

УДК 539.319:621.45.034.4

Мудров Д.С., магістр
(ДП КБ «Південне»)**Зіль В.В.**, канд. техн. наук, доцент
(ДВНЗ «НГУ»)**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ВИТИСКНИХ ДІАФРАГМ****Мудров Д.С.**, магістр
(ГП КБ «Южное»)**Зиль В.В.**, канд. техн. наук, доцент
(ГВУЗ «НГУ»)**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ВЫТЕСНИТЕЛЬНЫХ ДИАФРАГМ****Mudrov D.S.**, M.Sc (Tech)
(Yuzhnoye SDO)**Zill V.V.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(National Mining University)**STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF EXPULSION DIAPHRAGMS**

Анотація. Метою цього дослідження був розгляд процесу вивертання витискної діафрагми паливного бака рідинного ракетного двигуна. Крім того, нашим завданням було проаналізувати напружено-деформований стан вивернутої діафрагми, визначити перепад тиску, при якому здійснюється повна викладка, а також оцінити ефективність бака з точки зору витисненого об'єму компонента палива. Були розглянуті роботи інших авторів у галузі дослідження витискних діафрагм і зроблено висновок про недосконалість існуючих підходів. Дослідження напружено-деформованого стану здійснювалося за допомогою сучасного найбільш поширеного і досить універсального методу аналізу – методу кінцевих елементів. Кінцево-елементна модель, що дозволяє визначити напружено-деформований стан, була побудована з використанням програмного комплексу ANSYS (ANSYS Inc.). Оцінка обсягу невитисненого компонента палива здійснювалася по імпортованій в САД-середовище геометрії zdeформованої конструкції бака, що дозволило більш точно визначити цей параметр.

Ключові слова: оболонка, метод кінцевих елементів, витискні діафрагми, напружено-деформований стан.

Вступ. Дослідження процесу пластичної формозміни витискних діафрагм належить до найбільш складних завдань теорії пластичності. Дійсно, значна зміна початкової геометрії в процесі вивертання, переміщення пластичних областей, що виникають при цьому в матеріалі – не дозволяє звести рішення задачі до безпосереднього інтегрування рівнянь пластичної плинності [Залесов В.В., 1977]. Деформації та напруження, що виникають при цьому, можна розрахувати лише в простих випадках методами опору матеріалів і теорії пластичності, тому конструктори вимушені звертатися до надійних, але грубих природно, ускладнює аналіз потенційно ефективних компоновально-силових схем і не сприяє ухваленню раціональних технічних рішень.

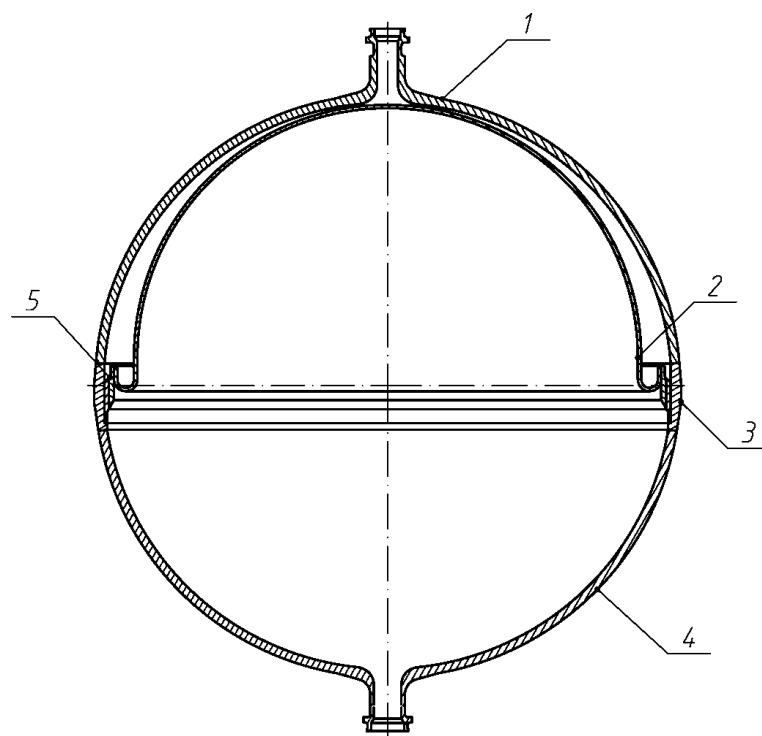
Дослідження в рамках пружно-статичного підходу складають основну частку загального числа публікацій, що стосується експериментальних робіт – їх частка зовсім мала. Інтегрування розв'язувальних рівнянь стійкості оболонок подвійної кривини, що мають в загальному випадку змінні, коефіцієнти і радіус кривини меридіана, який відсутній в рівняннях оболонок з прямолінійною твірною, має відомі труднощі. Точне їх рішення стало можливим тільки на базі машинних методів разом із застосуванням чисельних методів [1]. Не рідкісні випадки, коли важливо знати еволюцію процесу деформування (чи руйнування) конструкції із зовнішньою дією, що триває в часі. При цьому природні великі геометричні і фізичні нелінійності. Але саме такого роду завдання цілком під силу програмному комплексу ANSYS (ANSYS Inc.) [2]. Механічна і математична основа вказаного програмного комплексу має за базу метод кінцевих елементів (МКЕ) – найбільш поширений і досить універсальний метод аналізу напружено-деформованого стану.

Постановка задачі. За попередній період було розкрито багато важливих закономірностей в поведінці оболонок подвійної кривини [1], [Залесов В.В., 1977], проте розрізненість і суперечливість результатів не дозволяє скласти досить чіткого уявлення про те, як потрібно проектувати конструкції складніші, ніж замкнена гладка еліпсоїдна оболонка.

Для визначення форми діафрагми після її вивертання, в роботі [Залесов В.В., 1977] запропоновано метод послідовного неодноразового викреслювання профілю діафрагми до і після вивертання, виходячи із умови збереження меридіонального перерізу і збільшення розмірів діафрагми в перерізах нормальних до її осі симетрії. Опубліковані експериментальні дані вказують на істотне відхилення експериментальних параметрів від розрахункових величин. Прийняті багатьма авторами для вивчення процесу вивертання гіпотеза про дзеркальне відображення і гіпотеза про нерозтяжність меридіану серединної поверхні є суперечливими [1].

Незважаючи на те, що металеві діафрагми застосовуються досить часто, питання, пов'язані з їх роботою і проектуванням, вивчені ще недостатньо. Різноманіття умов роботи рушійних установок і компоновальних схем двигунів обумовлює застосування паливних баків різної форми і розмірів. Тому постає питання, створення загальної методики проектування діафрагм.

Досліджуючи процес деформації витискної діафрагми, було розглянуто паливний бак, що являє собою сферичну конструкцію, зварену з двох штампованих і механічно оброблених напівсфер 1, 4, приварених до кільця 3 (рис. 1). У кожній напівсфері присутній штуцер для підведення робочого газу і випорожнення компонентів палива. Бак виготовлено зі сталі. В одній з напівсфер встановлена металева діафрагма 2 – оболонка обертання, з'єднана з корпусом бака за допомогою зварювання через перехідник 5. Діафрагма являє собою штамповану конструкцію, виконану з технічно чистого алюмінію – це дозволяє їй працювати в області пластичних деформацій без руйнування, що є умовою забезпечення герметичності між газовою і рідинною порожнинами.



1 – верхня напівсфера; 2 – діафрагма; 3 – кільце; 4 – нижня напівсфера; 5 – перехідник

Рисунок 1 – Конструктивна схема діафрагменного бака

Навантаження на діафрагму здійснюється поволі наростаючим тиском в газовій порожнині до граничного значення. При цьому діафрагма деформується в бік зменшення обсягу рідинної порожнини, тим самим витискаючи рідину через штуцер в паливну магістраль.

Під час вивертання весь обсяг матеріалу діафрагми послідовно зазнає пластичного деформування. Процес деформації вісесиметричний, вісесиметричне також і пов'язане з ним переміщення. Тому процес деформації розглядався в площині меридіонального перерізу, обмеженого віссю симетрії.

Для моделювання процесу вивертання діафрагми була побудована кінцево-елементна модель, що дозволяє визначити напружено-деформований стан конструкції. Загальна кількість елементів в моделі складає 14616 елементів (з них 6510 контактних) та 47740 вузлів. Сітка кінцевих елементів регулярна, по товщині металу діафрагми приймаємо 8 елементів. По товщині стінки бака призначаємо 4 елементи. У меридіональному напрямку розмір елементів складає 0,2 мм. Використано плоскі 8-вузлові кінцеві елементи вищого порядку Plane183 [3, 4].

Для врахування контактної взаємодії поверхні діафрагми з поверхнею стінки бака при роботі витискної системи необхідне призначення спеціальних контактних пар елементів: цільових (TARGE169) – на поверхні бака і контактних (CONTA172) – на поверхні діафрагми [3, 4]. При цьому для контактної пари вказується коефіцієнт тертя. Нормалі контактуючих поверхонь в процесі розрахунку повинні бути спрямовані одна до одної. Тип контакту для розглянутої задачі «лінія - лінія». Між іншими елементами конструкції задано зв'язаний контакт, який забороняє відносні зміщення контактуючих поверхонь.

Оскільки діафрагма працює в області великих пластичних деформацій, то матеріалу необхідно задати відповідні пружні і пружно-пластичні характеристики у вигляді кривої деформування при одноосному розтягуванні. У стінках сферичного бака не допускається утворення залишкових деформацій.

Задача розглядається у вісесиметричній постановці в два кроки навантаження. Тиск компонента палива p діє на всі внутрішні поверхні бака і діафрагми на обох кроках навантаження. Перепад тиску Δp , діє на поверхні діафрагми і бака з боку газу тільки на другому кроці навантаження. Такий підхід дозволяє врахувати деформації корпусних деталей бака під час роботи. Значення перепаду тиску Δp обрано довільно та повинно не менше ніж в два рази перевищувати значення перепаду тиску, необхідного для викладки діафрагми. Схема навантаження зображена на рис. 2. Граничними умовами заборонено переміщення зовнішньої поверхні штуцера в напрямку осі OY , яка є віссю симетрії.

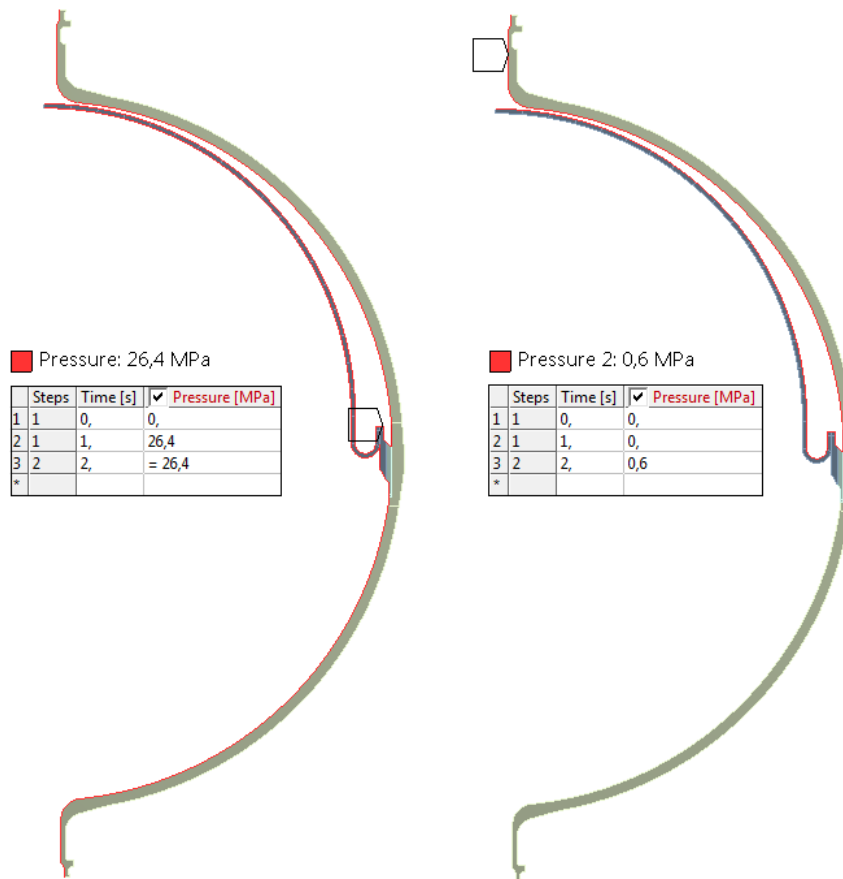


Рисунок 2 – Схема навантаження

Температура діафрагми, прийнята для розрахунку, дорівнює плюс 20 °С.

Розрахунок виконано в квазістатичній постановці, час відіграє роль відносного параметра і фактично є множником при навантаженні на поточному кроці. Розв'язання задачі виконується методом кінцевих елементів в геометрично і фізично нелінійній постановці, тобто з урахуванням великих

переміщень, пластичних деформацій і нелінійного поведіння матеріалу.

Для оцінки напруженого стану діафрагми використовувався критерій Мізеса, згідно з яким еквівалентні напруження визначалися за формулою:

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (1)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження.

Коефіцієнт запасу міцності обчислювався за формулою:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\text{екв}}} \quad (2)$$

де σ_B – границя міцності відповідного матеріалу.

Результати. В результаті розрахунку були визначені величина перепаду тиску, необхідного для викладки діафрагми, а також відповідний напружено-деформований стан конструкції. Результати розрахунку показали, що викладка діафрагми починається при перепаді тиску 0,18 МПа (рис.3).

До перепаду тиску 0,2508 МПа діафрагма рухається поволі в міру збільшення тиску. При досягненні перепаду тиску значення 0,2508 МПа діафрагма починає викладатися практично без збільшення тиску (рис. 4).

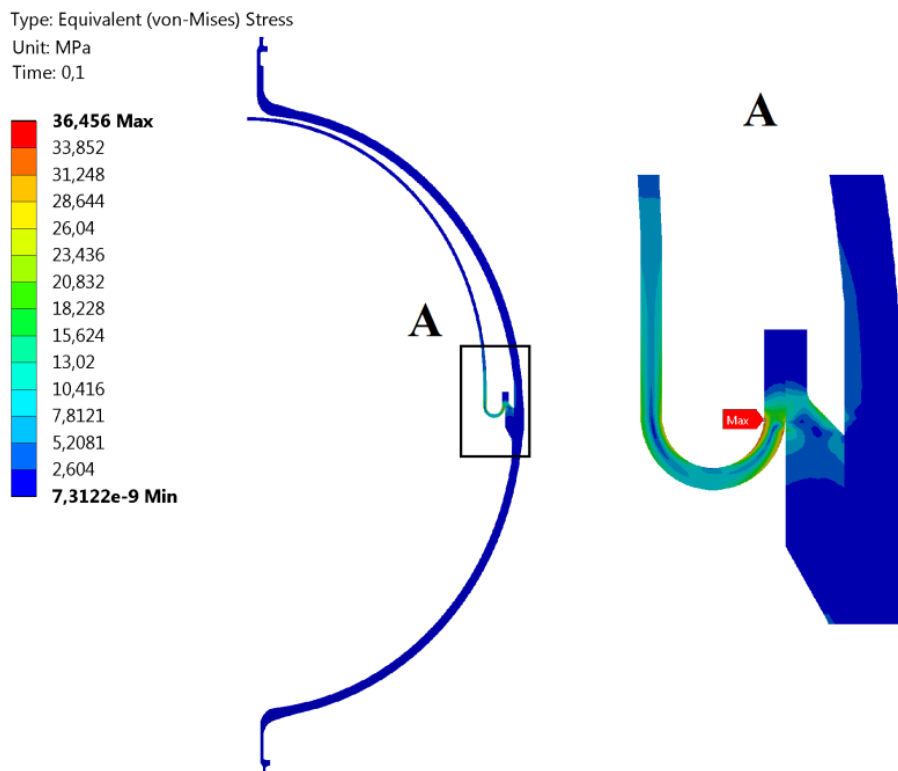


Рисунок 3 – Еквівалентні напруження при $\Delta p = 0,06$ МПа

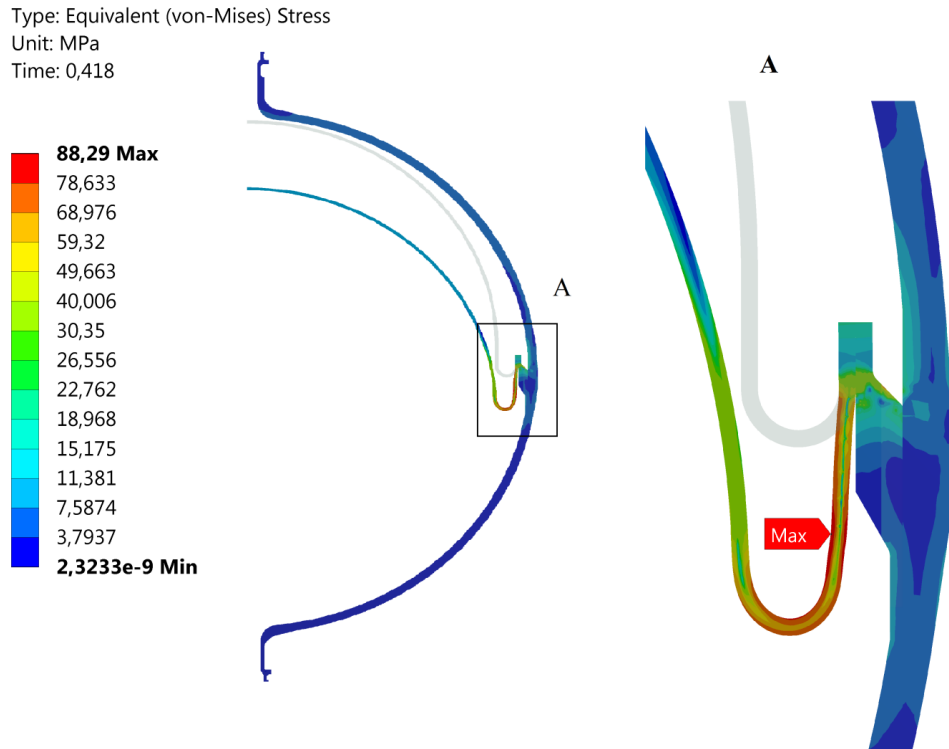


Рисунок 4 – Еквівалентні напруження при $\Delta p = 0,2508$ МПа

При перепаді тиску 0,2514 МПа діафрагма вже повністю викладена, і подальше збільшення тиску призводить лише до незначного розпрямлення діафрагми в області полюса. Таким чином, перепад тиску, необхідний для викладення діафрагми, має бути не менше 0,2514 МПа (рис. 5).

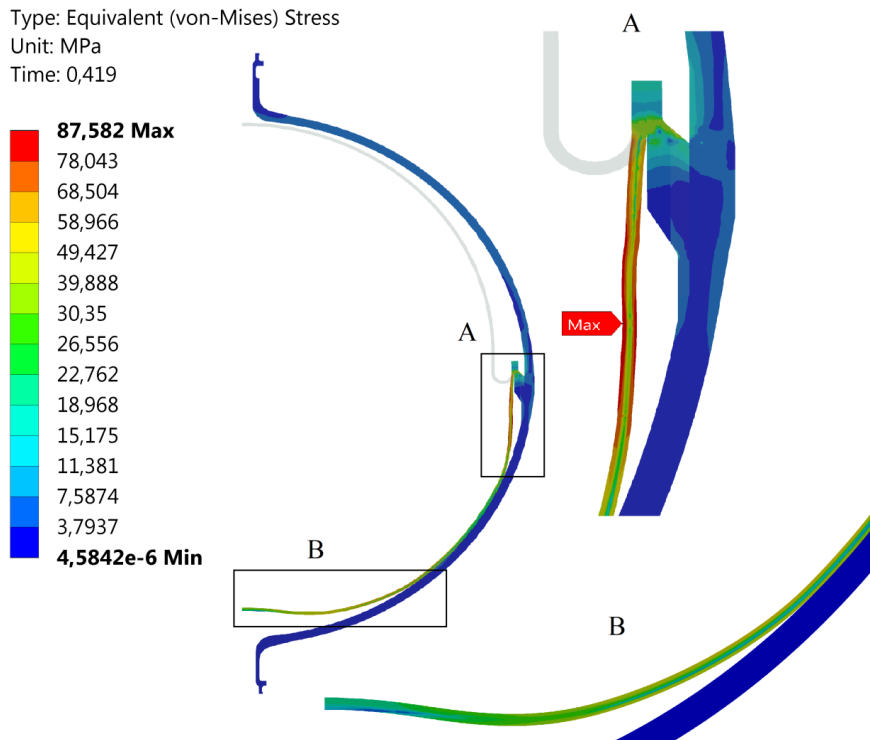
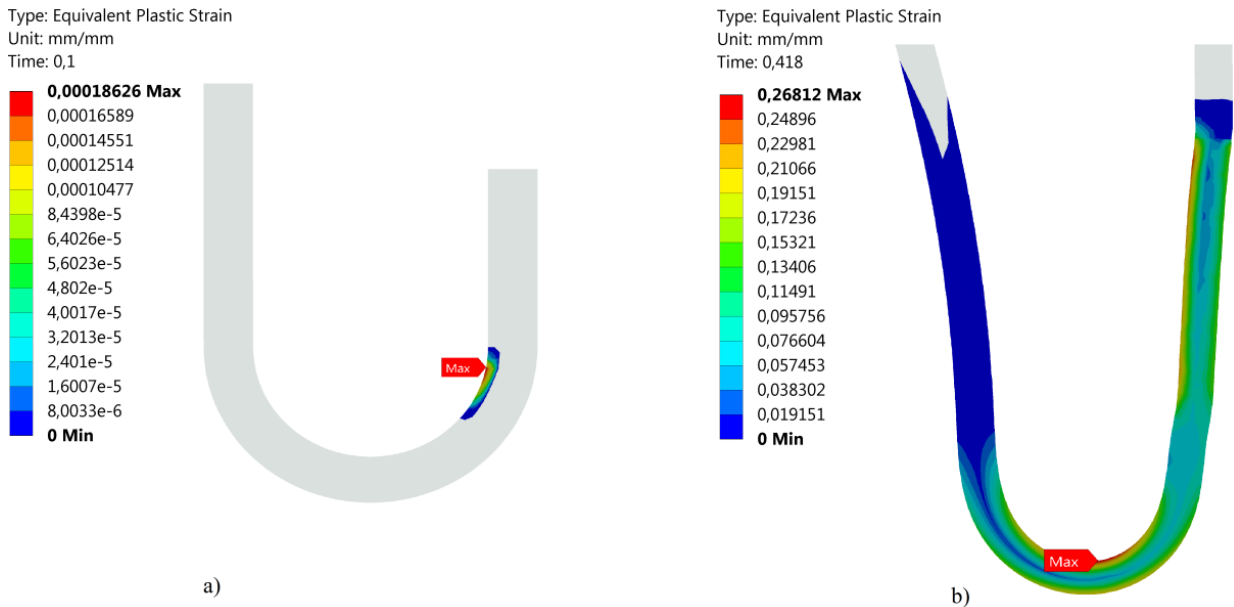


Рисунок 5 – Еквівалентні напруження при $\Delta p = 0,2514$ МПа

В процесі викладки діафрагма піддається значним згинальним деформаціям, що зображено на рис. 6.



а) при $\Delta p = 0,06$ МПа; б) при $\Delta p = 0,2508$ МПа
Рисунок 6 – Пластичні відносні деформації

В результаті цього напруження на поверхнях діафрагми досягають значень границі міцності матеріалу, і тримкість діафрагми забезпечується середнім (нейтральним) шаром. Тому, для підтвердження міцності діафрагми, після викладки діафрагми триває її навантаження до значення перепаду тиску 0,6 МПа (рис. 7).

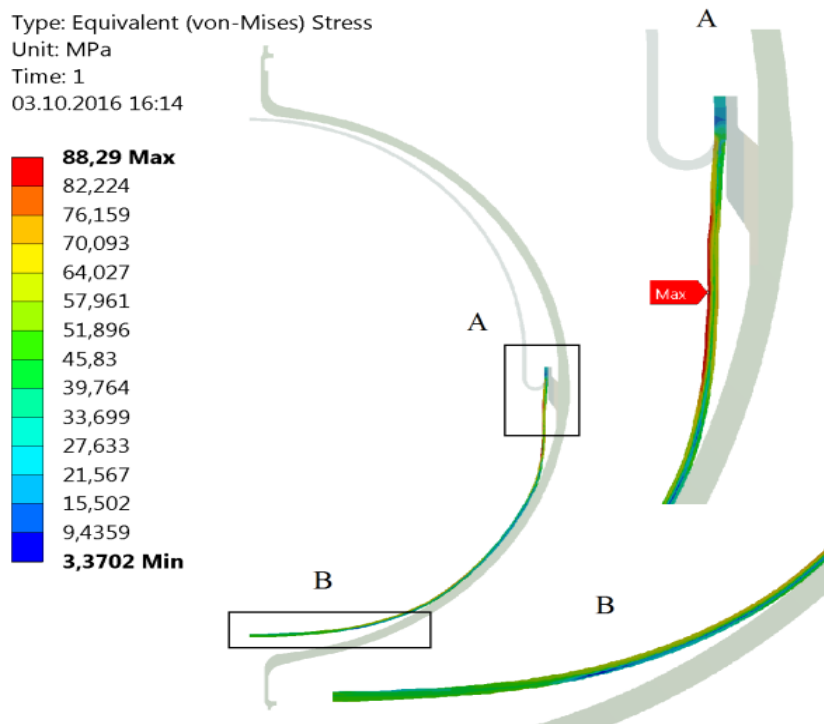
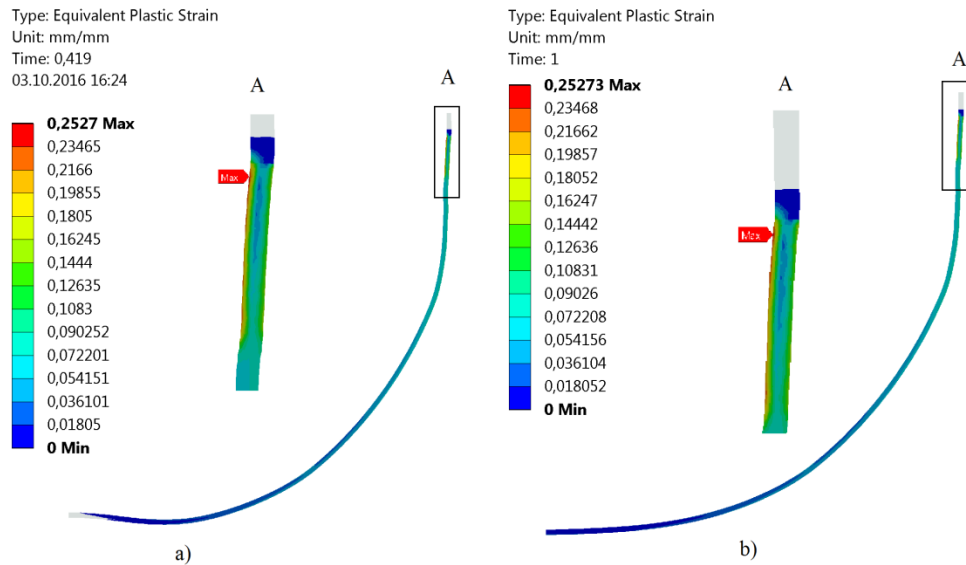


Рисунок 7 – Еквівалентні напруження при $\Delta p = 0,6$ МПа

При збільшенні перепаду тиску від 0,2514 до 0,6 МПа, максимальні значення пластичних відносних деформацій збільшуються від 0,2527 до 0,25273 (при $\delta = 0,45$), як показано рис. 8. Це вказує на те, що тримкість діафрагми при даному перепаді тиску не вичерпується.



а) при $\Delta p = 0,2514$ МПа; б) при $\Delta p = 0,6$ МПа

Рисунок 8 – Пластичні відносні деформації

Також в результаті розрахунку був визначений об'єм компонента. Об'єми невитисненого компонента в полюсній V_1 і екваторіальній V_2 областях відповідно складають 0,164 і 0,18 літрів (рис.9).

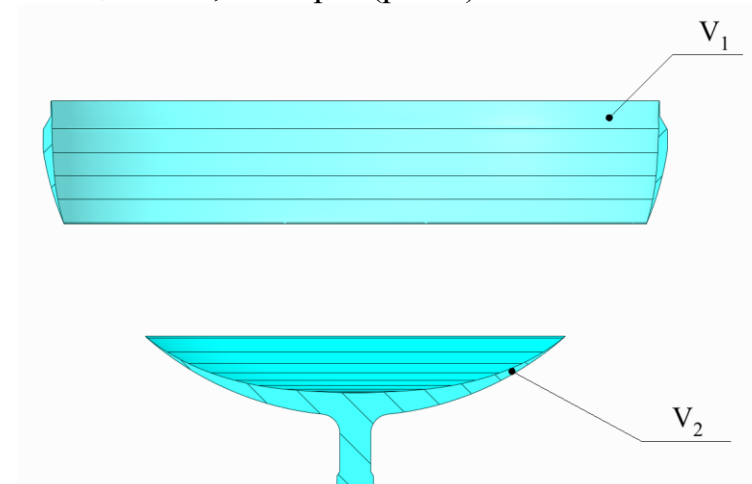


Рисунок 9 – Об'єми невитисненого компонента

Висновки. Досліджуючи напружено-деформований стан діафрагми за допомогою методу кінцево-елементного аналізу можливо спростувати прийняту багатьма авторами суперечливу гіпотезу про дзеркальне відображення та про нерозтяжність меридіана серединної поверхні. При цьому використання чисельних методів разом із засобами обчислення та візуалізації

дозволяють визначити межі зон пружного та пластичного деформування, їх форму та протяжність, а також отримати тривимірну модель деформованої діафрагми для будь-якого проміжного стану, що дозволяє підібрати оптимальні геометричні параметри бака (наприклад мінімізувати паразитні об'єми рідини, яка залишилась після викладення).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ефремов В.Н. Металлические диафрагмы-разделители топливных баков: дис. д-ра техн. наук: 05.07.02: защищена 07.10.1998 / Ефремов В.Н. – Красноярск: САА, 1998. – 284 с.
2. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с. – ISBN 5-354-00238-9.
3. ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide. ANSYS Release 17.2 [Электронный ресурс]: Электрон. дан. и прогр. – Canonsburg (USA), ANSYS Inc., 2016.
4. ANSYS Mechanical APDL Modeling and Meshing Guide. ANSYS Release 17.2 [Электронный ресурс]: Электрон. дан. и прогр. – Canonsburg (USA), ANSYS Inc., 2016.

REFERENCES

1. Efremov V.N. (1998), Metal diaphragm separators for fuel tanks, Ph.D. Thesis., Designing, manufacturing and testing of aircrafts, Siberian Aircraft Academy, Krasnoyarsk, Russia.
2. Kaplun A.B., Morozov E.M. and Olfereva M.A. (2003), *ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoye rukovodstvo* [ANSYS in the hands of an engineer: A Practical Guide], Editorial URSS, Moscow, Russia.
3. ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide. ANSYS Release 17.2 (2016), ANSYS Inc., Canonsburg, USA.
4. Ibid. ANSYS Mechanical APDL Modeling and Meshing Guide. ANSYS Release 17.2 (2016), ANSYS Inc., Canonsburg, USA.

Про авторів

Мудров Денис Сергійович, магістр, інженер Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» (ДП КБ «Південне»), Дніпро, Україна, vip.mds.1992@mail.ru

Зіль Валерій Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технології гірничого машинобудування», Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (ДВНЗ НГУ), Дніпро, Україна,

About the authors

Mudrov Denis Sergeevich, Master of Science, Engineer of Yangel Yuzhnoye Design Office (Yuzhnoye SDO), Dnepr, Ukraine, vip.mds.1992@mail.ru

Zill Valeriy Vasilevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor in Department of Mechanical Engineering Technology for Mining, State Higher Educational Institution «National mining university» (SHEI «NMU»), Dnepr, Ukraine

Аннотация. Целью настоящего исследования являлось рассмотрение процесса выворачивания вытеснительной диафрагмы топливного бака жидкостного ракетного двигателя. Кроме того, нашей задачей было проанализировать напряженно-деформированное состояние вывернутой наизнанку диафрагмы, определить перепад давления, при котором осуществляется полная выкладка, а также оценить эффективность бака с точки зрения вытесненного объема компонента топлива. Были рассмотрены работы других авторов в области исследования вытеснительных диафрагм и сделан вывод о несовершенстве предыдущих подходов. Исследование напряженно-деформированного состояния осуществлялось при помощи современного наиболее распространенного и достаточно универсального метода анализа – метода конечных элементов. Конечно-элементная модель, позволяющая определить напряженно-деформированное состояние, была построена с использованием программного комплекса ANSYS (ANSYS Inc.). Оценка объема невытесненного компонента топлива осуществлялась по импортированной в САД-среду деформированной геометрии конструкции бака, что позволило более точно определить этот параметр.

Ключевые слова: оболочка, метод конечных элементов, вытеснительные диафрагмы, напряжённо-деформированное состояние.

Abstract. The objective of this study was to consider the process of everting the expulsion diaphragms used for propellant tanks of liquid-propellant propulsion systems. In addition, our task was to analyze stress-strain state of a diaphragm everted, to determine a pressure difference that provides diaphragm turning into its final position, and to evaluate the volume of nonexpulsed propellant. Some previously conducted researches concerning expulsion diaphragms were considered; and we came to the conclusion that the approaches used for these researches were imperfect. Stress-strain state was studied using the finite-element method that is the most-used and sufficiently versatile. The finite-element model for studying the stress-strain state was made with the use of ANSYS software package (ANSYS Inc.). The volume of nonexpulsed propellant was estimated by the geometry of a deformed tank structure imported into CAD environment, which provided determination of this parameter with a higher accuracy.

Keywords: shell, finite elements method, expulsion diaphragms, stress-strain state.

Статья поступила в редакцию 22.12.2016

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.П. Надутым