm; b – connection zone between the Brick and Tetra FEs

Для построения конечно-элементной модели использовался алгоритм, описанный в работах [15; 16]. Половина сечения диафрагмы сразу создается конечными элементами без создания геометрической модели. Конечные элементы в торовой и прилегающей зоне задаются гуще (1/20 s), чем на сферическом участке (1/4 s). Число элементов выбрано так, чтобы получившиеся элементы были максимально близки к квадратным. Материал в расчетах – алюминий АД-1М ($E = 0,7 \times 10^5$ МПа, $\mu = 0,27$, $\sigma_{02} = 50$ МПа, $\sigma_B = 80$ МПа, $\epsilon_B = 0,35$, изотропный, упруго-пластичный). Параметры материала в MSC NASTRAN показаны на рис. 4, а, б. Нелинейные свойства задаются графиком 13. Stress vs Strain по трем точкам (0;0), (σ_{02}/E ; σ_{02}), (ϵ_B ; σ_B) (рис. 4, в).



a

б



в

Рис. 4. Задание свойств материала в MSC NASTRAN:

a – общие свойства; *б* – свойства пластичности; *в* – график напряжение-деформация для сплава АД-1М

Fig. 4. Setting material properties in MSC NASTRAN:

a – general properties; *b* – plasticity properties; *c* – stress-strain graph for the AD-1M alloy

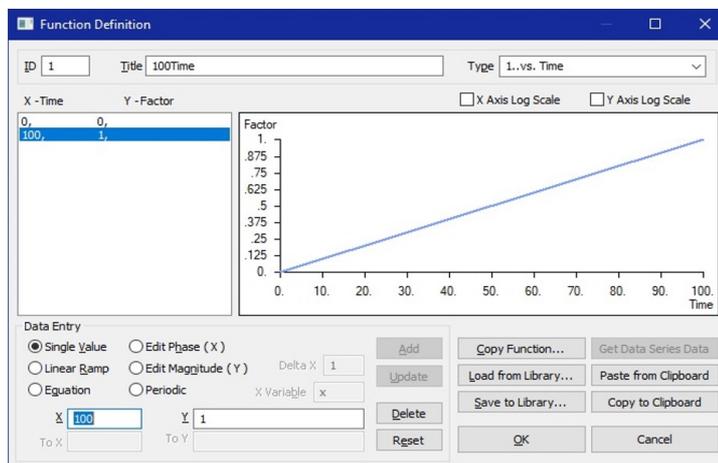


Рис. 5. График приложения нагрузки

Fig. 5. Load application graph

Для расчета использовался нелинейный статический анализ «22...Advanced Nonlinear Static» с опциями больших перемещений [10–12]. Нагрузка в расчете задается функцией от времени (числа шагов) (рис. 5) и постепенно нарастает от 0 до 100 % на 100 временных шагов. В настройках решателя задается 100 шагов с временным шагом 1. Максимальное значение давления задавалось как 0,1 МПа. При этом решатель постепенно приближается и останавливается на определенной нагрузке (рис. 6). Это оказалось удачным решением, так как при заранее неизвестном

давлении выворачивания, мы получаем значение, которое имеет один порядок с экспериментальным давлением. При таком способе задания параметров значение давления получается как процент, равный time step в конечный момент расчета от максимального заданного давления.

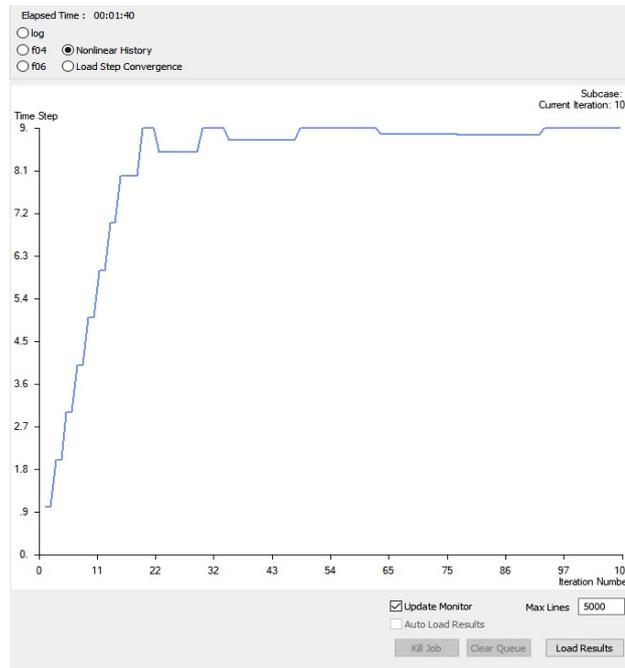


Рис. 6. График приложения нагрузки в процессе расчета

Fig. 6. Graph of load application during the calculation process

Результаты расчета

Для исследования были построены модели и проведены расчеты по указанной выше схеме для разделителей с внутренним радиусом R 100, 200, 350, 500 мм, толщиной s 1,0; 1,5; 2,0 мм, на углах φ 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30°. Радиус r определялся автоматически по известной зависимости (3). Результаты расчетов позволяют выявить некоторые закономерности. Для примера покажем результат расчета для разделителя с параметрами $R = 200$ мм, $s = 2$ мм, $\varphi = 80^\circ$ (рис. 7, а). Отобразим только напряжения, превышающие предел текучести. Результаты расчета для остальных разделителей выглядят аналогично.

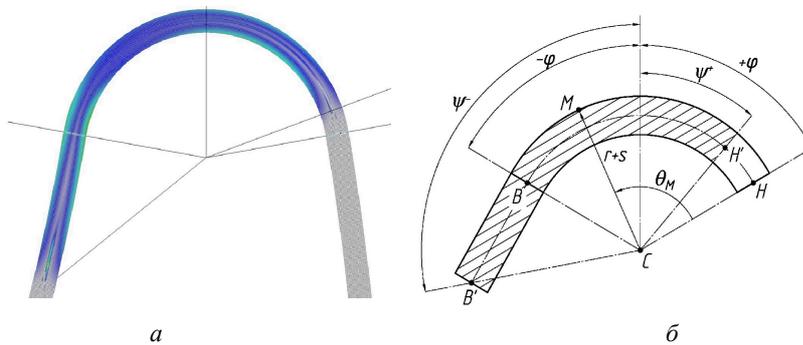


Рис. 7. Результат расчета:

- a* – распределение напряжений, превышающих предел текучести, в районе торовой области;
- b* – схема обозначений новых параметров зоны пластического деформирования

Fig. 7. Calculation result:

- a* – distribution of stresses exceeding the yield strength in the torus region;
- b* – designation scheme for new parameters for the plastic deformation zone

Анализ напряжений показывает, что область пластических деформаций не доходит до границы торовой зоны на внешнем краю разделителя (точка Н') и превышает её на внутренней границе (точка В') (рис. 7, б). Для учета полученных результатов предлагается ввести новые уточненные углы зоны пластических деформаций ψ^+ со стороны точки Н' и ψ^- со стороны точки В'. Такой выбор углов не зависит от формы центральной части разделителя и позволит в дальнейшем использовать их для диафрагм не только со сферической центральной частью. С учетом того, что $R \gg 1$, часть диафрагмы на участке В-В', не зависимо от формы этой части, можно заменить конической с отрезком ВВ' на среднем меридиане. Результаты замеров новых углов сведем в табл. 1–4.

Стоит отметить, что не во всех случаях, расчет по описанной выше схеме получался удачным сразу. Особенно на углах $\varphi < 40^\circ$. Это можно объяснить тем, что при приближении к полярной зоне радиус r торовой зоны становится соизмерим с радиусом R центральной части разделителя. Выворачивание диафрагмы в этом случае происходит со значительным влиянием упругих напряжений в невывернутой области по схеме «замедленного хлопка». Это приводило к тому, что решатель мог пройти хлопок и продолжал нагружение. В этих случаях приходилось вручную ограничивать предельное давлением для получения графика вида, представленного на рис. 6. Значения углов в этих случаях помечены в табл. 1–4 как (к). С другой стороны, были выявлены условия, при которых использование уравнения энергетического принципа (1) нецелесообразно из-за описанного явления. Эти условия можно выразить так: $(R/r \leq 6,5)$ или $(6,5 < R/r < 10$ и $R/X_c < 0,8)$, где X_c координата X центра радиуса r .

Можно заметить, что такие параметры, как R и s , не значительно влияют на уточненные углы зоны пластических деформаций. Дополнительные исследования изменения радиуса r так же не выявили сильного влияния на данные углы.

Отообразим значения из табл. 1–4 на координатной плоскости как функции $\psi = f(\varphi)$ (рис. 8, точки 1, 2). Минимальное и максимальное значения в пределах одного угла φ отличаются не более чем на 20° . Такой разрыв не сильно повлияет на результат предварительного проектирования диафрагм, поэтому для каждого угла φ найдем среднее значение параметров ψ^+ и ψ^- и соединим их. В результате получим график зависимости уточненных углов зоны пластических деформаций от угла торовой зоны (рис. 8, кривые 3, 4).

Таблица 1

Результат расчета для разделителя с $R = 100$ мм

$\varphi, ^\circ$	$\psi^+, ^\circ$			$\psi^-, ^\circ$		
	$s, \text{ мм}$					
	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
90	80	82	85	139	140	141
80	75	75	76	126	127	130
70	69	70	70	116	118	118
60	60	60	60	102	105	107
50	50	50	50 (к)	91	95	102 (к)
40	40	40 (к)	40 (к)	80	95 (к)	88 (к)
30	30 (к)	30 (к)	30 (к)	68 (к)	70 (к)	76 (к)

Таблица 2

Результат расчета для разделителя с $R = 200$ мм

$\varphi, ^\circ$	$\psi^+, ^\circ$			$\psi^-, ^\circ$		
	$s, \text{ мм}$					
	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
90	80	80	80	139	141	137
80	74	74	74	128	129	126
70	67	67	68	117	117	114
60	60	60	60	105	106	102
50	50	50	50	92	95	89
40	40	40 (к)	40	79	80 (к)	77
30	30 (к)	30 (к)	30 (к)	75 (к)	65 (к)	56 (к)

Таблица 3

Результат расчета для разделителя с R = 350 мм

$\varphi, ^\circ$	$\psi^+, ^\circ$			$\psi^-, ^\circ$		
	s, мм					
	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
90	78	78	80	137	138	140
80	72	73	75	126	128	127
70	67	65	70	116	118	116
60	60	60	60	104	106	106
50	50	50	50	92	92	104
40	40	40	40	75	77	94
30	30	30 (к)	30	61	65 (к)	77

Таблица 4

Результат расчета для разделителя с R = 500 мм

$\varphi, ^\circ$	$\psi^+, ^\circ$			$\psi^-, ^\circ$		
	s, мм					
	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
90	75	78	78	135	139	140
80	71	72	75	127	128	129
70	65	68	66	116	116	118
60	60	60	60	104	103	107
50	50	50	50	89	87	93
40	40	40	40	74	75	76
30	30	30	30	60	61	78

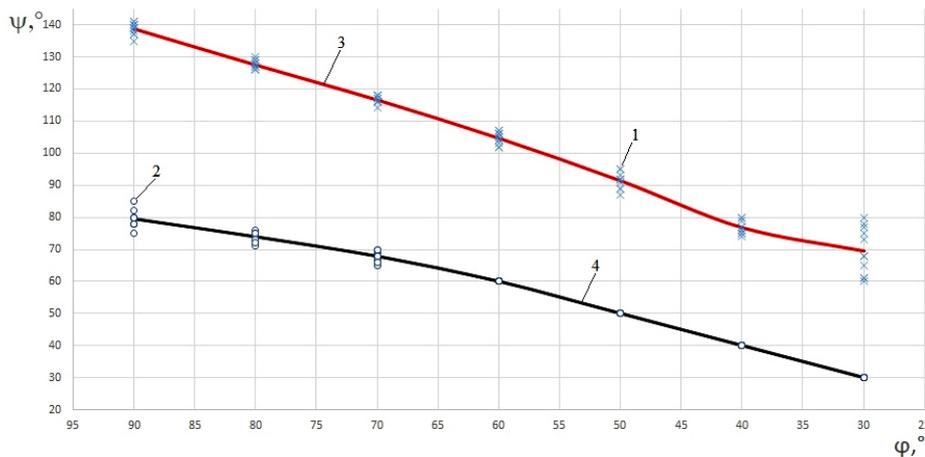


Рис. 8. Зависимость уточненных углов зоны пластических деформаций от угла торовой зоны:
 1 – $\psi^- = f(\varphi)$ по табл. 1–4; 2 – $\psi^+ = f(\varphi)$ по табл. 1–4; 3 – уточненная функция $\psi^- = f(\varphi)$ по усредненным значениям; 4 – уточненная функция $\psi^+ = f(\varphi)$ по усредненным значениям

Fig. 8. Dependence of refined angles of the plastic deformation zone from the corner of the torus zone:
 1 – $\psi^- = f(\varphi)$ according to table 1–4; 2 – $\psi^+ = f(\varphi)$ according to table 1–4; 3 – refined function $\psi^- = f(\varphi)$ based on averaged values; 4 – refined function $\psi^+ = f(\varphi)$ based on averaged values

Закключение

Полученные результаты уточняют границы области пластических деформаций диафрагмы-разделителя топливного бака. Это позволяет скорректировать ранее разработанный алгоритм расчета основных параметров процесса выворачивания [4] и исключить в дальнейшем при проектировании процесс идентификации этих параметров по результатам экспериментов.

Получены усредненные зависимости новых углов пластической области деформации, не зависящие от параметров R, s, r диафрагмы.

Выявлены условия, при которых использование уравнения энергетического принципа нецелесообразно из-за наличия мембранных напряжений. Это условие можно выразить как $(R/r \leq 6,5)$ или $(6,5 < R/r < 10$ и $R/Xc < 0,8)$.

Уточненные углы зоны пластического деформирования должны использоваться при решении основного уравнения энергетического принципа (1). Для этого при решении интеграла в правой части объем зоны пластических деформаций нужно брать не на угле 2φ , а на угле $(\psi^- + \psi^+)$.

Библиографические ссылки

1. Технология сборки и испытаний космических аппаратов / И. Т. Беляков, И. А. Зернов, Е. Г. Антонов и др. ; под общ. ред. И. Т. Белякова и И. А. Зернова. М. : Машиностроение, 1990. 352 с.
2. Гардымов Г. П., Парфенов Б. А., Пчелинцев А. В. Технология ракетостроения. СПб. : Спец. лит-ра, 1997. 320 с.
3. Залесов В. Н., Даев И. Ф. Пластическое деформирование вытеснительных диафрагм. М. : Машиностроение, 1977. 72 с.
4. Ефремов В. Н., Журавлев В. Ю., Якубович О. П. Разделители топливных баков с отрицательной деформацией параллели : монография. Красноярск, 2005. 76 с.
5. Кубриков М. В., Журавлев В. Ю. Проектирование диафрагм-разделителей удлиненных топливных баков // 2010. Вестник СибГАУ. № 4(30). С. 105–107.
6. Кинематика тонкостенных выворачивающихся оболочек при пластическом деформировании / В. Ю. Журавлев, Д. А. Климовский, Л. П. Назарова, Е. В. Фалькова // Механика. Исследования и инновации. 2018. Вып. 11. С. 75–79.
7. Хромов А. И., Кочеров Е. П., Григорьева А. Л. Поверхность нагружения, связанная с линиями уровня поверхности деформаций несжимаемого жёсткопластического тела // Вестник Самарского гос. тех. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2006. № 43. С. 88–91.
8. Кочеров Е. П., Хромов А. И. Деформационные состояния и разрушение идеальных жёсткопластических тел // Вестник Самарского гос. тех. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2006. № 42. С. 66–71.
9. Конечно-элементное моделирование тонкостенной оболочки в зонах большой кривизны в программном комплексе MSC NASTRAN / И. С. Михина, Д. О. Шендалев, В. Ю. Журавлев и др. // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч. конф. (11–15 ноября 2019, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. Решетнева. Красноярск, 2019. Ч. 1. С. 44–46.
10. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде FEMAP with NX NASTRAN. М. : ДМК Пресс, 2013. 784 с.
11. Рудакова К. Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. К. : КПИ, 2011. 317 с.
12. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC NASTRAN for Windows. М. : ДМК Пресс, 2003. 448 с.
13. Безмозгий И. М., Софинский А. Н., Чернягин А. Г. Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 71–80.
14. Конечно-элементное моделирование авиационных конструкций в программном комплексе MSC NASTRAN: метод. указания / сост. А. С. Кузнецов и др. Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. 69 с.
15. Климовский Д. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния упруго-пластичного разделителя топливного бака // Авиакосмические технологии (АКТ-2020) : тр. XXI Междунар. науч.-тех. конф. и шк. молодых уч., аспирантов и студентов. II Тур. Воронеж, 2020. С. 272–278.
16. Klimovskiy D. A., Zhuravlev V. Yu. Investigation of the stress-strain state for the fuel tank separator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1230. P. 012010.

References

1. Belyakov I. T., Zernov I. A., Antonov Ye. G. et al. *Tekhnologiya sborki i ispytaniy kosmicheskikh Aparatov* [Spacecraft assembly and testing technology]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990, 352 p.

2. Gardymov G. P., Parfenov B. A., Pchelintsev A. V. *Tekhnologiya raketostroyeniya* [Technology of rocket science]. SPb., Spetsial'naya Literatura Publ., 1997, 320 p.
3. Zalesov V. N., Daev I. F. *Plasticheskoe deformirovanie vytesnitel'nykh diafgarm* [Plastic deformation of compression diaphragms]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1977, 72 p.
4. Efremov V. N., Zhuravlev V. Yu., Yakubovich O. P. *Razdeliteli toplivnykh bakov s otritsatel'noy deformatsiyey paralleli* [Parallel deformation fuel tank dividers]. Krasnoyarsk, 2005, 76 p.
5. Kubrikov M. V., Zhuravlev V. Yu. [Design of diaphragm separators for elongated fuel tanks]. *Vestnik SiBGAU*. 2010, No. 4 (30), P. 105–107 (In Russ.).
6. Zhuravlev V. Yu., Klimovskiy D. A., Nazarova L. P., Fal'kova Ye. V. [Kinematics of thin-walled eversible shells during plastic deformation]. *Mekhanika. Issledovaniya i inovatsii*. 2018, No. 11, P. 75–79 (In Russ.).
7. Khromov A. I., Kocherov E. P., Grigorieva A. L. [Loading surface associated with the lines of the level of the surface of deformations of an incompressible rigid-plastic body]. *Vestnik Samarskogo gos. tekhn. un-ta*. 2006, No. 43, P. 88–91 (In Russ.).
8. Kocherov E. P., Khromov A. I. [Deformational states and destruction of ideal rigid-plastic bodies]. *Vestnik Samarskogo gos. tekhn. un-ta. Ser.: Fiz.-mat. nauki*. 2006, No. 42, P. 66–71 (In Russ.).
9. Mikhina I. S., Shendalev D. O., Zhuravlev V. Yu. et al. [Finite-element modeling of a thin-walled shell in zones of large curvature in the MSC NASTRAN software package]. *Reshetnevskiyechteniya : materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf.* Krasnoyarsk, 2019, Part 1, P. 44–46 (In Russ.).
10. Rychkov S. P. *Modelirovaniye konstruksiy v srede FEMAP with NX NASTRAN* [Finite-element modeling of a thin-walled shell in zones of large curvature in the MSC NASTRAN software package]. Moscow, DMK Press Publ., 2013, 784 p.
11. Rudakova K. N. *FEMAP 10.2.0. Geometricheskoye i konechno-elementnoye modelirovaniye konstruksiy* [FEMAP 10.2.0. Geometric and finite element modeling of structures]. 2011, 317 p.
12. Shimkovich D. G. *Raschet konstruksiy v MSC NASTRAN for Windows* [Structural Analysis in MSC NASTRAN for Windows]. Moscow, DMK Press Publ., 2003, 448 p.
13. Bezmozgiy I. M., Sofinskiy A. N., Chernyagin A. G. [Modeling in problems of vibration strength of structures of rocket and space technology]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2014, No. 3 (6), P. 71–80 (In Russ.).
14. Kuznetsov A. S. et al. *Konechno-elementnoye modelirovaniye aviatsionnykh konstruksiy v programnom komplekse MSC NASTRAN* [Finite-element modeling of aircraft structures in the MSC NASTRAN software package]. Samara, Izd-vo Samar. st. aerokosm. un-ta Publ., 2010, 69 p.
15. Klimovskiy D. A. [Stress-deformed state simulation for elastic-plastic fuel tank separator]. *Aviakosmicheskkiye tekhnologii (AKT-2020). Trudy XXI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov. II Tur.* Voronezh, 2020, P. 272–278 (In Russ.).
16. Klimovskiy D. A., Zhuravlev V. Yu. Investigation of the stress-strain state for the fuel tank separator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022, Vol. 1230, P. 012010.

© Климовский Д. А., Журавлев В. Ю., 2024

Климовский Дмитрий Андреевич – старший преподаватель кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Klinsky92@yandex.ru.

Журавлев Виктор Юрьевич – кандидат технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vz@sibsau.ru.

Klimovskiy Dmitriy Andreevich – assistant professor of a department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Klinsky92@yandex.ru.

Zhuravlev Viktor Yurevich – Cand. Sc., professor of a department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: vz@sibsau.ru.
