

ЗВІТ

за проектом № П-67-14 «Розрахункова оцінка вібрацій елементів аерокосмічних систем при силових та аеродинамічних навантаженнях» у 2015 році
за етапом 2: «Визначення параметрів розрахункових моделей та дослідження динамічних процесів в елементах конструкцій ракетно-космічних систем при ударному навантаженні та короточасній термосилової дії» 2015 року
згідно Цільової комплексної програми НАН України по науковим космічним дослідженням на 2012–2016 рр.

I

Методико-програмне забезпечення оцінки термоміцності просторових конструкцій з тонкостінними елементами застосовано для попереднього визначення нестационарного теплового і напружено-деформованого стану (НДС) та залишкових деформацій конструктивного вузла стартового обладнання в ескізованому варіанті. Результати підтверджують можливість застосування розробки для розрахунково-проектних досліджень елементів стартового обладнання.

Отримало розвиток методико-програмне забезпечення на основі напіваналітичного методу скінченних елементів (МСЕ) і тригонометричних розкладань в окружному напрямку для розрахунку динаміки осесиметричних космічних конструкцій [9, 10, 12]. Враховується неосесиметричний розподіл жорсткості властивостей (вплив піропристроїв), що призводить до зв'язаності задач по кожній з гармонік. Виконано розрахункові дослідження при неповному розділенні адаптерів ракетноносія (РН) і космічного апарату (КА) при спрацюванні першої групи піропристроїв. Програмна розробка має досить високу швидкодію для осесиметричного класу конструкцій і дозволяє виконувати оперативні дослідження в умовах КБ. Розрахункова модель та результати розрахунку адаптера РН представлені на рис. 1. При визначенні параметрів моделі, зокрема навантаження, використані дані експерименту.

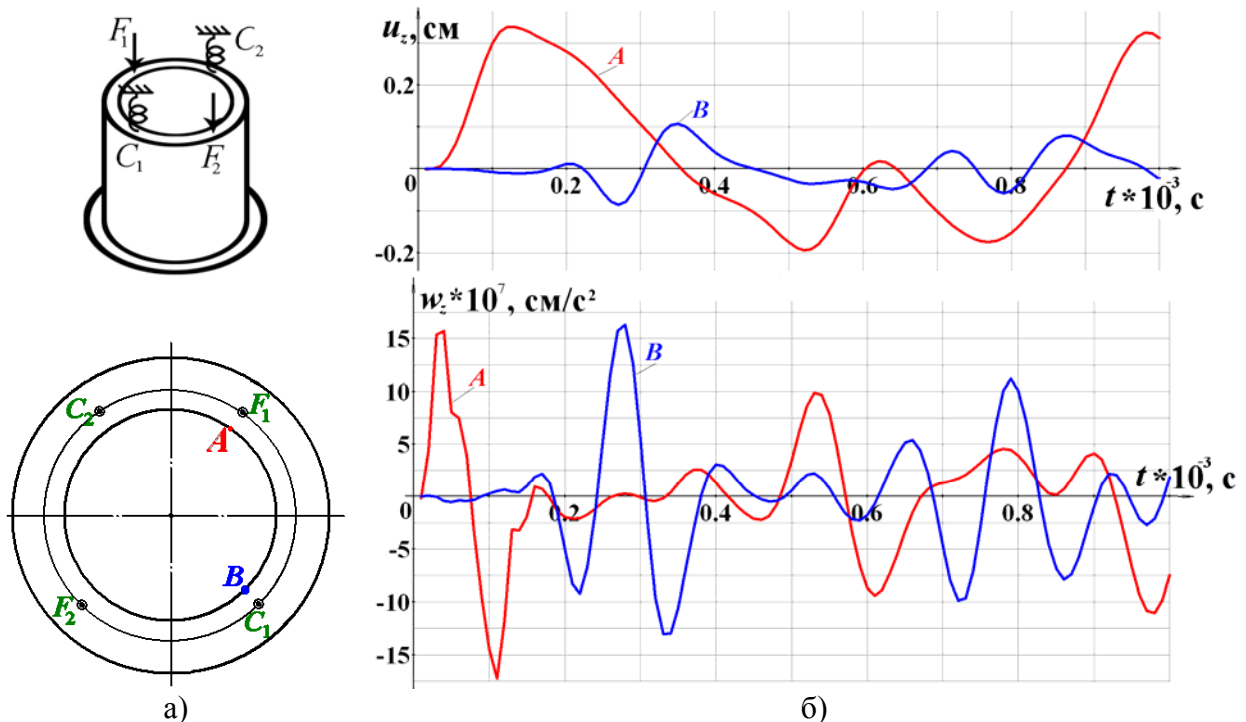


Рис. 1. Реакція адаптера РН при першій фазі розділення: а – розрахункова схема; б – результати розрахунків – осьові переміщення u_z та прискорення w_z ; F_1, F_2 – діючі зусилля; C_1, C_2 – зосереджені жорсткості

Створено модель та розв'язано задачу про визначення динамічної реакції в системі адаптерів РН і КА при спрацюванні піропристроїв та неповному розділенні (розрахункову модель представлено на рис. 2).

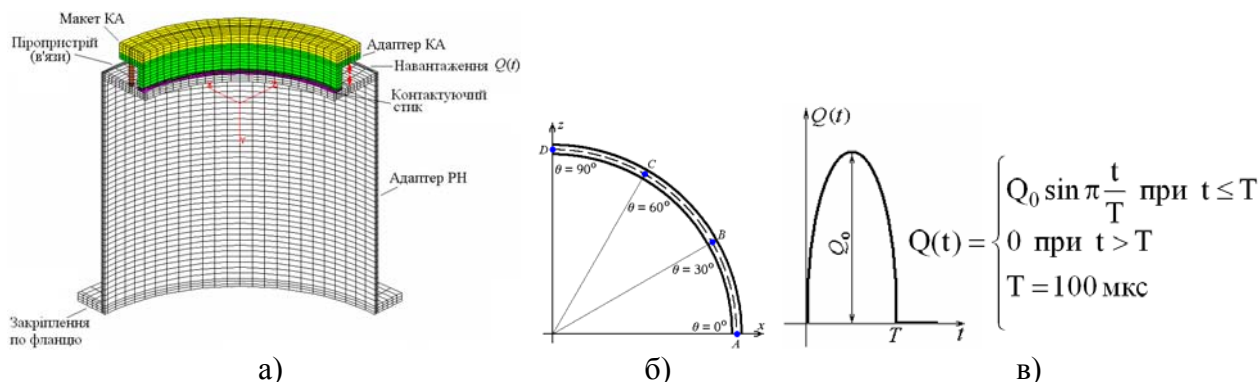


Рис. 2. Розрахункова модель системи адаптерів РН і КА: а – конструкція з контактуючими елементами(система адаптер РН – адаптер КА); б – область контактування(А, В, С, D – точки контролю); в – імпульсне навантаження від спрацювання піропристроїв

Враховано можливість динамічного контактування адаптерів, що проявляється в змінності за часом зон контакту та в дискретності розподілення за просторовими координатами [11, 13]. Отримано кінематичні характеристики в контрольних точках поверхні контакту (переміщення, швидкості, прискорення). Контактуювання між адаптерами переважно є короткочасним (10 – 30 мкс при тривалості дії імпульсних сил від спрацювання піропристроїв 100 мкс) та призводить до додаткової контактної взаємодії і спричиняє високочастотні сплески прискорень. Розподіл областей контакту між адаптерами у часі показано на рис. 3 (область контакту затемнена).

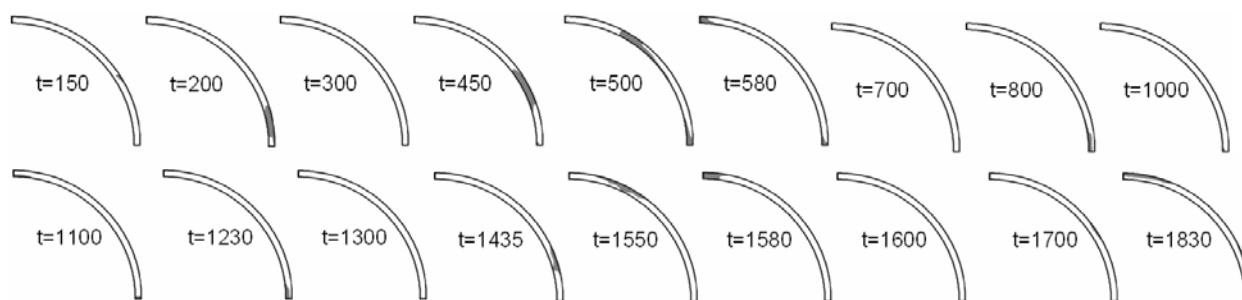


Рис. 3. Зміна зон контакту за часом ($[t]=\text{мкс}$)

Виконано порівняння спектрів удару (до 10 кГц) за кінематичними даними адаптера КА при врахуванні контакту та за його відсутності. В області малих та середніх частот (до 6 кГц) спектри кількісно мало різняться, а відмінності здебільшого проявляються в розташуванні піків. Для більших частот (понад 6 кГц) значення максимальних прискорень вищі при врахуванні контактування, що пояснюється дією коротко-імпульсних контактних сил (рис. 4).

Програмне забезпечення пристосовано для практичних розрахунків та виконано дослідження прискорень елементів системи розділення конструкцій НОД і УНІ. Розрахункові моделі цих конструкцій представлено на рис. 5, а спектри удару, що обчислювались за результатами розрахунків, наведено на рис. 6.

Результати представлених досліджень передано фахівцям ДП «КБ «Південне».

Плануються дослідження динамічної міцності елементів системи обтічника ракети з урахуванням обмежень на втрату стійкості. Ідентифікація параметрів навантаження на адаптери системи розділення РН і КА від спрацювання піропристроїв по експлуатаційним та розрахунковим даним.

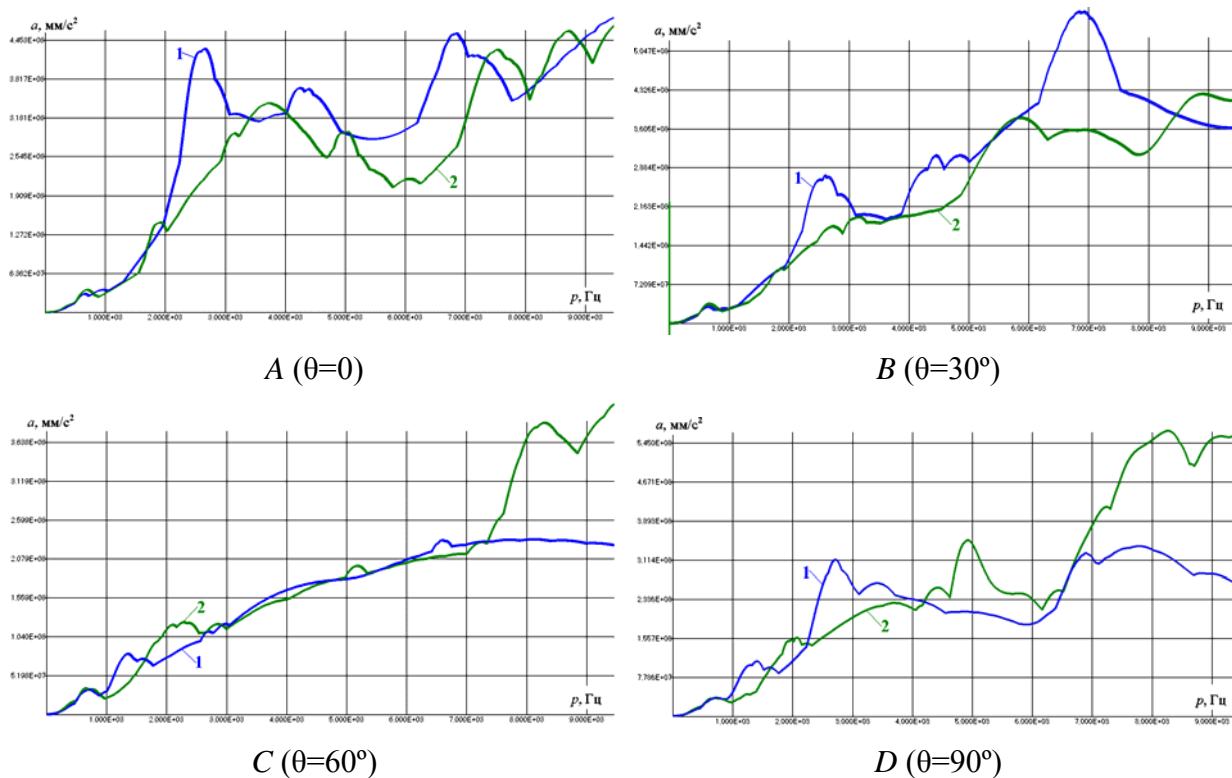
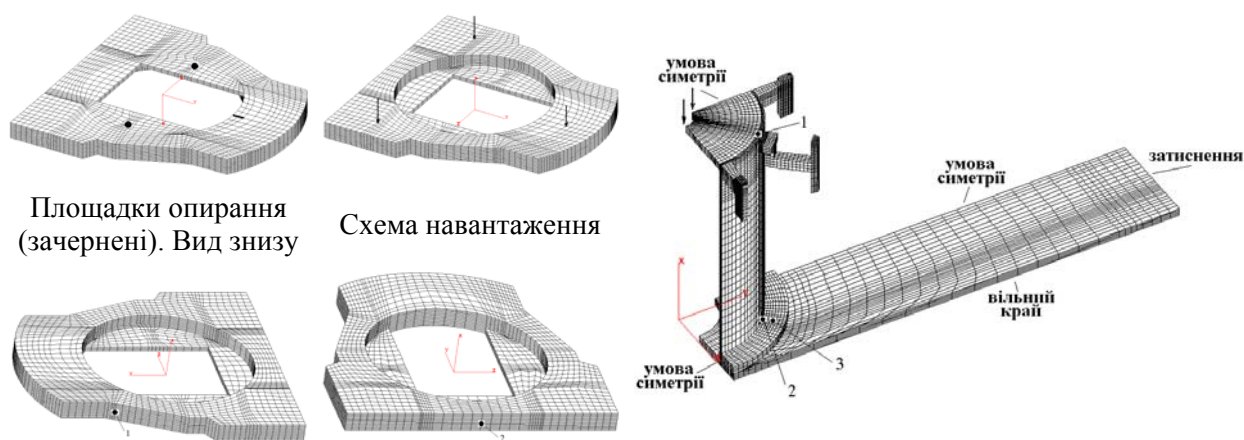


Рис. 4. Спектри удару (прискорення) при кінематичному збудженні від адаптера КА: 1 – з урахуванням контакту; 2 – без урахування контакту



Розташування точок 1, 2 контролю результатів 1, 2, 3 — точки контролю результатів
 Рис. 5. Розрахункові моделі систем розділення: а – HOD, б – UNI

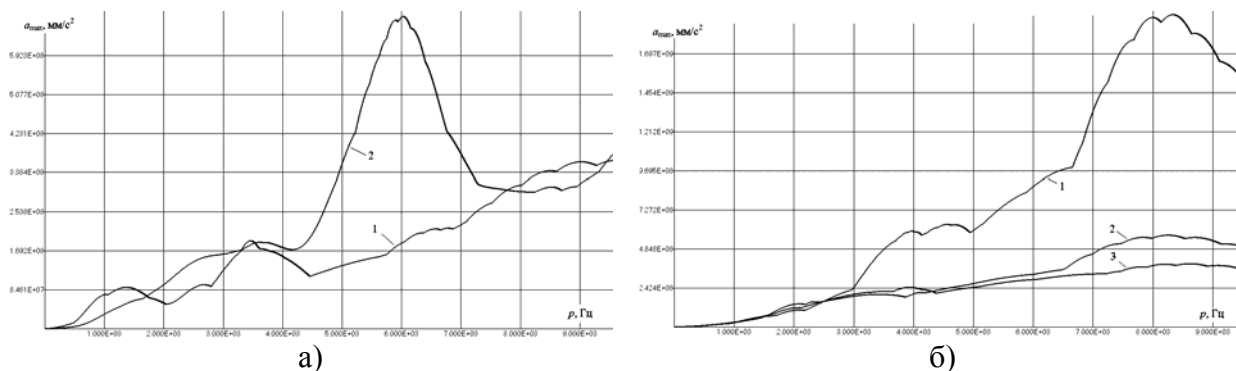


Рис. 6. Спектри удару (прискорення) в елементах системи розділення: а – HOD, б – UNI

II

Проведено дослідження динамічної нестійкості обтічників ракетноносіїв в надзвуковому газовому потоці. Розглядалися конструкції, які складаються з конічних, циліндричних і параболічних оболонок, підкріплених стрингерами і шпангоутами. Аналізувалася втрата динамічної стійкості конструкції, що відповідає біфуркації Хопфа.

Отримано моделі обтічників з кінцевим числом ступенів свободи в надзвуковому газовому потоці на базі методу заданих форм. Коливання конструкції в надзвуковому газовому потоці розкладаються за власними формами коливань, які визначаються методом Релея-Рітца для заданої геометрії конструкції. Для опису надзвукової газової течії застосовується поршнева теорія, а в разі обтікання параболічної оболонки вона уточнюється на поправку Крумхара. Запропоновано підхід для розрахунку форми початку автоколивань при критичному числі Маха (як приклад, рис. 7). Визначено, що нестійкий стан рівноваги для посилених конічних і параболічних обтічників в надзвуковому газовому потоці спостерігається для значень чисел Маха, що лежать в діапазоні від 1,001 до 1,414. Для чисел Маха більше 1,4143 стан рівноваги стійкий.

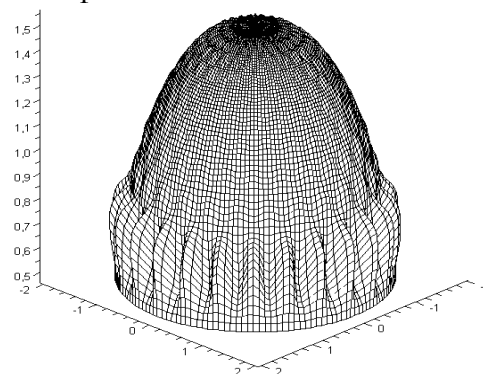


Рис. 7. Форма руху оболонки з радіусом основи 2 м і висотою 4 м

Моделі, методи та результати досліджень докладно викладені в роботах [1-5]. Проведено розрахунки наданих обтічників. З отриманими результатами досліджень і програмним забезпеченням ознайомлені фахівці КБ «Південне».

Розроблено методи аналізу аеропружних коливань оперення ракет в дозвуковому газовому потоці. У результаті такого аналізу визначаються значення швидкості, при якій спостерігається динамічна нестійкість. Для дослідження амплітуд коливань в області флатера враховується геометрично нелінійне деформування конструкції [6, 7].

У наступному році плануються дослідження обтічників з композитних матеріалів та аналіз впливу автоколивань конструкції на коливання корисного вантажу.

III

Проведено дослідження динамічних процесів корпусних оболонкових композитних елементів ракетноносіїв під дією високошвидкісного ударного навантаження. Розроблено математичну модель деформування та руйнування на основі даних о корпусі двигуна, що отримані від ДП КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля. Динамічна модель, що розроблена, враховує особливості конструкції, а саме: оболонка обертання є складеною оболонкою, що містить серединну частину у формі циліндричної оболонки змінної товщини та дві крайові частини у формі усічених сфер. У зонах з'єднання цих частин виконані умови сумісності деформування, а у зонах закріплення переднього та заднього днищ виконані умови закріплення корпусу з основною конструкцією. Математична модель враховує деформації поперечного зсуву та інерції обертання. Модель високошвидкісного ударного навантаження включає етапи збільшення тиску до максимального, впливу максимального тиску на конструкцію та експоненціального зниження тиску у часі [8]. Створено методику для визначення надлишкового тиску на поверхню конструкції внаслідок впливу внутрішнього навантаження (рис. 8).

Створено методичне та програмне забезпечення для визначення динамічної міцності складеної оболонки змінної товщини з композитного матеріалу під дією високошвидкісного ударного навантаження. Проведено розрахункові дослідження динамічних процесів у корпусних оболонкових композитних елементах ракетноносіїв під дією високошвидкісного ударного навантаження. Доведено, що для заданого діапазону робочого надлишкового тиску на внутрішню поверхню корпусного елемента конструкція, що виконана з обраного композитного матеріалу, зберігає свою цілісність. Отримано, що максимальні переміщення в конструкції не

перевищують 0,27 мм і зосереджені вони в центральній частині, а в зонах нероз'ємного з'єднання і закріплення з основною конструкцією практично відсутні (рис 9, рис. 10).

Результати досліджень передано фахівцям ДП «КБ «Південне»

Плануються дослідження динамічної міцності корпусних оболонкових елементів ракетоносіїв з металевих та композитних матеріалів під дією імпульсного навантаження з урахуванням впливу швидкості навантаження на пружно-пластичне деформування.

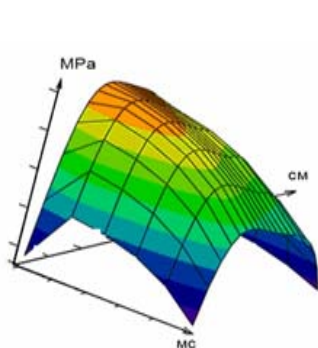


Рис. 8. Поверхня внутрішнього надлишкового тиску

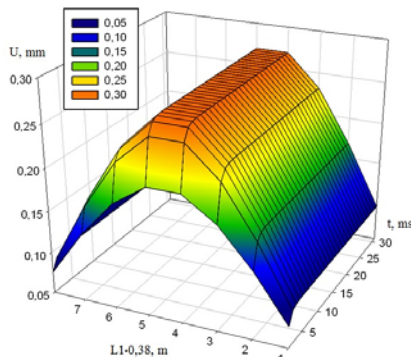


Рис. 9. Переміщення уздовж твірної для $P = 12$ МПа в період часу $0 \div 30$ мс

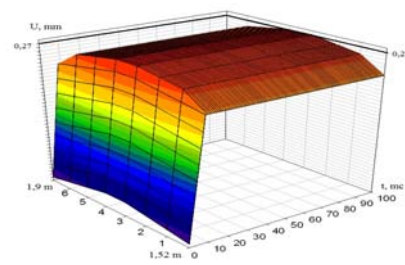


Рис. 10. Переміщення в центральній частині корпусу для $P = 12$ МПа

За результатами досліджень опубліковані статті

1. K. V. Avramov . M. V. Chernobryvko . O. Kazachenko . T. J. Batutina. Dynamic instability of parabolic shells in supersonic gas stream // *Meccanica*. – 2015.– DOI 10.1007/s11012-015-0247-4 –pp. 1-12.
2. M.V. Chernobryvko, K.V. Avramov, V.N. Romanenko, T.J. Batutina, V.A. Pirog, U.S. Suleimenov. Dynamic instability of ring- stiffened conical thin-walled rocket fairing in supersonic gas stream // *J Mechanical Engineering Science* – 2015.– Proc IMechE Part C: Special Issue. – P. 1–14.
3. M. V. Chernobryvko, K. V. Avramov Natural vibrations of parabolic shells // *Journal of Mathematical Sciences*. – Vol. 206. – No. 3. – 2015. – P. 78-85.
4. М.В. Чернобрывко, К.В. Аврамов, Т.Я. Батутина, П.Г. Дегтяренко, А.М. Тонконоженко, У.С. Сулейменов. Динамическая неустойчивость подкрепленных конических обтекателей ракет-носителей в сверхзвуковом газовом потоке // *Техническая механика*. – 2015. – № 1. – С. 15-29.
5. К.В. Аврамов, М.В. Чернобрывко, Д.В. Клименко, Т.Я. Батутина. Динамическая неустойчивость обтекателей ракет-носителей в сверхзвуковом газовом потоке // *Научно-технический сборник «Космическая техника. Ракетное вооружение»*. – 2015 – 11 стр. – в печати.
6. K.V. Avramov, E.A. Strel'nikova. Saturation of almost periodic and chaotic aeroelastic oscillations of plates under a resonant multimode force // *International Applied Mechanics*. – Vol. 51. –No. 3. – 2015. – P. 342-349.
7. К.В. Аврамов, О.К. Морачковский, Р. Кочуров, А.М. Тонконоженко, В.Ю. Козарин, Л. Розова. Полуаналитический метод конечных элементов в задачах изгиба вафельных цилиндрических оболочек // *Вісник дніпропетровського університету*. – №5. – Т.22. – 2014. С. 9-19 (вышла в 2015).
8. M. Chernobryvko, K. Avramov, L. Kruszka Deformation of Compound Shells Under Action of Internal Shock Wave Loading // *Proceedings 11th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading (DYMAT 2015)*, September 7th – 11th, 2015. – Lugano, Switzerland. – 94, 04046, pp. 1-4.
9. Оцінка динамічної реакції вузлів системи розділення космічного апарата та носія при імпульсних навантаженнях / М.Г. Шульженко, Б.П. Зайцев, П.П. Гонтаровський, Т.В. Протасова, Т.Я. Батутина, І.В. Шеремет // *Космічна наука і технологія*, 2015. – Т. 21. – № 1. – С. 15–19.
10. Оценка переходных процессов в элементах системы разделения ракетносителя и космического аппарата при импульсном воздействии / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский,

- Т.В. Протасова, А.С. Колядюк, Т.Я. Батутина // Космические технологии: настоящее и будущее: тезисы Международной конференции – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 19–21 мая 2015 г. – С. 17.
11. Методика расчета динамической реакции конструкции с контактирующими элементами при импульсном воздействии / Н.Г. Шульженко, Б.Ф. Зайцев, А.В. Асаенок, А.С. Колядюк, Т.Я. Батутина // Космические технологии: настоящее и будущее: тезисы Международной конференции – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 19–21 мая 2015 г. – С. 20.
 12. Расчетная оценка переходных процессов в трехмерных осесимметричных конструкциях при кратковременном импульсном воздействии / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Т.В. Протасова, А.С. Колядюк // Вісник Запорізького національного університету: Збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. – Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2015, № 3. – С. 302–309.
 13. Динамическое контактное взаимодействие адаптеров космической конструкции при разделении / Н.Г. Шульженко, Б.Ф. Зайцев, А.В. Асаенок, Д.В. Клименко, Т.Я. Батутина // Космічна наука і технологія (подана в печать).

Керівники проекту

д.т.н., проф.

К.В. Аврамов

д.т.н., проф.

М.Г. Шульженко