

**ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ
БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ ВІДСІКІВ РАКЕТ-НОСІЇВ**

¹ДП КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля»

вул. Криворізька, 3, 49008, м. Дніпро, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Науки, 72, 49045, м. Дніпро, Україна; e-mail: dzb@ua.fm

Робота присвячена дослідженню особливостей деформування і визначенню критичних навантажень втрати міцності болтових фланцевих з'єднань відсіків ракет-носіїв. Метою роботи є дослідження проблемних питань коректного вибору розрахункової схеми фланцевих з'єднань окремих відсіків. Викладена методика визначення граничного навантаження болтового з'єднання. Використовуються методи скінченно-елементного аналізу. В розрахунках виконані всі вимоги, прийняті в галузі норм міцності болтових з'єднань. Застосовані також відповідні коефіцієнти безпеки. Враховується зріз різьби болтів і розвантажувальних втулок, зусилля затяжки з'єднання, що імітується введенням відповідних температурних навантажень, та інші параметри елементів з'єднання. Аналізуються результати проведених руйнівних натурних випробувань фланцевого з'єднання торцевих шпангоутів окремих відсіків. Виявлена невідповідність результатів розрахунку і даних випробувань. Показано, що причини розбіжності обумовлені недостатньо коректним врахуванням конструктивних особливостей з'єднань і дії зовнішніх навантажень, що привело до появи додаткових складових позацентрального розтягу-стиску. Продемонстровано, що результат розрахунку руйнуючого навантаження з урахуванням “важеля сили” прогнозовано виявився меншим, ніж отриманий за розрахунковою схемою “жорсткий шпангоут”, і близьким до даних натурних випробувань. В статті подані також результати числового скінченно-елементного дослідження чутливості результатів розрахунку до варіювання основних параметрів болтового з'єднання: зусиль затяжки болтів, збільшення діаметра розвантажувальних втулок, конструктивного зміщення осей болтів до серединної поверхні оболонки відсіку тощо. Отримані результати можуть бути корисними як науково-методичне підґрунтя до коректного вибору розрахункових схем фланцевих з'єднань відсіків ракет-носіїв.

Ключові слова: фланцеве з'єднання; відсік ракети-носія; шпангоут; розрахункова схема.

This work is devoted to the study of the features of the deformation of bolted flange connections of launch vehicle compartments and the determination of failure loads thereon. The goal of the work is to study problematic issues of the correct choice of an analytical model for flange connections of individual compartments. A method for determining the ultimate load on a bolted connection is presented. Finite element analysis methods were used. The calculations meet all the requirements adopted in the field of bolted connection strength standards. Relevant safety factors are also used. Account is taken of bolt thread stripping, unloading sleeve shearing, the bolt tightening force simulated by the introduction of corresponding temperature loads, and other connection member parameters. The results of full-scale destructive tests of the flange connection of the end frames of individual compartments are analyzed. A discrepancy between the calculated results and the test data is found out. It is shown that the discrepancy is due to an insufficiently correct consideration of the design features of the connections and the action of external loads, which led to additional components of eccentric tension-compression. It is demonstrated that the destructive load calculated with account for the “force lever” predictably proved to be smaller than that calculated in the assumption of a rigid frame and close to the full-scale test data. The article also presents the results of a numerical finite element study of the sensitivity of calculated results to variations in the principal bolt connection parameters: the bolt tightening forces, the unloading sleeve diameter, the constructive offset of the bolt axes to the middle surface of the compartment shell, etc. The results obtained may be useful as a scientific and methodological basis for the correct choice of analytical models for flange connections of launch vehicle compartments.

Keywords: flange connection; launch vehicle compartment; frame; analytical model.

Прогнозування граничних навантажень елементів з'єднання відсіків ракет-носіїв (РН) є однією з досить відповідальних задач створення силових елементів ракетно-космічної техніки (РКТ) [1, 5, 8, 11]. Вважається, що методи розрахунку фланцевих болтових з'єднань на сьогодні є достатньо досконалими, хоча і до цього часу їх розробка знаходить своє місце в наукових дослідженнях окремих аспектів цієї проблеми.

Так, в роботі [10] досліджуються фланцеві з'єднання обладнання і тру-

© В. В. Гусев, А. П. Дзюба, Д. В. Клименко, В. М. Сіренко, 2025

бопроводів в хімічній технології, в [2, 3] – як з'єднання ланок космічного маніпулятора, в [4] – ефективних систем з'єднання і роз'єднання відсіків РН, а в [12, 13] – завантаженість стиків ракет з урахуванням конструктивних особливостей суміжних відсіків, в [7] – подані результати експериментальних досліджень фланцевих з'єднань трубопроводів РН, а в [9] розглянуто застосування програмних комплексів для проектування фланців паливного бака із вуглепластику.

Слід зазначити, що сучасні прикладні пакети скінченно-елементного аналізу надають широкі можливості для ефективного використання широкого спектра засобів цього ефективного підходу [15], що дозволяє отримувати достатньо достовірні результати розрахунків.

В той же час некоректне використання зазначених можливостей, зокрема, при виборі розрахункової схеми, формулюванні умов взаємодії з іншими підконструкціями, недостатньої точності врахування зовнішніх впливів тощо можуть суттєво вплинути на результати розрахунку [6, 14].

В поданій статті демонструється, що для отримання достовірних результатів розрахунку міцності болтових з'єднань відсіків РН надзвичайно важливим є в коректний вибір розрахункової схеми.

З'єднання відсіків РН здійснюється шляхом використання болтових з'єднань торцевих шпангоутів окремих відсіків. Конструктивні схеми таких з'єднань мають такий вигляд (рис. 1), де позначено: 1 – бак пального; 2 – хвостовий відсік; 3 – бак окислювача; 4 – друга ступінь; 5 – болт; 6 – шайба пружня; 7 – шпангоут бака окислювача; 8 – розвантажувальна втулка.

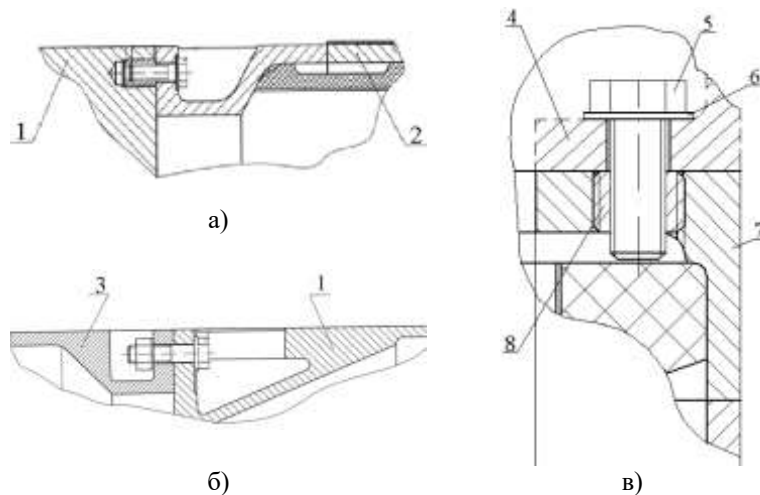


Рис. 1 – Типові болтові з'єднання відсіків РН:
а) – з'єднання корпусу хвостового відсіку з баком пального;
б) – стикове з'єднання баків окислювача і пального;
в) – конструктивна схема з'єднання ступенів

В розглянутому випадку стикове з'єднання хвостового відсіку з баком пального здійснювалось з використанням n болтів, які були рівномірно розташовані по колу шпангоута, виготовленого із алюмінієвого сплаву АМг6, через сталі розвантажувальні втулки, співвісне закручені у шпангоут бака.

Попередньо з достатньою точністю була визначена також величина діючої на стиковий вузол максимальної експлуатаційної розтягуючої поздовжньої сили $T_{експ}$, що реалізується у випадку транспортування РН. Дія динаміч-

них впливів та можливих крутних моментів не враховувалась. Розрахункове значення розтягуючої сили, з урахуванням коефіцієнта безпеки f , було прийнято рівним $T_{руйн}$. Вирішення задач числового аналізу таких складених конструкцій сучасного машинобудування часто здійснюється шляхом їх декомпозиції на простіші складові.

Використання такого підходу пов'язано як з обчислювальними можливостями проведення числових досліджень одночасно всієї конструкції, так і з необхідністю зниження обчислювальних витрат в процесі проектування [6]. Ці аспекти є важливими також і для дослідження особливостей розподілу неоднорідного напружено-деформованого стану (НДС) конструкції, зокрема, в зоні концентраторів напружень, задач пружно-пластичного деформування, вибору раціональних параметрів таких конструктивних елементів тощо.

Очевидно, що застосування такого підходу дозволяє суттєво скоротити розв'язок задач розрахунку достатньо складних конструкцій. У той же час у цьому випадку до діючих зовнішніх навантажень необхідне долучення умов їх спільного деформування та зусиль взаємодії відповідних підконструкцій. Коректне вирішення цієї проблеми також є досить проблематичним.

За класичною розрахунковою схемою фланцевого з'єднання в розрахунках вважалось також, що в груповому з'єднанні руйнуючі навантаження для всіх болтів будуть однаковими. Можлива нерівномірність розподілу максимальних розтягуючих зусиль в стикувальних болтах, яка може виникати при наземній експлуатації, при старті та в польоті, урахувалась за допомогою коефіцієнту $k_n = 0,8$. Виходячи із рівня зовнішніх навантажень, припустимих значень розривних напружень болтів, зусиль зрізу їх різьби та втулок, а також зусиль моментів попередньої затяжки болтів різьбових з'єднань, що імітувались шляхом введення відповідних температурних зусиль, в розрахунках було визначено необхідну кількість болтів та їх розміри.

Визначення НДС такого різьбового з'єднання здійснювалось з використанням пакету скінченно-елементного аналізу Nastran. Геометричні розміри та всі фізико-механічні характеристики стикувальних елементів вважались заданими з необхідною точністю. Оскільки жорсткість шпангоута бака пального перевищує жорсткість верхнього торцевого шпангоута хвостового відсіку більше, ніж на порядок, при числовому моделюванні шпангоут бака пального вважався абсолютно жорстким.

Вважаючи, що теоретичне значення максимального зусилля в окремому болті з урахуванням зусиль від попередньої затяжки складає Q^* , при наявності n точок болтового з'єднання з урахуванням коефіцієнта нерівномірності навантаження k_n , розрахункова величина несучої здатності стику буде такою

$$T_{руйн} = n \cdot Q^* \cdot k_n$$

При проведенні розрахунків, крім коефіцієнта безпеки для випадку транспортування РН f було враховано також обов'язковий коефіцієнт $f_{дон}$ підвищення міцності кріплення по відношенню до міцності з'єднувальних деталей. Таким чином, всі вимоги, прийняті в галузі норм міцності для розрахунку болтових з'єднань, були виконані у повному обсязі.

Програмою натурних випробувань було передбачено навантаження болтового з'єднання до 130 % від експлуатаційного навантаження $T_{експ}$.

Для проведення випробувань була зібрана конструкція бака, яка розташовувалась горизонтально та спиралась нижнім шпангоутом бака окислювача на ложемент, а імітатором 2-ої ступені з силовим кільцем – на технологічні опори. Відсік зі сторони верхнього шпангоута бака окислювача закріплювався до силової стіни. Осьове розтягуюче зусилля створювалось потужними силосбуджувачами (домкратами). Методика та послідовність дій проведення таких випробувань відповідала прийнятим нормам міцності.

Принципова схема установки для випробувань подана на рис. 2. Тут 1 – бак окислювача; 2 – силова стінка; 3 – домкрати; 4 – стійка; 5 – обичайка та силові кільця; 6 – ложемент.

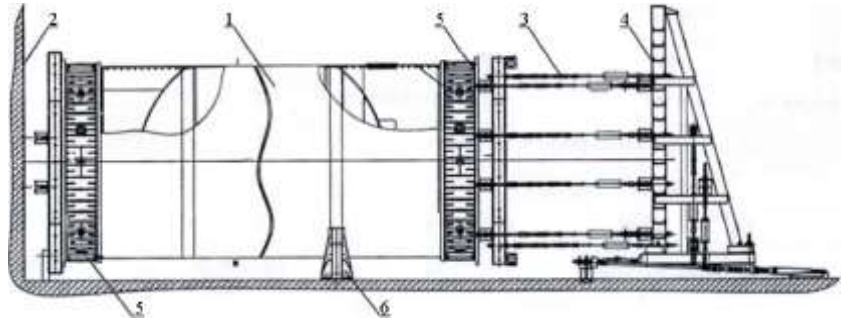


Рис. 2 – Схема установки для випробувань

При проведенні підсумкових статичних випробувань в процесі навантаження відбулося непередбачуване в розрахунках руйнування болтового з'єднання бака окислювача зі стендовим імітатором другої ступені (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3 – Руйнування болтового з'єднання:
а) загальний вигляд стику, б) вигляд зруйнованої втулки

Руйнування конструкції стику відбулося у вигляді одночасного виривання всіх втулок (рис. 3, а)) із верхнього шпангоута конструкції при значенні осьової розтягуючої сили $T_{руй}^*$, що склало біля 80 % величини розрахункової руйнуючої сили такого болтового з'єднання. На рис. 3, б) подано вигляд після руйнування різьбового з'єднання окремої втулки.

За результатами передчасного руйнування фланцевого з'єднання було проведено детальне моделювання НДС стику з урахуванням всіх особливостей поведінки конструкції під навантаженням та встановлено, що головною причиною руйнування стику бака окислювача зі стендовим імітатором 2-ої ступені виявилось недостатня жорсткість торцевого шпангоута.

Було встановлено, що суттєва розбіжність розрахункових і руйнуючих експериментальних даних обумовлена некоректним вибором вихідної розрахункової схеми болтового з'єднання, внаслідок неврахування в розрахунках додаткових зусиль, обумовлених наявністю ефекту позацентрального розтягу («ефект важеля сили»). Це пов'язано з тим, що напрямком осей всіх 60 болтів не співпадає з напрямком твірної оболонки обертання бака окислювача, що не було прийняте до уваги при побудові розрахункової схеми. Тому зовнішнє розтягуюче навантаження мало ексцентриситет прикладення, що дорівнював відстані між осями болтів і серединною поверхнею оболонки відсіку і, як наслідок, виникали додаткові складові від моменту прикладеного навантаження.

На рис. 4 подано результати скінченно-елементного аналізу, що демонструють суть ефекту позацентрального розтягу при деформуванні болтового з'єднання.

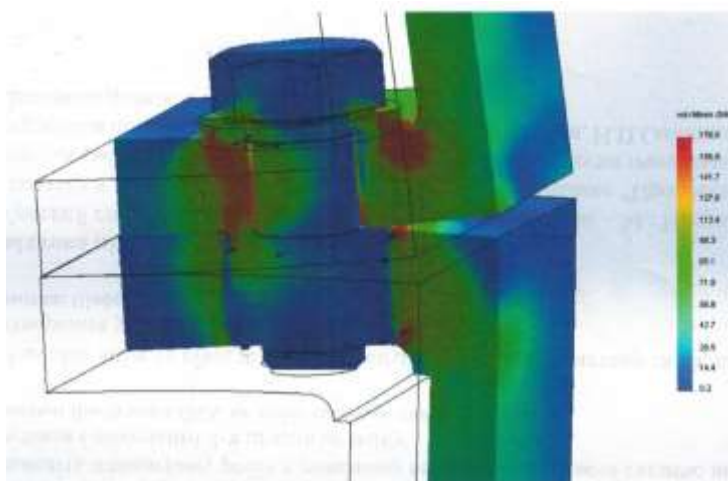


Рис. 4 – Демонстрація ефекту позацентрального розтягу

У зв'язку з цим у подальших розрахункових роботах було введено поняття так званого коефіцієнту «важеля сили», що збільшує реальні напруження в болтовому з'єднанні. Було розраховано, що для розглянутих варіантів конструкцій стику його значення знаходиться в межах $1,1 \div 1,6$ і обумовлено, головним чином, відстанню (ексцентриситетом) від осі болтів до серединної поверхні оболонки бака, а також величиною зовнішнього навантаження та моменту зтяжки болтів.

Далі використовувався метод скінченних елементів з урахуванням «моменту важеля сили». Прогнозовано руйнуюче навантаження для стику для цього випадку виявилось меншими, ніж отримане за розрахунковою схемою

«жорсткий шпангоут» і близьким до даних експериментальних натурних випробувань.

У загальному випадку при коректно побудованій розрахунковій схемі обчислення напружень і деформацій в болтовому з'єднанні здійснюється з використанням одного із доступних пакетів скінченно-елементного аналізу.

За результатами скінченно-елементного числового експерименту з урахуванням ексцентриситету розташування болтів фланцевого з'єднання відсіків до напрямку дії зовнішнього навантаження додатково було проведено дослідження чутливості результатів розрахунку від зміни деяких вхідних параметрів болтового з'єднання відсіків РН. Було встановлено, що:

- збільшення зусиль затяжки болтів до 30 % приводить до збільшення напружень в стику втулки і шпангоута не більше, ніж до 10 %;
- збільшення діаметра втулки на 30 % приводить до зменшення максимальних напружень в болтовому з'єднанні більше, ніж у 2 рази;
- конструктивне зміщення осі болтів в бік оболонки баку на 20 % від штатного розташування до серединної поверхні оболонки знижує напруження в болтовому з'єднанні на 40 %.

1. Балабух Л. И., Алфутов Н. А., Усюкин В. И. Строительная механика ракет. Москва: Высшая школа, 1984. 496 с.
2. Бейцун В. С., Дзюба А. П. Експериментальне дослідження податливості фланцевих з'єднань у моделі маніпулятора космічного призначення. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. 36. наук. праць. 2024. Вип. 38. С 5–19. <http://doi.org/10.15421/4224101>
3. Бейцун В. С., Тарасов С. В. Методика фотограмметричного вимірювання люфтів та пружних податливостей в шарнірних вузлах транспортних маніпуляторів та штанг космічних апаратів. Технічна механіка. 2024. Вип. 3. С. 124–137. <http://doi.org/10.15407/itm2024.03.124>
4. Бондаренко Д. А. Криворучко А. Т., Хорольский П. Г. Розробка ефективних систем з'єднання і роз'єднання відсіків. Journal of Rocket-Space Technology. 2020. № 28(4) С.14–20, <http://doi.org/10.15421/452002>
5. Дегтярёв А. В. Ракетная техника. Проблемы и перспективы. Днепр: АРТ-ПРЕСС. 2014. 420 с.
6. Дзюба А. П., Дзюба О. А., Сиренко В. М. Дослідження чутливості результатів розрахунку міцності елементів конструкцій до варіювання вхідних даних. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. 36. Наук. праць. 2024. Вип. 39. С.
7. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1976. 408 с.
8. Манько Т. А., Литот А. В. Применение современных программных комплексов при проектировании и изготовлении фланцев топливного бака из углепластика. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. Д.: Лира, 2019. С. 90–94.
9. Мікульник І. О., Карвацький А. Я., Іваненко О. І., Лелека С. В. Фланцеві з'єднання обладнання і трубопроводів хімічної технології. Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2023. № 2(22). С. 15–31.
10. Моссаковский В. И., Макаренков А. Г., Никитин П. И., Саввин Ю. И., Спиридонов И. Н. Прочность ракетных конструкций. М.: Высшая школа, 1990. 360 с.
11. Харченко В. Моделювання та визначення напруженого стану стиків ракетних конструкцій із композиційних матеріалів. Прикладні проблеми механіки і математики. 2017. Вип. 15. С. 185–190.
12. Харченко В., Клименко Д. Навантаженість стиків ракети з урахуванням особливостей конструкцій суміжних відсіків. Прикладні проблеми механіки і математики. 2019. Вип.17. С. 98–104. <https://doi.org/10.15407/apmm2019.17.98-104>
13. Dzyuba A., Sirenko V. Substantiation of Reliability of Calculation of Strength of Rocket and Space Technology Structures Without Destructive Tests/ Advances in Mechanics. Current Research Results of the NAS of Ukraine. Chapter 12. P. 212–222. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37313-8_12
14. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Sixth edition. Butterworth-Heinemann, 2016. 753 p.

Отримано 26.08.2025,
в остаточному варіанті 25.09.2025