

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Приведен краткий обзор основных результатов исследований, проведенных в 2009 – 2013 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. Внимание уделено вопросам исследования прочности, разработки и обобщения энерго- и ресурсосберегающих технологий изготовления тонкостенных конструкций антенно-волноводной техники, концентраторов солнечной энергии и разработки эффективных вычислительных схем конечно-элементного анализа тел и тонкостенных конструкций с локальными концентраторами напряжений: вырезами, порами, трещинами, включениями при упругопластическом деформировании материала.

Приведено короткий огляд основних результатів досліджень, проведених у 2009 – 2013 рр. з наукового напрямку Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, затвердженого Президією НАН України: міцність, надійність і оптимізація механічних систем, ракет-носіїв і космічних апаратів. Увагу приділено питанням дослідження міцності, розробки і узагальнення енерго- і ресурсозберігаючих технологій виготовлення тонкостінних конструкцій антенно-хвильоводної техніки, концентраторів сонячної енергії і розробки ефективних обчислювальних схем скінченно-елементного аналізу тіл і тонкостінних конструкцій з локальними концентраторами напружень: вирезами, порами, тріщинами, включеннями при пружно-пластичному деформуванні матеріалу.

The main results of research on the scientific line of the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science and the State Space Agency of Ukraine, approved by the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine, during 2009 – 2013 are briefly surveyed including the strength, the reliability and the optimization of mechanical systems, launch vehicles and spacecraft. Attention is paid to the strength studies, the development and generalization of energy- and resource - saving technologies for manufacturing thin-walled structures of the antenna-waveguide technology and solar concentrators as well the development of the efficient computational schemes of finite-element analysis of bodies and thin-walled structures with local stress concentrators: cuts, pores, cracks, inclusions under elastoplastic material straining.

В рамках научного направления Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины «Прочность, надежность и оптимизация механических систем, ракет-носителей и космических аппаратов», утвержденного Президиумом НАН Украины, в отделе прочности, динамики и технологии изготовления конструкций института проводится цикл исследований в области прочности, динамики и оптимизации оболочечных тонкостенных неоднородных конструкций ряда приоритетных отраслей техники. Эти исследования включают моделирование напряженно-деформированного состояния в ряде экстремальных случаев эксплуатации, разработку эффективных алгоритмов решения нелинейных задач деформирования и критических (предельных) состояний (устойчивость, несущая способность).

Известно, что оболочечные конструкции, оптимальным образом сочетая минимальный вес и необходимую прочность и жесткость, являются основными в важнейших отраслях техники: аэрокосмической, энергетике и др. Именно для таких конструкций, зачастую сложной неоднородной структуры, актуальным является разработка эффективных методов решения многочисленных задач деформирования и критических состояний. Основной целью соответствующих исследований является недопустимость разрушения или появления повреждений, делающих невозможной дальнейшую эксплуатацию конструкций.

К наиболее важным направлениям исследований, которые на протяжении многих лет успешно развиваются в нашем институте, можно отнести:

© В. С. Гудрамович, 2013

- нелинейное деформирование, критические состояния и оптимизацию тонкостенных оболочечно-стержневых конструкций;
- механику контактных взаимодействий элементов конструкций между собой и с основаниями, поведение которых описывается различными моделями;
- анализ и моделирование влияния повреждений, связанных с воздействием разных физических полей, в том числе агрессивных сред, на поведение конструкций;
- разработку эффективных методов решения и алгоритмов расчета задач напряженно-деформированного и критических состояний элементов конструкций для вышеуказанных направлений;
- проведение экспериментальных исследований на моделях и элементах реальных конструкций.

В течение многих лет в отделе проводятся работы по созданию эффективных технологий изготовления устройств антенно-волноводной техники и концентрирующих систем, основанных на методе электролитического формования, и решению задач прочности, характерных для их эксплуатации. Такие технологии с успехом могут использоваться в космической технике, радиоастрономии, солнечной энергетике. На основе разработанных технологических процессов были изготовлены многие объекты указанных направлений для ряда предприятий и научно-исследовательских организаций Украины и России.

Приведем кратко основные результаты исследований, основная часть которых, в частности, вошла в опубликованные в Киеве в 2009 – 2012 гг. Президиумом НАН Украины ежегодные отчеты о научной деятельности НАН Украины. Эти результаты охватывают направления научной деятельности отдела.

- На основе разработанных математических моделей и методик определена нагруженность и несущая способность элементов оболочечных конструкций ракетно-космической техники и резервуаров для хранения нефтепродуктов.

- Проведено численное моделирование коррозионной деградации элементов оболочечно-стержневых конструкций (применительно к наземным комплексам ракетно-космической техники).

- Получены уравнения и разработаны алгоритмы их численной реализации для определения напряженно-деформированного состояния неоднородных оболочечно-стержневых конструкций, находящихся в условиях общего действия силовых нагрузок и влияния дефектов, связанных с коррозионным износом поверхности.

- Построены условия оптимальности и алгоритм численной реализации решения задач оптимального проектирования указанных конструкций с использованием методов теории оптимальных процессов.

- На основе разработанных методик и алгоритмов проведены численные расчеты процессов деформирования элементов тонкостенных конструкций цилиндрических резервуаров для нефтепродуктов с учетом эксплуатационных и технологических повреждений, антенно-фидерных устройств с учетом влияния остаточных напряжений, возникающих при изготовлении. Исследовано влияние истории нагружения на величину критических усилий и особенности закритического поведения стержневых элементов при наличии не-

совершенство формы и изменения жесткости; расчеты показывают заметное влияние истории нагружения (конфигурации кривых нагружения) на несущую способность подкрепляющих стержневых элементов.

– Разработан технологический процесс изготовления экспериментальных образцов тонкостенного малого параболического рефлектора (антенна или концентратор солнечной энергии) и рупорной антенны с вращенными ребрами, формирующими диаграмму направленности, из осажденного никеля на основе метода электролитического формования; проведена оценка влияния силы тока, температурного режима и блескообразующих добавок на качество отражающей поверхности; разработана рецептура электролитов, дающих минимальные остаточные напряжения.

– Разработаны методы и средства замера остаточных напряжений и исследовано их влияние на эксплуатационные характеристики зеркальных антенн различного назначения и других объектов антенно-фидерной техники, которые изготовлены на основе разработанных технологических процессов, что дает возможность оценивать их работоспособность.

– Проведено численное моделирование упруго-пластического напряженно-деформированного состояния неоднородных конструкций, которые имеют вырезы разной формы, на основе проекционных схем конечно-элементного анализа, которые дают существенную экономию времени компьютерного расчета сравнительно с традиционными методами такого анализа для объектов ракетно-космической техники и теплоэнергетики.

– Показана эффективность разработанных проекционно-итерационных схем реализации метода конечных элементов при использовании треугольных и четырехугольных лагранжевых конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния пластинчатых элементов с отверстиями, которые моделируют элементы конструкций с повреждениями.

Дадим более расширенную характеристику двух направлений исследований.

1. Обобщены проводимые в течение ряда лет исследования по разработке эффективных методов решения задач напряженно-деформированного состояния и несущей способности элементов тонкостенных конструкций устройств антенно-волноводной техники (АВТ) и концентрирующих систем солнечной энергетики (КССЭ) и созданию энерго- и ресурсосберегающих технологий изготовления тонкостенных конструкций АВТ и КССЭ сложной формы минимального веса. Соответствующие исследования по прочности включают разработки в следующих направлениях:

- контактная прочность элементов конструкций АВТ и КССЭ;
- прочность оболочек АВТ и КССЭ при температурных воздействиях;
- влияние на прочность элементов АВТ и КССЭ остаточных напряжений, полученных при электроосаждении;
- динамика КССЭ при вибрационных воздействиях;
- прочность двухслойных элементов, изготовленных из металла (тонкая отражающая поверхность), скрепленного с компаундом (подкрепляющий слой), по технологии, разработанной в отделе, параболического коллимационного зеркала наземного антенного полигона для исследования и отработки антенных систем космических аппаратов.

Суть вышеуказанных технологий – в комплексном использовании метода электролитического формования (кристаллизация металла из перенасыщен-

ного прикатодного слоя электролита при действии электрического тока). Поверхность полученного осадка – точная копия поверхности катода-матрицы. Основными преимуществами являются высокая точность изготовления, однородность структуры материала осадка, возможность изготовления объектов АВТ и КССЭ тонкостенной структуры и сложной формы, которые не могут быть изготовлены на основе других технологий, обеспечение необходимой жесткости и долговечности при малой массе. Составлена технологическая документация на оборудование, маршрутные карты технологических процессов.

По сути дела, мы имеем на данный момент пакет документов для дальнейшей кооперации и инвестиций. Надо отметить, что эти разработки заинтересовали ряд организаций из разных стран.

В 2009 – 2013 гг. заведующий отделом четырежды приглашался Президиумом Академии наук Туркменистана для участия в международных научных конференциях и выставках с докладами, посвященными разработке концентраторов солнечной энергии и решению вопросов их динамики и прочности. На международном научном форуме в Ашхабаде в июне 2013 г., где участвовало 35 стран, наш доклад от Украины «Энерго- и ресурсосберегающие технологии изготовления концентраторов солнечной энергетики» (на форуме присутствовала делегация НАН Украины) был поставлен на Пленарном заседании при открытии конференции (совместно с 4 докладами известных ученых России, Белоруссии, США и Японии).

По решению Президиума НАН Украины ИТМ НАН Украины и ГКА Украины определен ответственным исполнителем проекта «Создание эффективных технологий изготовления, динамика и прочность, математическое моделирование концентрирующих систем солнечной энергетики» совместно с институтами АН Туркменистана: «Гюн», физики и математики, который является частью Программы сотрудничества между НАН Украины и АН Туркменистана, утвержденной Президентами НАН Украины и АН Туркменистана в 2011 г. Отдел ведет этот проект.

2. В последние годы в отделе проводятся исследования в области разработки проекционно-итерационных схем реализации вариационно-сеточного метода конечных элементов (МКЭ). Такие вычислительные схемы для вариационных методов и метода конечных разностей исследованы в трудах известных ученых-математиков (Л. В. Канторович, Г. И. Марчук, А. А. Самарский, В. В. Шайдуров, W. Hackbush, R. Kluge и др.); они позволяют существенно (в десятки раз) уменьшить компьютерное время расчета.

Основная идея таких схем следующая. При применении МКЭ элементы конструкций разбиваются на конечные элементы. Проводится достаточно грубое разбиение области. Дискретизированная вариационная задача (система линейных алгебраических уравнений) решается с помощью итерационных методов, но не до конца (строится лишь несколько приближений к решению). Последнее приближение интерполируется на более мелкую сетку. Вычисления продолжают до достижения заданной точности между соседними приближениями. Этот алгоритм позволяет существенно ускорить процесс получения решения по сравнению с традиционным МКЭ на одной (мелкой) сетке, т. к. расчет на грубых сетках во много раз быстрее.

Элементы конструкции обычно разбиваются на прямоугольные или треугольные конечные элементы. Применение треугольных более эффективно в

задачах локальной концентрации напряжений, но требует большего времени расчета. Оптимально сочетание этих элементов. Для повышения точности решения целесообразно использование адаптивных сеток.

Проекционно-итерационные схемы МКЭ успешно применены к краевым задачам теории упругости, задачам напряженно-деформированного состояния пластин и оболочек с вырезами различной формы, плоским задачам деформирования структурированных сред, содержащих ансамбли локальных концентраторов напряжений: пор, трещин, включений.

При пластическом деформировании материала строится серия последовательных приближений, для каждого из которых решается неоднородная задача теории упругости (идея А. А. Ильюшина), и применяются проекционно-итерационные схемы МКЭ. Достоверность разработанных методов расчета подтверждается сравнением с результатами расчетов на основе других методов, сравнением решений тестовых задач с результатами, полученными с использованием лицензионных программ, с экспериментальными данными.

Исследование динамики процесса образования и трансформации зон пластических деформаций, образующихся в областях концентрации напряжений, и их взаимного влияния может быть использовано при прогнозировании несущей способности элементов тонкостенных оболочечных конструкций (появление и последующее слияние таких зон приводит к снижению жесткости и уменьшению сопротивляемости конструкций действию внешних нагрузок).

Отметим, что разработка таких расчетных схем является важной в связи с особенностями использования пакетов лицензионных программ, такими как значительная дороговизна, необходимость докупки дополнительных модулей при решении сложных задач деформирования (учет ползучести, пластичности, вязкоупругости), значительные затраты времени при подготовке конечно-элементных моделей для последующего расчета. Программы, по сути дела, являются «черным ящиком»: определены начальные и конечные этапы расчета, отсутствует возможность проследивать и по возможности корректировать промежуточные этапы. Это делает для многих задач прочностного расчета актуальной разработку собственных программ, особенно при необходимости проведения большого числа расчетов, что важно на разных этапах проектировочных расчетов и отработки объектов ракетно-космической техники. При этом важна существенная экономия компьютерного времени расчета, что обеспечивают проекционно-итерационные схемы МКЭ.

В 2009 – 2013 гг. отдел прочности, динамики и технологии изготовления конструкций ИТМ НАН Украины и ГКА Украины выполнял 5 научно-исследовательских тем по решению Президиума НАН Украины.

Отметим некоторые аспекты научно-организационной и издательской деятельности отдела.

Заведующий отделом в 2009 – 2013 гг. был членом Оргкомитетов 14 международных научно-технических конференций, проведенных в Украине и России, является членом редколлегии ряда научно-технических журналов и научных сборников, издаваемых в Украине; с 2013 г. – член редколлегии журнала Изв. ВУЗов «Авиационная техника» (Россия); в 2009 г. – научный редактор книги «В. І. Моссаковський – вчений, ректор, особистість» (Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2009. – 664 с.); в 2010 г. – приглашенный редактор (guest editor) выпуска международного журнала

«Journal of Engineering Mathematics», посвященного 100-летию выдающегося ученого-механика А. А. Ильюшина.

В 2009 – 2012 гг. отдел участвовал в проекте № 4876 Научно-технологического центра Украины (совместно с другими отделами нашего института), с 2013 г. отдел принимает участие в комплексной программе НАН Украины «Ресурс» (Проект «Разработка методологии оценки и продолжения ресурса неоднородных конструкций ракетно-космической техники с учетом наличия концентраторов напряжений»).

В списке литературы приведены основные научные публикации по результатам проведенных исследований. Они включают разработку общих вопросов моделирования напряженно-деформированного состояния неоднородных оболочечных конструкций [4, 7 – 9, 11 – 14, 22 – 24, 27 – 32, 36, 38 – 40] и вопросов, характерных для оболочечных конструкций ракетно-космической техники и энергетики (солнечной: КССЭ, тепловой: сооружения электростанций и копров, электромагнитной: АВТ, атомной: АЭС, нефтегазовой: резервуары, трубопроводы) [1 – 3, 5, 6, 10, 15 – 21, 25, 26, 33 – 35, 37].

1. Гудрамович В. С. Контактные задачи теории оболочечно-стержневых систем в механике конструкций ракетно-космической техники / В. С. Гудрамович // Техническая механика. – 2008. – № 2. – С. 70 – 84.
2. Гудрамович В. С. Эффективные технологические схемы изготовления высокоточных волноводных систем / В. С. Гудрамович // Актуальні аспекти фізико-механічних досліджень. Акустика і хвилі. – К. : Наук. думка, 2007. – С. 94 – 99.
3. Особенности процесса формирования напряженно-деформированного состояния пространственных несущих систем железобетонных башенных сооружений / В. С. Гудрамович, В. М. Левин, В. А. Митраков, И. Г. Гевлич, Ю. В. Грицук // Пространственные конструкции зданий и сооружений. – М. : Стройиздат, 2008. – Вып. 11. – С. 150 – 163.
4. Гарт Е. Проекційно-ітераційні модифікації методу локальних варіацій та аспекти їх застосування в задачах локальної стійкості оболонок / Е. Гарт, В. Гудрамович // Сучасні проблеми механіки та математики : Міжнарод. наук. конф., 2008 р., Львів : мат. конф. – Львів : ІППИМ ім. Я.С. Підстригача НАНУ, 2008. – Т. 3. – С. 18 – 20.
5. Гудрамович В. С. Контактные взаимодействия трубопроводов с седловыми опорами с учетом дефектов формы в зоне контакта / В. С. Гудрамович, В. А. Блажко, Э. Л. Гарт // МТ – 2008 : Міцність і надійність магістральних трубопроводів : Міжнарод. наук. – техн. конф., червень, 2008 р., Київ : мат. конф. – К. : ІПМ ім. Г.С. Писаренка НАНУ, 2008. – С. 35 – 36.
6. Напряженное состояние армированной вязкоупругопластической пластины при сложном нагружении / В. С. Гудрамович, В. М. Левин, В. А. Митраков, И. Г. Гевлич, Ю. В. Грицук // Теоретическая и прикладная механика. – 2008. – Вып. 44. – С. 24 – 29.
7. Гудрамович В. С. Вплив форми скінченного елемента на обчислювальну ефективність проекційно-ітераційних методів при розв'язанні плоскої задачі теорії пружності / Гудрамович В. С., Гарт Е. Л. // Вісник Київського ун-ту ім. Т. Шевченка. Сер. фіз.-мат. науки. – 2008. – № 4. – С. 53 – 58.
8. Hudramovich V. S. Contact interactions and optimization of shell structures under local loading / V. S. Hudramovich, A. P. Dzyuba // Journ. of Math. Sci. – 2009. – V. 162, No. 2. – P. 231 – 245.
9. Hudramovich V. S. Contact mechanics of shell structures under local loading / V. S. Hudramovich // Int. Appl. Mech. – 2009. – V. 45, No. 7. – P. 708 – 729.
10. Гудрамович В. С. Голографический и конечно-элементный анализ деформаций оболочки с боковыми опорами при термомеханическом нагружении / В. С. Гудрамович, Ю. М. Селиванов, В. Д. Ключник // Theoretical foundations of civil engineering. – Warsaw : Warszawska Politechnica, 2009. – Вып. 17. – С. 105 – 110.
11. Гудрамович В. С. Повышение вычислительной эффективности проекционно-итерационного варианта МКЭ при использовании адаптивных сеток / В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт, С. А. Рябоконт // Там же. – С. 99 – 104.
12. Гудрамович В. С. Упругопластическое деформирование прямоугольных пластин с двумя отверстиями различной формы / В. С. Гудрамович, Е. Л. Гарт, С. А. Рябоконт // Техническая механика. – 2009. – № 4. – С. 102 – 110.
13. Гудрамович В. С. Линейные и билинейные аппроксимации в проекционно-итерационном варианте метода конечных элементов для плоской задачи теории упругости / В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт, О. М. Рубинчик // Техническая механика. – 2009. – № 2. – С. 95 – 104.
14. Гудрамович В. С. Розв'язування задач пружно-пластичної рівноваги пластин з прямокутним і круговим отворами на основі проекційно-ітераційних схем реалізації методу скінченних елементів / В. С. Гудрамович, Е. Л. Гарт, С. А. Рябоконт // Вісник Київського ун-ту ім. Т. Шевченка. Сер. : Фіз.-мат. науки. – 2009. – № 3. – С. 61 – 66.

15. *Гудрамович В. С.* Влияние эксплуатационных и технологических дефектов в виде вмятин различного размера на конструкционную прочность оболочечных конструкций АЭС / *В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт, Е. В. Самарская* // Ресурс-2009: Конструкційна міцність матеріалів і ресурс обладнання АЕС : міжнародн. науково-техн. конф., травень 2009 р., Київ : тези доп. – К. : Ін-т проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, 2009. – С. 54 – 55.
16. *Гудрамович В. С.* Проблемы динамики и прочности конструкций концентраторов солнечной энергии / *В. С. Гудрамович* // Проблемы использования альтернативных источников энергии в Туркменистане : международ. научн. конф., февраль, 2010 г., Ашхабад, Туркменистан : мат. конф. – Ашхабад : Улут, 2010. – С. 46 – 49.
17. *Гудрамович В. С.* Основные проблемы разработки концентраторов солнечной энергии / *В. С. Гудрамович* // Наука, техника и инновационные технологии в эпоху Великого Возрождения : Международ. научн. конф., июнь, 2010 г., Ашхабад, Туркменистан : мат. конф. – Ашхабад : Улут, 2010. – С. 184 – 187.
18. Прогрессирующее разрушение железобетонного сооружения / *В. С. Гудрамович, В. М. Левин, В. А. Митраков, Ю. В. Грицук, И. Г. Гевлич* // Пространственные конструкции. – М. : Девятка принт, 2010. – Вып. 12. – С. 58 – 67.
19. *Гудрамович В. С.* Динамика и прочность тонкостенных конструкций антенно-волноводной техники и солнечной энергетики / *В. С. Гудрамович* // Міцність матеріалів та елементів конструкцій : Міжнародн. наук.-техн. конф., присвячена 100-річчю від дня народж. акад. НАН України Г. С. Писаренка, 2010 р., Київ : тез. доп. В 2 т. – К. : ІПМ ім. Г. С. Писаренка НАНУ, 2010. – Т. 1. – С. 114 – 115.
20. Особенности влияния коррозионной деградации на прочность элементов тонкостенных конструкций резервуаров для нефтепродуктов / *В. С. Гудрамович, А. П. Дзюба, В. М. Левин* // Там же. – С. 116 – 117.
21. Напряженное состояние и прогрессирующее разрушение армированной вязкоупругопластической складки / *В. С. Гудрамович, В. М. Левин, В. А. Митраков, И. Г. Гевлич, В. Ю. Грицук* // Актуальные проблемы механики деформируемого твердого тела : VI Международ. науч. конф., 2010 г., Донецк – Мелекино : мат. конф. – Донецк : Юго-Восток, 2010. – С. 56 – 61.
22. *Гудрамович В. С.* Экспериментальные исследования прочности моделей цилиндрических и сферических оболочек при поперечном локальном нагружении / *В. С. Гудрамович* // Низькотемпературна міцність – 2010. Міцність матеріалів і конструкцій за низьких температур : Міжнарод. наук.-техн. конф., травень, 2010 р., Київ : тези доп. – К. : ІПМ ім. Г. С. Писаренка НАНУ, 2010. – С. 23 – 24.
23. *Гарт Э. Л.* Проекционно-итерационные схемы реализации метода конечных элементов в задачах упругопластического деформирования пластин с двумя эллиптическими отверстиями / *Э. Л. Гарт, В. С. Гудрамович, С. А. Рябоконь* // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : Ліра, 2010. – Вип. 14. – С. 94 – 101.
24. *Гудрамович В. С.* Моделирование процесса разрушения плоскодеформируемой упругопластической среды, связанного с образованием и развитием дефектов в виде отверстий различной формы / *В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт* // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела : VII Международ. науч. симп., 2010 г., Тверь, Россия : тез. докл. – Тверь : Изд-во ТГТУ, 2010. – С. 26 – 28.
25. *Гудрамович В. С.* Новые аспекты в разработке технологий сверхлегких радиационно-защитных материалов / *В. С. Гудрамович, А. П. Дзюба, И. С. Игнашкин* // ММЕ-2010 : Материалы и покрытия в экстремальных условиях : исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий : 6-я Международ. конф., 2010 г., Ялта, АР Крым : тез. докл. – К. : ІПМ ім. І. М. Францевича НАНУ, 2010. – С. 144.
26. *Гудрамович В. С.* Конечноеэлементный анализ упругопластического напряженно-деформированного состояния отсеков ракетных конструкций с вырезами / *В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт, Д. В. Клименко, А. М. Тонконоженко, С. А. Рябоконь* // Техническая механика. – 2011. – № 4. – С. 52 – 61.
27. *Гудрамович В. С.* Контактные взаимодействия элементов протяженных неоднородных оболочечных конструкций при использовании моделей физической нелинейности / *В. С. Гудрамович* // X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2011 г., Нижний Новгород, Россия : избранные тез. докл. – Нижний Новгород : Изд-во НГУ, 2011. – С. 57 – 59.
28. *Гудрамович В. С.* Проекционно-итерационные схемы реализации метода конечных элементов в задачах упругопластического деформирования пластин с отверстиями / *В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт* // Упругость и неупругость : международ. симп., посв. 100-летию со дня рожд. А. А. Ильюшина, январь, 2011 г., Москва : мат. симп. – М. : Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. – С. 144 – 147.
29. *Гудрамович В. С.* Численное моделирование поведения плоскодеформируемых структурированных сред на основе проекционно-итерационных схем метода конечных элементов / *В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт* // Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов : 24-ая Международ. конф., сентябрь, 2011 г., Санкт-Петербург, Россия : мат. конф. – Санкт-Петербург : Моринтех, 2011. – Т. 1. – С. 37 – 39.
30. *Гудрамович В. С.* Напряженно-деформированное состояние пластинчатых элементов тонкостенных конструкций с прямоугольными отверстиями различного размера при учете пластических деформаций / *В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт, Д. В. Клименко, С. А. Рябоконь* // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : Ліра, 2011. – Вип. 15. – С. 45 – 53.

31. *Hart E. L. Applications of the projective-iterative versions of FEM in damage problems for engineering structures / E. L. Hart, V. S. Hudramovich // Maintenance-2012 : 2 Int. Conference, 2012, Zenica, Bosnia and Herzegovina : Proceedings. – Zenica, 2012. – P. 157 – 163.*
32. *Гарт Э. Л. Численный анализ процесса упругопластического деформирования структурированных сред / Э. Л. Гарт, В. С. Гудрамович // Доп. Нац. акад. наук України. – 2012. – № 5. – С. 49 – 56.*
33. *Анализ напряженно-деформированного состояния пластинчатых армированных элементов башенных сооружений с отверстиями / Э. Л. Гарт, Ю. В. Грицук, В. С. Гудрамович, В. М. Левин, С. А. Рябоконт, Е. В. Самарская // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : Ліра, 2012. – Вип. 19. – С. 54 – 64.*
34. *Гудрамович В. Динамика конструкций концентраторов электромагнитной и лучистой энергии при вибрационных воздействиях / В. Гудрамович // Нестационарні процеси деформування елементів конструкцій, зумовлені дією полів різної фізичної природи : Українсько-російський симп., 2012, Львів : мат. симп. – Львів : ІПІММ ім. Я. С. Підстригача НАНУ, 2012. – С. 47 – 51.*
35. *Гудрамович В. С. Вычислительные аспекты теории складчатых систем / В. С. Гудрамович, В. М. Левин // Развитие методов расчета и проектирования пространственных конструкций зданий и сооружений : науч. сессия, 2012 г., Москва : мат. конф. – М. : МОО Содействие развитию и применению пространственных конструкций в строительстве, 2012. – С. 31 – 33.*
36. *Hudramovich V. S. Elastoplastic deformation of nonhomogeneous plates / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, S. A. Ryabokon' // Journ. of Engineering Math. – 2013. – V. 78. – Issue 1. – P. 181 – 197.*
37. *Гудрамович В. С. Энерго- и ресурсосберегающие технологии изготовления концентраторов солнечной энергетики / В. С. Гудрамович // Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья : Международ. науч. конф., 2013 г., Ашхабад, Туркменистан : мат. конф. – Т. 1. – Ашхабад : Үлүм, 2013. – С. 17 – 20.*
38. *Гудрамович В. С. Взаимное влияние вырезов на прочность оболочечных конструкций при пластическом деформировании / В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт, В. Д. Клименко, С. А. Рябоконт // Проблемы прочности. – 2013. – № 1. – С. 5 – 16.
То же: *Hudramovich V. S. Mutual influence of openings on strength of shell-type structures under plastic deformation / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, D. V. Klimenko, S. A. Ryabokon' // Strength of Materials. – 2013. – V. 45, No. 1. – DOI : 10.1007/s11223-013-9426-5 (in press).**
39. *Гудрамович В. С. Применение проекционно-итерационных схем МКЭ к решению задач упругопластического деформирования оболочек с отверстиями / В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт, С. А. Рябоконт // Вісник Київського нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Сер. : Фіз.-мат. науки. – 2013. – Вип. 3. – С. 55 – 58.*
40. *Hart E. L. Numerical simulation of stress-strain state for nonhomogeneous shell-type structures based on the finite element method / E. L. Hart, V. S. Hudramovich, S. A. Ryabokon', E. V. Samarskaya // Journ. Modeling and Numerical Simulation of Mater. Sci. – 2013. – V. 3, No. 4. – P. 155 – 157.
<http://www.scirp.org/journal/mnsms>.*

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено: 08.10.13,
в окончательном варианте 31.10.13