УДК 539.3:539.4:519.45:539.376

В. С. ГУДРАМОВИЧ, Ю. Ф. ДАНИЕВ, В. П. ПОШИВАЛОВ

НОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: office.itm@nas.gov.ua

Наведено короткий огляд досліджень, проведених в 2014 – 2018 рр. по науковому напрямку Інституту технічної механіки Національної академії наук України й Державного космічного агентства України, затвердженому Президією НАН України: міцність, надійність і оптимізація механічних систем, ракетносіїв і космічних апаратів. Узагальнено дослідження із впливу локальних навантажень і контактних взаємодій елементів конструкцій, що приводять до концентрації напружено-деформівного стану, появи зон пластичних деформацій і збільшення ризику руйнування при локалізованих впливах. Механізми руйнування, що визначають граничні навантаження й коефіцієнти запасу міцності, будуються при використанні схем ідеально-пластичного матеріалу. Розглянуто схеми прогнозування несучої здатності для тонкостінних конструкцій з урахуванням пластичних деформацій. Запропоновано проекційно-ітераційні схеми методу локальних варіацій, які дозволяють будувати ефективні розрахункові схеми, що зменшують комп'ютерний час розрахунку в порівнянні з розрахунком на основі звичайного методу локальних варіацій. Розглянуто питання моделювання динаміки й міцності концетруючих систем сонячної енергетики (КССЕ), а також дослідженнь з вібромiцності, міцності при локалізованих навантаженнях, тепломiцності КССЕ, впливу залишкових напружень, що утворяться в технологічних процесах, і розробки рецептур електроліту для цих процесів. Розроблено способи підвищення показників довговічності матеріалів за рахунок збудження в них самоорганізуючих процесів при енергетичному навантаженні полями різної фізичної природи. Розроблено нормативні основи розрахунку ресурсу конструкцій пускових установок ракет-носіїв. Визначено кількісні і якісні вимоги до надійності технічної системи і її окремих компонентів з умови їхнього забезпечення на стадії проектування й випробувань. Проаналізовано моделі надійності програмного забезпечення й особливості його відмов. Розглянуті основні підходи до забезпечення надійності програмного забезпечення й відзначено, що існуючі моделі повною мірою не дають можливості практичного застосування для оцінки надійності програмного забезпечення. Виявлено фактори, що впливають на кількість помилок програмного забезпечення, й фактори, що сприяють підвищенню його надійності, й запропоновано шляхи, що дозволяють підвищити надійність програмного забезпечення.

Приведен краткий обзор исследований, проведенных в 2014 – 2018 гг. по научному направлению Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, утвержденному Президиумом НАН Украины: прочность, надежность и оптимизация механических систем, ракет-носителей и космических аппаратов. Обобщены исследования по влиянию локальных нагрузок и контактных взаимодействий элементов конструкций, приводящих к концентрации напряженно-деформированного состояния, появлению зон пластических деформаций и увеличению риска разрушения при локализованных воздействиях. Механизмы разрушения, определяющие предельные нагрузки и коэффициенты запаса прочности, строятся при использовании схем идеально-пластического материала. Рассмотрены схемы прогнозирования несущей способности для тонкостенных конструкций с учетом пластических деформаций. Предложены проекционно-итерационные схемы метода локальных вариаций, позволяющие строить эффективные расчётные схемы, уменьшающие компьютерное время расчёта по сравнению с расчётом на основе обычного метода локальных вариаций. Рассмотрены вопросы моделирования динамики и прочности концентрирующих систем солнечной энергетики (КССЭ), а также исследования по вибропрочности, прочности при локализованных нагружениях, теплопрочности КССЭ, влияния остаточных напряжений, образующихся в технологических процессах, и разработок рецептур электролита для этих процессов. Разработаны способы повышения показателей долговечности материалов за счет возбуждения в них самоорганизующихся процессов при энергетическом нагружении полями различной физической природы. Разработаны нормативные основы расчета ресурса конструкций пусковых установок ракет-носителей. Определены количественные и качественные требования к надёжности технической системы и её отдельных компонентов из условия их обеспечения на стадии проектирования и испытаний. Проанализированы модели надежности программного обеспечения и особенности его отказов. Рассмотрены основные подходы к обеспечению надёжности программного обеспечения и отмечено, что существующие модели в полной мере не дают возможности практического применения для оценки надежности программного обеспечения. Выявлены факторы, влияющие на количество ошибок программного обеспечения, и факторы, способствующие повышению его надежности, и предложены пути, позволяющие повысить надежность программного обеспечения.

This paper briefly overviews the studies conducted in 2014 – 2018 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 approved by the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine: the strength, reliability and

optimization of mechanical systems, launch vehicles, and spacecraft. The paper generalizes investigations into the effect of local loads and contact interactions of structural components which result in stress and strain concentration and plastic deformation zones and increase the risk of failure under local actions. Failure mechanisms, which govern limiting loads and safety factors, are constructed using schemes of a perfectly plastic material. Carrying capacity prediction schemes for thin-walled structures are considered with account for plastic deformations. Projection iterative schemes of the local variation method, which reduce the computation time in comparison with the standard local variation method, are proposed. The paper considers solar concentrator dynamics and strength simulation issues and investigations into the vibration strength, local-loading strength, and thermal strength of solar concentrators and into the effect of residual stresses developed in production processes and electrolyte formulation for those processes. Methods were developed for increasing the longevity of materials by setting up self-organizing processes therein under energy loading with fields of different physical nature. Normative basics were developed for calculating the life of launch vehicle launching facility structures. Quantitative and qualitative requirements for the reliability of an engineering system and components thereof to be met at the design stage were identified. Software reliability models and failure features were analyzed. Basic approaches to software reliability assurance were analyzed, and it was pointed out that they cannot assess software reliability in full measure. Factors that affect the number of software errors and factors that contribute to software reliability improvement were revealed, and ways to improve software reliability were proposed.

Ключевые слова: *прочность, надежность, долговечность, технические системы, остаточный ресурс, проекционно-итерационные методы.*

Отдел прочности и надежности механических систем проводит исследования в рамках научного направления Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ) «Прочность, надежность и оптимизация механических систем, ракет-носителей и космических аппаратов», утвержденного Президиумом НАН Украины.

Укрупнённо эти исследования включают:

– моделирование поведения неоднородных тонкостенных оболочечно-пластинчато-стержневых систем и сплошных сред с концентраторами напряженно-деформированного состояния (НДС) в виде вырезов, подкреплений, включений различного вида и трещин с учётом вязко-упруго-пластических свойств материала и решение нелинейных задач деформирования и критических состояний;

– исследование надежности и долговечности сложных технических систем;

– разработку эффективных алгоритмов расчета, программного обеспечения;

– экспериментальные методы исследования НДС и технической диагностики неоднородных конструкций и материалов;

– разработку способов повышения показателей долговечности конструкционных материалов за счёт возбуждения в них самоорганизующихся процессов при энергетическом нагружении полями различной природы и силовых воздействиях.

Эти направления имеют прямой выход к важнейшему разделу прочности, надежности и долговечности механических систем, нормированию прочности и надежности технических систем и технологических процессов. К таким системам и процессам относятся, в первую очередь, ракетно-космическая техника (РКТ), авиастроение, энергетика, порошковая технология, производство композиционных и керамических материалов. Полученные в отделе результаты посвящены рассмотрению различных аспектов проблемы нормирования прочности и надежности.

Отличительной особенностью решения рассмотренных вопросов этой проблемы является рассмотрение НДС и критических состояний неоднород-

ных оболочечно-пластинчато-стержневых конструкций и сплошных сред, применение усложненных моделей нелинейного деформирования, использование быстродействующих проекционно-итерационных схем реализации численных методов, вероятностная постановка задач надежности и долговечности.

Проведенные в отделе исследования могут быть использованы при оптимизации конструкций РКТ, авиастроения, энергетики (в частности, концентрирующих систем лучистой энергии, атомной энергетики) и эффективных технологических процессов порошковой технологии, керамического производства, создания композиционных материалов.

Следуя приведенному списку литературы, кратко рассмотрим основные результаты, полученные в отделе по указанным направлениям. Список включает 2 монографии, 22 статьи, из них 12 в изданиях, которое входят в наукометрические базы данных (Web of Science [2, 30, 31, 33, 34] и Scopus), 8 – в материалы международных конференций.

Ряд исследований посвящён решению теоретических вопросов теорий пластичности и ползучести материалов. В [34] разработан вариант теории течения применительно к сложным неоднородным материалам, к которым относится, в частности, железобетон. В [29] отражены исследования по стохастическим моделям теории ползучести. В [15] обсуждены исследования по теории ползучести, проведенные в течение многих лет в ИТМ НАНУ и ГКАУ, в первую очередь это касается выпучивания оболочечных конструкций в условиях ползучести при учёте неоднородности структуры (наличие подкреплений) и влияния пластичности при сложных историях нагружения.

В [5] обсуждены исследования, проведенные в течение многих лет в ИТМ НАНУ и ГКАУ, по влиянию на НДС и предельные состояния элементов тонкостенных оболочечно-пластинчатых конструкций одного из основных проявлений неоднородности: отверстий-вырезов, в частности при учёте пластического деформирования материала. В [32] обобщены исследования по влиянию локальных нагрузок и контактных взаимодействий элементов конструкций, приводящих к концентрации НДС, появлению зон пластических деформаций и увеличению риска разрушения при локализованных воздействиях. Механизмы разрушения, определяющие предельные нагрузки и коэффициенты запаса, строятся при использовании схем идеально-пластического материала.

Разработка эффективных алгоритмов расчета связана, в первую очередь, с созданием проекционно-итерационных схем реализации численных методов, с разработкой и исследованием проекционно-итерационных схем реализации метода конечных элементов (МКЭ) и метода локальных вариаций (МЛВ), существенно уменьшающих компьютерное время расчёта.

Эти исследования применены при решении широкого класса задач НДС и устойчивости элементов тонкостенных неоднородных конструкций и отражены в [1 – 3, 5, 10, 13, 14, 16 – 18, 23, 26, 30, 31].

Улучшение вычислительной эффективности численных методов, которые используются при расчетах сложных конструкций указанных отраслей техники – актуальная задача компьютерной механики. Прежде всего это важно при необходимости проведения большого объема расчетных работ, связанных с проектированием и отработкой вновь создаваемых объектов. Это связано, в частности, с необходимостью введения изменения в конструктив-

ные элементы и геометрические параметры конструкций, физико-механические свойства материалов, что особо важно при высоких уровнях нагрузок, электромагнитных воздействиях; это приводит к возникновению пластических деформаций, изменению структурных особенностей строения материала и их физико-химических характеристик, инициирующих начало разрушения (появление трещин, пор или недопустимых деформаций, делающих невозможным дальнейшую эксплуатацию конструкций). Указанная необходимость связана с проведением большого числа экспериментов, что зачастую является неотъемлемой частью отработки конструкций, в частности РКТ, и корректируют изменения геометрии и, при необходимости, осуществление замены материала (важной является при этом необходимость применения импортозаменяющих материалов).

Использование при расчетах лицензированных пакетов программ (в первую очередь для широко применяемого вариационно-сеточного метода конечных элементов (МКЭ)) имеет известные и часто трудно преодолимые особенности. К ним относится значительная дороговизна при покупке и обслуживании таких пакетов, необходимость покупки дополнительных модулей, учитывающих усложненные особенности деформирования при эксплуатации (учёт вязко-упруго-пластических свойств материала, особенностей его поведения при воздействиях различных физических полей и др.), значительные затраты времени на подготовку конечно-элементных моделей для последующего расчета. Программы по сути являются «черным ящиком»: определены начальные и конечные этапы расчета, отсутствует возможность прослеживать и по возможности корректировать промежуточные этапы. Это делает для многих задач прочностного расчета актуальным разработку собственных программ (при этом должно быть проверено совпадение результатов расчёта на основе этих и лицензированных программ на тестовых задачах), существенно уменьшающих компьютерное время расчёта.

Такие принципы расчёта разрабатываются на основе проекционно-итерационных схем реализации МКЭ, метода конечных разностей, метода локальных вариаций (МЛВ). В основе их лежат идеи, изложенные в трудах выдающихся ученых-математиков (Л. В. Канторович, Г. И. Марчук, А. А. Самарский, Ф. Л. Черноусько, В. В. Шандуров, В. Хакбуш и др). Обширная библиография приведена в цитированных в этой статье работах, посвящённых разработке соответствующих схем МКЭ и МЛВ.

Наиболее эффективно использование этих расчетных схем в механике неоднородных конструкций (наличие вырезов, подкреплений различного вида, являющихся концентраторами НДС) (это важно для прочностного расчета НДС и несущей способности тонкостенных оболочечно-пластинчатых конструкций различных отраслей техники); при расчетах НДС сред в процессах порошковой технологии, керамического производства, создания композиционных структур конструкций (наличие включений, нарушений сплошности различного вида (протяжённые эллипсоидальные и прямоугольные включения, трещины различной ориентации друг относительно друга, поры, которые также являются концентраторами НДС)).

Учет пластических деформаций позволяет учитывать взаимное влияние указанных концентраторов НДС и определять возможные очаги начала разрушения элементов конструкций или технологических рабочих сред в порошковой технологии, при создании керамических и композиционных структур.

При расчетах, учитывающих пластические деформации, уравнения, определяющее НДС, существенно нелинейны. При их линеаризации применяются методы упругих решений (переменных параметров упругости, дополнительных нагрузок и деформаций). Разработка и исследование их связаны с именами А. А. Ильюшина, А. И. Биргера, Д. В. Быкова и др. При этом уравнения неупругого деформирования заменяются уравнениями теории упругости с введением параметров, учитывающих пластические деформации (переменные параметры упругости, дополнительные нагрузки и деформации), зависящих от уровня накопленных пластических деформаций. При численной реализации строятся схемы последовательных приближений, когда расчеты проводятся поэтапно до совпадения с заданной точностью результатов расчета для двух соседних приближений. В ряде задач целесообразно использование вариационных методов (В. Койтер, Л. М. Качанов и др).

Поясним использование нами выше термина «концентрация НДС» вместо традиционного «концентрация напряжений» (КН) (Г. Н. Савин). Это связано с необходимостью учета реальной диаграммы деформирования. Рассмотрим типичную диаграмму $\sigma_i - \varepsilon_i$ алюминиевых сплавов. Отношение предела прочности $\sigma_в$ к условному пределу текучести $\sigma_s = \sigma_{02}$, определяющему начало пластического деформирования ~ 1,6, в то время как отношение деформации, определяющей разрушение, к ε_s $[\varepsilon]/\varepsilon_s$ может быть больше 10. Полученное Киршем (1898) решение задачи теории упругости для пластины с круглым отверстием, нагруженной напряжением σ, дает коэффициент КН, равный 3, а решения Г. В. Колосова (1909) и К. Инглиса (1913) для пластины с эллиптическим отверстием, полученные независимо, коэффициент КН, равный (1+2а/в) (а и в – большая и малая оси эллипса). Верхняя граница диапазона напряжений σ, для которых справедливы указанные решения: для круглого отверстия $\sigma_s/3$, для эллиптического $\sigma_s/(1+2а/в)$. Реальные значения σ значительно выше. Таким образом использование термина «концентрация НДС» более соответствует реальному поведению материалов, обладающих выраженными пластическими свойствами.

Учет пластических деформаций, возникающих при высоких уровнях нагрузок, позволяет определить взаимное влияние концентраторов НДС (для оболочечно-пластинчатых элементов конструкций – отверстия-вырезы, подкрепления, для сплошных сред – включения, поры, трещины).

Такое взаимное влияние дает возможность рассмотреть схемы прогнозирования несущей способности для тонкостенных конструкций. В местах концентрации НДС возникают зоны пластических деформаций. Их дальнейшая трансформация и слияние при увеличении нагрузки приводит к уменьшению жесткости элементов конструкции, в выражения для которых вместо модуля упругости Е следует включить касательный или секущий модули (или их комбинации), меньшие Е. Это ослабляет сопротивляемость элементов конструкций действию нагрузок и приводит к уменьшению разрушающих нагрузок, определяющих несущую способность.

Указанные схемы реализованы применительно к оболочечным конструкциям РКТ [3, 23, 26] и использованы в работах по теме «Ресурс» (проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций РКТ) и в совместных работах ИТМ НАНУ и ГКАУ и Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля». Различные аспекты изучения пластического деформирования и взаимного влияния концентраторов НДС (отвер-

стий, подкреплений, пор, трещин, включений) для оболочечно-пластинчатых элементов конструкции и сред в технологических процессах, указанных выше, описаны в [3, 4, 6, 9, 10, 13, 14, 17, 18, 23, 25, 26, 30, 33]. Отметим, что такие исследования для сплошных сред в технологических процессах позволяют изучить сочетание физико-механических свойств материалов, размеров и взаимного расположения концентраторов НДС, определяющих очаги разрушения.

Отметим, что исследования НДС элементов сложных неоднородных тонкостенных конструкций и сред с концентраторами напряжений в [4, 6, 9, 13, 18, 30, 33] изучены также с использованием лицензированных пакетов прикладных программ МКЭ.

Построение проекционно-итерационных схем МЛВ – численного метода решения вариационных задач – позволяет построить эффективные расчётные схемы, уменьшающие компьютерное время расчёта по сравнению с расчётом на основе обычного МЛВ [2, 5, 19, 31], который используется при изучении задач устойчивости оболочечных конструкций при локализованных нагружениях.

Большое внимание уделено в работах отдела разработке экспериментальных методов диагностики неоднородных конструкций и материалов на основе метода голографической интерферометрии, отраженных в монографиях [7, 11] (в них указана соответствующая библиография), статье [8].

В [12] отражены вопросы моделирования динамики и прочности концентрирующих систем солнечной энергетики (КССЭ), разработанных в отделе на основе безотходных схем метода электролитического формования (основное их применение – фотоэнергетика с использованием высокоэффективных фотоэлементов, преобразующих солнечную энергию в электрическую (в частности, использование для получения фотоэлектричества в космических аппаратах), солнечные печи для изготовления высокочистых материалов, устройство для производства тепла). Отражены исследования по вибропрочности, прочности при локализованных нагружениях, теплопрочности КССЭ, влиянию остаточных напряжений, образующихся в технологических процессах, и разработкам рецептур электролита для этих процессов.

В отделе разработаны способы повышения показателей долговечности материалов за счет возбуждения в них самоорганизующих процессов при энергетическом нагружении полями различной физической природы.

Создание сложных технических систем, таких как ракетно-космические комплексы (РКК), требует больших сроков и затрат на их разработку. Классификация оборудования является одним из наиболее эффективных практических инструментов сокращения затрат, средств и времени на создание РКК. Для стартового оборудования РКК классификация по различным признакам способствует более успешному решению задач назначения норм прочности (установление требований, необходимых для выдачи обоснованного заключения о прочности и соответствующих сертификатов для конкретных изделий, так как для них имеются различия в условиях эксплуатации с точки зрения механических, тепловых и климатических воздействий). Таким образом, для создания нового и модернизации существующего стартового оборудования целесообразна разработка подходов к классификации оборудования РКК. В [24] предложен подход к классификации стартового оборудования РКК при обосновании норм прочности на основе использования иерархического

метода. Рассмотрено прогнозирование нагрузок, возникающих при эксплуатации элементов конструкций стартового комплекса. Вопросы разработки нормативных основ расчета ресурса конструкций пусковых установок ракетносителей излагаются в [22, 28].

Наряду с нормами прочности, которые устанавливают требования, необходимые для выдачи обоснованного заключения о прочности, нормирование надёжности определяет количественные и качественные требования к надёжности всей системы и её отдельных компонентов из условия их обеспечения на стадии проектирования и испытаний.

Решение проблемы обеспечения надёжности технических систем, которая включает и задачу нормирования надежности, в известной мере определяется уровнем разработки моделей и методов оценки их ресурса.

В [19] рассмотрены вероятностные модели среднего остаточного ресурса технических систем с резервированием. Получены выражения для среднего остаточного ресурса технических систем с резервированием при экспоненциальном распределении наработки до отказа и показан рост интенсивности отказов таких систем с течением времени, хотя интенсивность отказов нерезервированной системы от времени не зависит, из чего следует, что наступает такой момент времени, после которого использование резервированной системы не является оправданным.

Эргатические системы (ЭС) составляют значительную часть промышленного и иного оборудования, в частности объектов авиации, ракетно-космической отрасли, железнодорожного транспорта, атомной энергетики, предприятий металлурги и т. д. Обеспечение безотказности функционирования здесь практически всегда связано с обеспечением безопасности функционирования основных систем: технической системы, человека-оператора и программного обеспечения. Нарушение работоспособности любой из входящих в ЭС системы может приводить и приводит к негативным последствиям, порой и катастрофическим. Успешное решение этих задач выдвигает на первый план обеспечение надёжности этих систем. В [20] рассмотрены общие принципы обеспечения надёжности ЭС и отмечено, что рост интенсивности труда операторов требует разработки новых подходов к обеспечению надёжности человека-оператора. В [27] рассмотрены модели и представлен анализ подходов обеспечения надежности программной составляющей ЭС. Проанализированы модели надежности программного обеспечения и особенности его отказов. Рассмотрены основные подходы к обеспечению надёжности программного обеспечения и отмечено, что они в полной мере не дают возможности практического применения для оценки надежности программного обеспечения. Выявлены факторы, влияющие на количество ошибок программного обеспечения, факторы, способствующие повышению его надежности, и предложены пути, позволяющие повысить надежность программного обеспечения. В качестве основных показателей надежности программного обеспечения ЭС предлагается использовать функцию надежности и среднее время между отказами.

В [21] рассмотрен системный подход к обеспечению надёжности и предложены основные принципы современной методологии обеспечения надежности сложных систем на всех этапах жизненного цикла. Отмечена перспективность использования метода активного резервирования с перестраиваемым восстанавливающим элементом в задачах обеспечения надежности.

В проведении исследований, результаты которых отражены в статье, принимали участие профессора ДНУ Э. Л. Гарт, А. П. Дзюба, научные сотрудники отдела В. А. Блажко, И. А. Дояр, Л. В. Резниченко, А. В. Репринцев, Е. В. Самарская, И. И. Телегина.

1. *Гарт Е., Гудрамович В.* Проекційно-ітераційний варіант методу локальних варіацій та його застосування до задач стійкості оболонкових конструкцій при локалізованих навантаженнях. Сучасні проблеми механіки та математики: збірник наукових праць у 3-х т. ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України. 2018. Т. 1. С. 28–29. URL: www.iapmm.lviv.ua/mpmm2018 (дата звернення: 02.09.2018).
2. *Гарт Э. Л., Гудрамович В. С.* Проекционно-итерационная модификация метода локальных вариаций для задач с квадратичным функционалом. Прикл. математика и механика. 2016. Т. 80. Вып. 2. С. 218–229.
3. *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. 23. № 6. С. 12–20.
4. *Гудрамович В. С., Гарт Э. Л., Струнин К. А.* Влияние локальных дискретных подкреплений и включений, моделирующих изменения в микроструктуре материала, на прочность элементов корпусов двигателей. XXIII Міжн. конгресс двигунобудівників (3–8 вересня 2018, с.м.т. Коблево, Миколаївська область). Харків, 2018. С. 26.
5. *Гудрамович В. С.* Влияние отверстий на предельные состояния элементов тонкостенных металлических оболочечно-пластинчатых конструкций. Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер. Механіка. 2014. Вип. 18. Т. 22. С. 47–60.
6. *Гудрамович В. С., Гарт Е. Л., Марченко О. А.* Вплив форми підкріплень на напружено-деформований стан циліндричної оболонки з видовженими прямокутними отворами. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. Дніпро: Ліра, 2017. Вип. 27. С. 52–64.
7. *Гудрамович В. С., Скальський В. Р., Селіванов Ю. М.* Голографічне та акустико-емісійне діагностування неоднорідних конструкцій і матеріалів: монографія / за ред. акад. НАНУ З. Т. Назарчука. Львів: Простір-М, 2017. 492 с.
8. *Гудрамович В. С., Дзюба А. П., Селиванов Ю. М.* К методологии поиска рационального распределения материала тонкостенных элементов конструкций. Техническая механика. 2016. № 3. С. 7–16.
9. *Гудрамович В. С., Гарт Э. Л., Струнин К. А.* Компьютерное моделирование поведения упругой среды с двумя сопряженными эллипсообразными включениями. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. Дніпро: Ліра, 2017. Вип. 26. С. 42–50.
10. *Гудрамович В. С., Гарт Э. Л.* Конечно-элементный анализ процесса рассеянного разрушения плоскодеформированных упругопластических сред с локальными концентраторами напряжений. Упругость и неупругость: Межд. науч. симп. по проблемам мех. деформ. тел, посв. 105-летию со дня рожд. А. А. Ильюшина (январь, 2016 г., Москва, Россия). М.: Изд. МГУ, 2016. С. 158–161.
11. *Гудрамович В. С., Дзюба А. П., Селиванов Ю. М.* Методы голографической интерферометрии в механике неоднородных тонкостенных конструкций: монография. Днепр: Лира, 2017. 288 с.
12. *Гудрамович В. С.* Моделирование динамики и прочности концентрирующих систем солнечной энергии. Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья: Международн. науч. конф. (2015 г., Ашхабад, Туркменистан). Т. 1. С. 148–149.
13. *Гудрамович В. С., Гарт Э. Л., Струнин К. А.* Моделирование процесса деформирования пластины с упругими протяженными включениями на основе метода конечных элементов. Техническая механика. 2014. № 2. С. 12–23.
14. *Гудрамович В. С., Гарт Е. Л., Рябоконь С. А.* Моделювання та дослідження впливу підкріплень прямокутних отворів на напружено-деформований стан пластини. Математичні проблеми механіки неоднорідних структур: IX Міжн. наук. конф. (вересень 2014 р., Львів, Україна). Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАНУ, 2014. С. 43–46.
15. *Гудрамович В. С.* Об исследованиях в области теории ползучести в Институте технической механики НАН Украины и ГКА Украины. Техническая механика. 2015. № 4. С. 85–91.
16. *Гудрамович В. С., Гарт Е. Л.* Проекционно-итерационная модификация метода локальных вариаций для задач локальной устойчивости сферических оболочек. Доп. НАН України. 2015. № 8. С. 35–42.
17. *Гудрамович В. С., Гарт Е. Л.* Скінченно-елементні схеми аналізу процесу розсіяного руйнування пружно-пластичних тіл з локальними концентраторами напружень. Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: 5 міжнарод. конф. (червень 2014 р., Львів, Україна). Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 2014. С. 39–42.
18. *Гудрамович В., Гарт Е., Струнін К.* Числовий аналіз напружено-деформівного стану плоских середовищ з протяжними включеннями різної жорсткості. Сучасні проблеми термомеханіки. К.:ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАНУ, 2016. С. 78–79.
19. *Даниев Ю. Ф., Пошивалов В. П., Резниченко Л. В.* Вероятностные модели среднего остаточного ресурса технических систем. Системні технології: Регіональний міжвуз. сб. наук. праць. Дніпро: Нац. металургійна акад. України, 2018. Вип. 2 (115). С. 53–60.

20. *Даниев Ю. Ф., Пошивалов В. П., Резниченко Л. В.* Общие принципы обеспечения надежности эргатических систем. Системні технології: регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпро: Національна металургійна академія України, 2014. Вип. 1 (90). С. 121–127.
21. *Даниев Ю. Ф., Пошивалов В. П., Резниченко Л. В.* Системный подход к обеспечению надёжности сложных систем. Системні технології: регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпро: Нац. металургійна акад. України, 2017. Вип. 2 (109). С. 27–34.
22. *Гудрамович В., Пошивалов В., Данієв Ю., Резниченко Л.* Імовірнісні підходи при прогнозуванні ресурсу конструкцій на етапі проектування. Сучасні проблеми механіки та математики: зб. наук. праць у 3-х т. Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2018. Т. 2. С. 177–178. URL: www.iapmm.lviv.ua/mpmm2018 (дата звернення: 02.09.2018).
23. *Гудрамович В. С., Репринцев А. В., Рябоконь С. А., Самарская Е. В.* Методология оценки ресурса оболочечных конструкций ракетно-космической техники с учетом влияния концентраторов напряжений в виде отверстий-вырезов. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: зб. наук. ст. К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2015. С. 83–95.
24. *Дегтярев А. В., Пилипенко О. В., Гудрамович В. С., Сиренко В. Н., Даниев Ю. Ф., Клименко Д. В., Пошивалов В. П.* О классификации стартового оборудования ракетно-космических комплексов при обосновании норм прочности. Космічна наука і технологія. 2016. Т. 22. № 1. С. 3–14.
25. *Гудрамович В. С., Пошивалов В. П., Даниев Ю. Ф., Резниченко Л. В., Самарская Е. В., Телегина И. И.* О подходах к нормированию прочности конструкций. Математические проблемы технической механики – 2017: межд. науч. конф. (апрель, 2017, Днепр). Днепр, Каменское, 2017. С. 5.
26. *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.
27. *Пошивалов В. П., Даниев Ю. Ф.* О моделях надежности программного обеспечения эргатических ситем. Техническая механика. 2017. № 4. С. 84–95.
28. *Гудрамович В. С., Сиренко В. Н., Даниев Ю. Ф., Пошивалов В. П., Клименко Д. В.* Разработка нормативных основ расчета ресурса конструкций пусковых установок ракет-носителей. Динамика, прочность и моделирование в машиностроении: I Межд. научн.-техн. конф. (10 – 14 сентября 2018 г., Харьков, Украина). С. 25.
29. *Doyar I., Poshyvalov V.* Development of a stochastic model of failure of structural material in creep at hardening stage. Eastern-European Journ. of Enterprise Technologies. 2016. № 3 (5). P. 25–31.
30. *Hart E. L, Hudramovych V. S.* Projection-iterative schemes for implementation of the finite element method in problems of deformation of plates with holes and inclusions. J. of Math. Sci. 2014. V. 175. No. 2. P. 1–14.
31. *Hart E. L, Hudramovych V. S.* Projection-iterative modification of the method of local variations for problems with a quadratic functional. J. Appl. Math. Mech. 2016. V. 80. Iss. 2. P. 156–163.
32. *Hudramovych V.* Contact interactions and limit states of the shell-type structures under local loading. Proceedings of 2016 China-Ukraine Forum on Science and Technology (July, 2016, Harbin, China). Harbin, 2016. P. 2–3.
33. *Hudramovych V. S., Hart 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.
34. *Hudramovych 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. Issue 5. P. 595–600.

Получено 13.09.2018,
в окончательном варианте 01.10.2018