

МІЦНОСТЬ, НАДІЙНІСТЬ І РЕСУРС КОНСТРУКЦІЙ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ І ЕНЕРГЕТИКИ*Інститут технічної механіки**Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: hudramovich@i.ua*

Наведено короткий огляд проведених досліджень в галузі міцності, ресурсу і надійності конструкцій аерокосмічної техніки і енергетики по напрямку досліджень Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України: «Міцність, надійність і оптимізація механічних систем, ракет-носіїв і космічних апаратів». Перераховані основні літературні джерела 1991 – 2021 років. Більш докладно проаналізовано питання, що визначено у 2014 – 2021 роках, і результати досліджень опубліковано (монографії, статті, що входять в міжнародну наукометричну базу, доповіді на міжнародних наукових конференціях). Вони стосуються моделювання процесів деформування неоднорідних матеріалів, зокрема бетону, в об'єктах споруд теплової енергетики з використанням нових розробок в теорії пластичності, зокрема, теорії течії, оцінці ресурсу оболонкових конструкцій ракетно-космічної техніки при наявності концентраторів напружень у вигляді отворів, включень, тріщин, розробці методологічних основ міцності, надійності і ресурсу стартових комплексів для запуску ракет-носіїв, призначених для виведення на навколосезну орбіту космічних апаратів різного класу. Розглянуто методологічні етапи розрахунку і дана класифікація термомеханічних навантажень великої інтенсивності. При визначенні ресурсу стартових комплексів використано поняття механізмів мало і багато циклової втоми. Розглянуто питання розробки швидкодіючих проєкційно-ітераційних схем числових методів скінченних елементів і локальних варіацій, що суттєво скорочують комп'ютерний час розрахунків і можуть бути ефективно використані при необхідності великого обсягу розрахунків при проєктуванні і відпрацюванні нових об'єктів аерокосмічної техніки і енергетики з використанням експериментів в процесі відпрацювання. При цьому проаналізовано вплив непружних деформацій в околі вирізів. Розглянуто числове моделювання задач міцності і стійкості неоднорідних оболонкових систем з використанням указаних нових розрахункових схем. Такі дослідження стосуються перш за все тонкостінних оболонкових систем неоднорідної структури при локалізованих навантаженнях та впливу підкріплювальних включень на концентрацію напружено-деформованого стану.

Ключові слова: міцність, надійність, ресурс, енергетика, ракети-носії, ракетні стартові комплекси, оболонкові неоднорідні конструкції.

This paper gives a brief overview of investigations into the strength, reliability, and life of aerospace and power engineering structures conducted along the following research line of the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine: the strength, reliability, and optimization of mechanical systems, launch vehicles, and spacecraft. The basic literature sources of 1991 – 2021 are cited. A more detailed consideration is given to the results obtained in 2014 – 2021 and published (monographs, articles indexed in international citation databases, and international conference papers). They involve the simulation of deformation of inhomogeneous materials, in particular concrete, in heat-and-power engineering structures, the life estimation of shell structures of rocket/space hardware in the presence of stress concentrators in the form of openings, inclusions, and cracks, and the development of a methodological basis for the strength, reliability, and life of launch complexes for launch vehicles of different spacecraft classes. Methodological stages of calculation are considered, and high-intensity thermomechanical loads are classified. The life of launch complexes is determined using the notion of low- and high-cycle fatigue. Consideration is given to the development of fast projection-iteration schemes of the finite-element method and the method of local variations, which significantly reduce the computational time and may be used to advantage when a large body of calculations is needed in the design and development of new aerospace hardware and power engineering structures with the use of experiments at the developmental stage. In doing so, the effect of inelastic deformations in the vicinity of cutouts is analyzed. A numerical simulation of the strength and stability of inhomogeneous shell structures with the use of the above-mentioned new computational schemes is considered. Investigations of this type primarily involve inhomogeneous thin-walled shell structures at local loads and the effect of reinforcing inclusions on stress and strain concentration.

Keywords: strength, reliability, life, power engineering, launch vehicles, launch complexes, inhomogeneous shell structures.

Дослідження, які проводяться у відділі міцності і надійності механічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ), зокрема, стосуються розробки і удосконалення методів розрахунку міцності, прогнозування ресурсу, забезпечення надійності стартових споруд космічних ракет-носіїв і

© В. С. Гудрамович, 2021

оболонкових конструкцій ракетно-космічної і авіаційної техніки, енергетики.

Ці дослідження стосуються одного з наукових напрямків ІТМ НАНУ і ДКАУ: «Міцність, надійність і оптимізація механічних систем, ракет-носіїв і космічних апаратів», що затверджено Президією НАН України.

Відомо, що серед видатних вчених-механіків, що були пов'язані з розвитком фундаментальних і прикладних питань науки «механіка» чимало видатних вчених, діяльність яких тісно пов'язана з нашою країною.

Наведемо слова редакційної статті у Вістях РАН (2010), що була присвячена сторіччю зі дня народження академіка В. В. Новожилова – видатного вченого-механіка, лауреата самих високих урядових і академічних нагород (він неодноразово був у нашій країні і плідно працював з Інститутом механіки ім. С. П. Тимошенка НАНУ і Інститутом проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАНУ): «Вчені-механіки повинні бути пов'язаними з тою чи іншою галуззю техніки і інженерної справи, концентрувати свої зусилля на виникаючих тут справжніх фундаментальних і прикладних проблемах». Ця глибока думка стосується видатних вчених, які є представниками нашої країни і, зокрема, народилися в Україні (або пов'язані з нею сімейним корінням), або плідно працювали тут, зокрема, в аерокосмічній галузі, в різних напрямках енергетики, гірничої справи та інших актуальних напрямках техніки, що одержали розвиток в нашій країні. Це, насамперед, видатні, всесвітньо відомі вчені: С. П. Тимошенко, С. П. Корольов, М. К. Янгель, О. К. Антонов, В. П. Глушко, М. О. Лаврентьев, О. Ю. Ішлінський, В. М. Челомей, Ю. О. Митропольский, О. М. Динник, Г. М. Савін, О. І. Бродський, М. Я. Леонов, В. І. Моссаковский, Я. С. Підстригач та інші.

Відмітимо деякі особливості об'єктів техніки, дослідженню яких присвячені роботи відділу. Конструкції аерокосмічної техніки, різних галузей енергетики є оболонково-стержневими системами складної неоднорідної структури (наявність багатьох недосконалостей форми різного класу, вирізів, люків, тріщин, пор, різнововщинність, які є конструктивно необхідними або виникають як пошкодження в процесі експлуатації конструкцій).

Оболонкові конструкції оптимальним чином поєднують мінімальну вагу і необхідну міцність і жорсткість. Основна мета багаточисельних досліджень задач деформування і критичних (граничних) станів є недопустимість руйнування або появи пошкоджень, що визиває неможливість подальшої експлуатації конструкцій.

Окрім відомих понять: міцність, жорсткість, руйнування, наведемо означення, що стосуються основних розділів діяльності в рамках висвітленого вище наукового напрямку, в якому працює відділ.

Надійність – властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих умовах застосування, технічного обслуговування і зберігання.

Ресурс – напрацювання пристрою (механізму) від початку його експлуатації або після ремонту до досягнення ним критичного (граничного) стану. Ресурс – показник довговічності об'єктів.

Довговічність – властивість елементів або системи довгостроково зберігати працездатність до настання критичних (граничних) станів при певних умовах експлуатації.

Критичний (граничний) стан – стан конструкції (споруд), при якому вона перестає задовольняти експлуатаційним вимогам, втрачає здатність чинити опір зовнішнім впливам, або отримує неприпустимі пошкодження.

Основні дослідження, що зроблені у відділі починаючи з 1991 р., відображено в списку літератури [1 – 36]. Маючи на увазі, що існує ряд публікацій, які стосуються робіт відділу на різних етапах, проведено огляд досліджень починаючи з 2014 р. (Це монографії [7 – 11], наукові статті в основному в наукових журналах, які входять до наукометричної бази даних (Scopus) видавництв Springer, Elsevier) [22, 23, 25, 27 – 30, 32 – 35]. Також відмічена участь в міжнародних конференціях, де завідувачем відділу було безпосередньо зроблено пленарні доповіді [24, 26, 31].

Означені в списку літератури монографії [7 – 11] присвячені розвитку нових розробок в галузі діагностування складних технічних об'єктів і споруд. В [7, 10] автором з ІТМ НАНУ і ДКАУ (Данієв Ю. Ф.) наведено основні поняття теорії надійності в технічній діагностиці. Відображено опис імовірно-статистичних методів в теорії надійності, поняття з різних законів розподілу часу безвідмовної праці об'єктів, оцінка показників надійності і міркування з надійності ергатичних систем. Такі відомості можуть бути використані для потенційно небезпечних виробничих об'єктів (атомна енергетика, хімічно небезпечні об'єкти, пожежонебезпечні об'єкти; підприємства вугільної промисловості, морські нафтовидобуваючі платформи, склади різних вибухонебезпечних речовин; великі лісні масиви; торф'яники, а також різноманітні трубопроводи). Опис цих проблемних питань, деякі з яких є важливими для України, і їх розробка наведено в інших розділах монографій з визначенням методів контролю, в тому числі неруйнівного.

Методи голографічної інтерферометрії в механіці неоднорідних тонкостінних конструкцій розглянуто в [8], де висловлено основні поняття теорії, методи і можливості голографічної інтерферометрії і висвітлено:

- два підходи до визначення деформацій поверхні, що не встановлені, з використанням голографічного метода усереднення за часом;
- модернізований муаровий метод аналізу інтерферограм трьохмірних полів переміщень і ефективний інженерний підхід до аналізу інтерферограм в задачах голографічного виявлення і оцінці неоднорідностей напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій;
- ряд нових методів для моделювання міцностних властивостей тонкостінних конструкцій з композитних матеріалів і підходи до виявлення власних коливань оболонково-пластинчатих систем і визначення остатнього НДС триплесних стекол.

В [8] наведено приклади застосування до оцінки складних задач деформування, НДС, коливань і руйнування неоднорідних конструкцій методів голографічної інтерферометрії.

Поєднання голографічного та акустико-емісійного діагностування для неоднорідних конструкцій і матеріалів висвітлено в [9]. В цій монографії викладено результати теоретико-експериментальних розробок засад методології голографічного й акусто-емісійного діагностування технічного стану неоднорідних елементів конструкцій і матеріалів, що використовуються у різних галузях техніки. Створено комплекс нових теоретичних положень, критеріїв, методик і засобів для досліджень і діагностування об'єктів різних галузей техніки, що знаходяться під дією механічних навантажень, теплових

полів і вібрації. Це має вирішальне значення для різних об'єктів аерокосмічної техніки, різних галузей енергетики.

Наведено приклади їх застосування для вирішення низки проблемних питань, що викликають теоретичний та практичний інтерес в галузі механіки неоднорідних конструкцій, верифікування й удосконалення математичних моделей, розроблених методик оцінювання міцності і ресурсу матеріалів і діагностування складних елементів конструкцій нової техніки та інженерних споруд. В монографії суттєва увага приділяється докладному висвітленню проєкційно-ітераційних схем числових методів, зокрема, найпоширенішому для розрахунку конструкцій різних галузей техніки методу скінчених елементів (також методу скінцевих різниць і методу локальних варіацій).

Ці питання докладніше проаналізовано в багатьох наукових статтях [23 – 25, 27, 29, 30, 32 – 36].

Колективна монографія [11] включає 10 статей, присвячених різноманітним питанням математичного і комп'ютерного моделювання інженерних систем. Серед авторів 8 докторів наук, з різних міст країни (Дніпро, Запоріжжя, Харків, Львів) (Гарт Е. Л., Гоменюк Е. І., Гребенюк С. М., Грищак В. З., Гудрамович В. С., Зайцев Б. П., Ткачук Н. А., Чопоров С. В.). В ній розглянуті питання аналітичного і комп'ютерного моделювання поведінки елементів конструкцій: НДС, стійкість, механіка контактних взаємодій. При числовому моделюванні використані схеми методів скінчених елементів, локальних варіацій.

Відмітимо міжнародні конференції, де приймали участь представники нашого інституту [12 – 14, 24, 26, 31, 36] [[12, 14] – JUTAM-Symposiums: Beijing, China; Bochum, Germany; [13] – Helsinki, Finland; [24] – Ашгабат, Туркменістан; [26] – Дніпро; [36] – Москва, МДУ- симпозіум проведено online].

Останні роки проводяться розробки методологічних основ міцності і надійності стартових комплексів для запуску ракет-носіїв з визначенням ресурсу [25, 27, 33], що дає для відділу зокрема додаткове фінансування.

Для країн з розвинутою ракетно-космічною технікою (РКТ) найважливішими спорудами для запуску космічних ракет-носіїв (РН), призначеними для виведення на навколоземну орбіту різних космічних апаратів є стартові комплекси (СК). Ці споруди піддаються багаторазовим впливам інтенсивних термомеханічних навантажень під час пуску РН, а при стартах, що не відбулися, до моменту початку транспортування зі стартової позиції. Основним для СК є місце розташування на землі (на поверхні або в шахті). Можливі варіанти розташування на морській платформі або на спеціальних літальних апаратах. Це призводить до особливостей і різного ступеня складності конструктивного оформлення СК, накладає обмеження на габарити, вибір матеріалу, призводить до різної номенклатури діючих навантажень та ін. Рішення різних питань надійної і довговічної роботи СК пов'язано з розглядом складних питань міцності і ресурсу.

Поняття ресурсу має різний зміст в залежності від призначення і відповідальності конструкцій галузей техніки, об'єкти яких розглядаються, особливостей конструкцій, матеріалу, з якого вони виготовлені, умов їх експлуатації та діючих навантажень та ін.

Під ресурсом СК можна розуміти критичний час роботи або кількість пусків за цей час, при яких в небезпечних зонах відповідальних несучих елементів СК досягаються задані граничні стани: неприпустимі пластичні дефор-

мації, утворення критичних тріщин різної фізичної природи, втрата стійкості, розвиток корозійних пошкоджень та ін. Аналіз багатьох аварійних ситуацій показує, що найбільш небезпечною є локалізація дефектів.

Різні аспекти проблеми ресурсу вивчені в багатьох роботах, де розглянуті загальні питання прогнозування ресурсу, довговічності і надійності (бібліографія приведена в [25, 27, 33]).

Для проєктування нових СК першорядне значення має створення нормативних засад розрахунку їх ресурсу. Рівень складності, що виникає при цьому, визначається станом розвитку РКТ і необхідністю вирішення нових завдань функціонування РН, пов'язаних з ускладненням умов їх експлуатації.

Для екстремальних термомеханічних навантажень, які характерні для експлуатації СК, необхідне застосування нелінійних пружнов'язкопластичних моделей деформування матеріалів (металів і їх сплавів, композиційних). Специфіка завдань прогнозування ресурсу і довговічності робить необхідним використання імовірнісних моделей при вирішенні питань, що розглядаються.

СК створені й успішно функціонують в різних країнах світу, де розвинена РКТ. Для різних країн вони мають свої особливості, виходячи з типу і потужності РН, особливостей їх експлуатації (розташування, номенклатура космічних об'єктів, рівень розвитку РКТ, завдань, які вирішуються при пусках та ін.). Різні питання, що виникають при створенні нормативних засад розрахунку ресурсу стартових споруд, пов'язані з розглядом спеціальних завдань міцності і ресурсу їх елементів і конструкцій РН. Розглянуто методологічні етапи розрахунку і дана класифікація термомеханічних навантажень на СК, що враховує особливості деформування при виникненні деформацій пластичності і повзучості. При виборі підходів, що визначають ресурс, використовується поняття мало і багато циклової втоми. При розробці нормативних основ розрахунку ресурсу доцільне використання сучасних методів технічної діагностики (зокрема, голографічної інтерферометрії і акустичної емісії) та створення швидкодіючих схем чисельних методів при оперативних розрахунках, пов'язаних з відпрацюванням проєктованих систем.

Опис технології виготовлення концентруючих систем, що розглядалися у доповіді на Міжнародній конференції в Туркменістані [24], висвітлено в [15] (всього за запрошенням Президії АН Туркменістану було 4 відрядження в Туркменістан – на міжнародні симпозиуми з пленарними доповідями, починаючи з 2009 р.).

Розроблені технології виготовлення концентраторів променевої енергії, методів розрахунку їх міцності і оптики лягли в основу трьох контрактів відділу з УНТЦ (1997, 2008, 2012 рр. – фінансування США і Канади).

Відзначимо, що числове моделювання пов'язано з розробками ефективних швидкодіючих проєкційно-ітераційних схем числових методів скінчених елементів і локальних варіацій, які суттєво скорочують комп'ютерний час розрахунків порівняно з традиційними вказаними методами і можуть бути ефективно використані при необхідності великого обсягу розрахунків, зокрема, при проєктуванні і відпрацюванні нових об'єктів аерокосмічної техніки і енергетики з використанням результатів експериментів, одержаних в процесі відпрацювання. Такі схеми висвітлено в [9, 19, 20, 23, 27, 30, 32 – 36].

В списку літератури наведено основні наукові публікації (монографії, статті) за період 1991 – 2021 рр.

В дослідженнях відділу прийняли участь Блажко В. А., Данієв Ю. Ф., Ноздріна О. С., Пошивалов В. П., Резниченко Л. В., Репринцев О. В., Самарська О. В., Телегіна І. І.

1. Гудрамович В. С., Деменков А. Ф. Упругопластические конструкции с несовершенствами формы и остаточными напряжениями К., 1991. 174 с.
2. Переверзев Е. С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности. К., 1995. 354 с.
3. Переверзев Е. С., Даниев Ю. Ф. Испытания и надежность технических систем. Днепропетровск, ИТМ НАНУ и ГКАУ, 1999. 223 с.
4. Гудрамович В. С. Теория ползучести и ее приложения к расчету элементов тонкостенных конструкций. К., 2005. 224 с.
5. Аксененко А. В., Гудрамович В. С., Дзюба А. П., Козлов А. К. Работоспособность оболочечных конструкций при локальном ударном нагружении. Днепропетровск, 2006. 216 с.
6. Даниев Ю. Ф., Бигус Г. А. Техническая диагностика опасных производственных объектов. М., 2010. 415 с.
7. Бигус Г. А., Даниев Ю. Ф., Быстрова Н. А., Галкин Д. И. Диагностика технических устройств. М., 2014. 616 с.
8. Гудрамович В. С., Дзюба А. П., Селиванов Ю. М. Методы голографической интерферометрии в механике неоднородных тонкостенных конструкций. Днепр, 2017. 288 с.
9. Гудрамович В. С., Скальський В. Р., Селіванов Ю. М. Голографічне та акустико-емісійне діагностування неоднорідних конструкцій і матеріалів. Львів, 2017. 488 с.
10. Бигус Г. А., Даниев Ю. Ф., Быстрова Н. А., Галкин Д. И. Основы диагностики технических устройств и сооружений. 2-е издание. М., 2018. 445 с.
11. Mathematical and computer modeling of engineering systems: Collective monograph. Ed. V. S. Hudramovich. Riga, Latvia, 2020. 164 p.
12. Hudramovich V. S. Plastic and creep instability of shells with initial imperfections. Solid mechanics and its applications. V. 64. Ed. G. M. L. Gladwell. Dordrecht, Boston, London, 1997. P. 277–289. https://doi.org/10.1007/0-306-46937-5_23
13. Hudramovich V. S., Lebedev A. A., Mossakovsky V. I. Plastic deformation and limit states of metal shell structures with initial shape imperfections. Light – weight steel and aluminium structures. Proceedings Jnt. Conf. (Helsinki, Finland, 1999). Ed. P. Makelainen. Amsterdam, Lousanne, New York, Tokyo, 1999. P. 257–263. <https://doi.org/10.1016/B978-008043014-0/50133-5>
14. Lebedev A. A., Kosarchuk V. V., Hudramovich V. S. Micro- and macrostructural mechanics of metastable steels. Solid Mechanics and its applications. V. 62. Ed. G.M.L. Gladwell. Dordrecht, Boston, London. 1999. P. 355–362.
15. Гудрамович В. С., Гайдученко А. П., Коваленко А. И. Технологии изготовления устройств антенно-волноводной техники и солнечной энергетики, основанные на методе электролитического формования. Космічна наука і технологія. 2001. Т. 7, № 2/3. С. 66–77. <https://doi.org/10.15407/knit2001.02.066>
16. Hudramovich V. S. Features of nonlinear deformation and critical states of shell systems with geometrical imperfections. Int. Appl. Mech. 2006. V. 42, No. 12. P. 1323–1355. <https://doi.org/10.1007/s10778-006-0204-y>
17. Hudramovich V. S., Demenkov A. F., Egorov E. A., Reprintsev A. V. On the influence of the technology of manufacturing on the load-bearing capacity of steel tanks. Strength of Materials. 2006. V. 38, No. 4. P. 423 – 427. <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0060-3>
18. Hudramovich V. S. Contact mechanics of shell structures under local loading. Int. Appl. Mech. 2009. V. 45, No. 7. P. 708–729. <https://doi.org/10.1007/s10778-009-0224-5>
19. Hudramovich V. S., Hart E. L., Ryabokon' S. A. Plastic deformation of nonhomogeneous plates. J. Math. Eng. 2013. V. 78, Iss. 1. P. 181–197. <https://doi.org/10.1007/s10665-010-9409-5>
20. Hudramovich V. S., Hart E. L., Klimenko D. V., Ryabokon' S. A. Mutual influence of openings on strength of shell-type structures under plastic deformation. Strength of Materials. 2013. V. 45, No. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11223-013-9426-5>
21. Пошивалов В. П., Борщевська Д. Г., Рябчий В. Д., Телегіна І. І. Підвищення довговічності сплаву АМг6М за рахунок енергетичної обробки в умовах повзучості. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2013. № 6. С. 62–67.
22. Hudramovich V. S., Levin V. M., Samarskaja E. V., Shabelnik S. V. Modeling of the deformation process of concrete based on a modified version of the theory of flow. Strength of Materials. 2014. V. 46, No. 5. P. 595–600. <https://doi.org/10.1007/s11223-014-9587-x>
23. Hart E. L., Hudramovich V. S. Projection-iterative schemes for the realization of the finite element method in problems of deformation of plates with holes and inclusions. Journ. of Mathematical Sci. 2014. V. 203, No. 1. P. 55–69. <https://doi.org/10.1007/s10958-014-2090-x>
24. Гудрамович В. С. Моделирование динамики и прочности концентрирующих систем солнечной энергии. Science, technology and innovative technologies in the prosperous epoch of powerful state. Матер. межд. науч. конф. (Ашгабат, Туркменистан, 2015). Ашгабат, «Үлүм». С. 148–149.
25. Дегтярев А. В., Пилипенко О. В., Гудрамович В. С., Даниев Ю. Ф. и др. О классификации стартового оборудования ракетно-космических комплексов при обосновании норм прочности. Космічна наука і технологія. 2016. Т. 22. № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.15407/knit2016.01.003>

26. *Hudramovich V.* Contact interactions and limit states of the shell-type structures under local loading. Proceedings of 2016 China-Ukraine Forum on Science and Technology. (Harbin, China, 2016). Harbin, 2016. P. 2–3.
27. *Гудрамович В. С., Репринцев А. В., Рябоконь С. А., Самарская Е. В.* Оценка ресурса конструкций ракетно-космической техники при учете влияния концентраторов напряжений в виде отверстий. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2016. № 2. С. 28–36. <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.02.03>
28. *Doyar I., Poshvalov V.* Development of a stochastic model of failure of structural materials in creep at hardening stage. Eastern-European Journ. of Enterprise Technologies. 2016. V. 3, No. 5 (81). P. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.69653>
29. *Gudramovich V. S., Gart E. L., Strunin K. A.* Modeling of the behavior of plane-deformable elastic media with elongated elliptic and rectangular inclusions. Materials Science. 2017. V. 52, No. 6. P. 768–774. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0020-z>
30. *Гудрамович В. С., Клименко Д. В., Гарт Э. Л.* Влияние вырезов на прочность цилиндрических отсеков ракет-носителей при неупругом деформировании материала. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23, № 6. С. 12–20. <https://doi.org/10.15407/knit2017.06.012>
31. Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій. Матер. міжн. наук.-техн. конф., присвяч. 100-річчю з дня народж. акад. В. І. Моссаковського. Гол. ред. *Поляков М. В.*, заступн. гол. ред. *Гудрамович В. С., Лобода В. В., Хамініч О. В.* Днепр, 2019. 340 с.
32. *Hart E. L., Hudramovich V. S.* Application of the projection-iterative scheme of the method of local variations to solving stability problems for thin-walled shell structures under localized actions. Strength of Materials. 2018. V. 50, No. 6. P. 852–858. <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00031-6>
33. *Hudramovich V. S., Sirenko V. N., Daniev Yu. F., Klimenko D. V., Hart E. L.* Development of the normative framework methodology for justifying the residual resource of starting buildings constructions of space launch vehicles. Strength of Materials. 2019. V. 51, No. 3. P. 333–340. <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00079-4>
34. *Hudramovich V. S., Hart E. L., Marchenko O. A.* Reinforcing inclusion effect on the stress concentration within the spherical shell having an elliptical opening under uniform internal pressure. Strength of Materials. 2020. V. 52, No. 6. P. 832–842. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00237-7>
35. *Hart E. L., Hudramovich V. S.* Projection-iterative schemes for the implementation of variation-grid methods in the problems of elastoplastic deformation of inhomogeneous thin-walled structures. Journ. of Mathematical Sci.. 2021. V. 254, No. 1. P. 21–38. <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05285-7>
36. *Гарт Э. Л., Гудрамович В. С.* К вопросу о применении проекционно-итерационных модификаций вариационно-сеточных методов к решению упругопластических задач механики конструктивно неоднородных систем. Упругость и неупругость. Матер. межд. науч. симпозиума по проблеме механики деформируемых тел, посв. 110-летию со дня рождения. А. А. Ильюшина. М., 2021. С. 226–234.

Отримано 07.06.2021,
в остаточному варіанті 09.06.2021