

ного слоя во время технологической операции удара, совместное изменение массы технологического груза и выбивной машины, скачкообразное изменение массы груза является объектом дальнейших исследований.

Список литературы: 1. *Грабовский А.В.* О расчетно-экспериментальном моделировании динамических процессов в виброударных системах // *Механика та машинобудування*. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2009. – № 1. – С. 119-129. 2. *Грабовский А.В.* Методы и алгоритмы верификации сил ударного взаимодействия в виброударных системах // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – Харків: УДАЗТ. – 2010. – № 3/9(45). – С. 42-46. 3. *Баженов В.А., Погорелова О.С., Постникова Т.Г. и др.* Сравнительный анализ способов моделирования контактного взаимодействия в виброударных системах // *Пробл. прочности*. – 2009. – № 4. – С. 69-77. 4. *Баженов В.А., Погорелова О.С., Постникова Т.Г. и др.* Анализ динамики ударно-вращательного маятника при зміні його параметрів // *Пробл. прочности*. – 2008. – № 6. – С. 82-90. 5. *Ткачук Н.Н., Грабовский А.В., Ткачук Н.А.* Подход к идентификации ударной модели для виброударной системы // *Вісник СевНТУ. Механіка, енергетика, екологія*. – Севастополь: СевНТУ. – 2010. – № 110. – С. 55-60. 6. *Вибрации в технике: Справочник в 6 томах*. – М.: Машиноведение. – 1981. 7. *Ткачук Н.А., Грабовский А.В., Ткачук Н.Н., Костенко Ю.В., Артемов И.В.* Численное моделирование динамических процессов в виброударных системах // *Вісник НТУ „ХПІ”*. Тем. випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях, № 42. – 2011. – С.179-187. 8. *Форсайт Дж.* Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер. – М.: Мир, 1980. – 280 с.

Надійшла до редакції 12.09.2012

УДК 623.438: 539.3

А.В. ЛИТВИНЕНКО, к.т.н., гл. инж. проекта спец. конструктор. отдела научн.-техн. комплекса ЧАО „АзовЭлектроСталь”, Мариуполь

КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРАГМЕНТОВ, МАКЕТОВ И НАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ ЭЛЕМЕНТОВ БРОНЕКОРПУСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Описано комплексні експериментальні дослідження фрагментів, макетів та натурних зразків бронекорпусів легкоброньованих машин. Ці результати служать основою при формуванні бази даних порівняльних розрахунково-експериментальних досліджень. Їх метою є обґрунтування достовірних, повних та точних створюваних числових моделей елементів бронекорпусів спеціальних транспортних засобів для проведення проектних досліджень їх коливань та напружено-деформованого стану. Застосовані методи віброакселерометрії, електротензометрії та голографічної інтерферометрії.

Ключові слова: експериментальне дослідження, бронекорпус, напружено-деформований стан, метод вібро-акселерометрії, метод електротензометрії, метод голографічної інтерферометрії

Описаны комплексные экспериментальные исследования фрагментов, макетов и натурных образцов бронекорпусов легкобронированных машин. Эти результаты служат основой при формировании базы данных сравнительных расчетно-экспериментальных исследований. Их

целью является обоснование достоверных, полных и точных создаваемых численных моделей элементов бронекорпусов специальных транспортных средств для проведения проектных исследований их колебаний и напряженно-деформированного состояния. Используются методы виброакселерометрии, електротензометрии и голографической интерферометрии

Ключевые слова: экспериментальное исследование, бронекорпус, напряженно-деформированное состояние, метод вибро-акселерометрии, метод електротензометрии, метод голографической интерферометрии.

Complex experimental researches of fragments, prototypes and full-scale models of armored hulls of lightly armored vehicles are described. These results are forming the data base of comparative computation and experimental researches. Their aim is grounding of reliable, complete and exact created numerical models of elements of armored hulls of special transport vehicles for realization of project researches of their vibrations and stressed-deformed state. Methods of vibro-accelerometers, electrical tensometry and holographic interferometry are applied.

Keywords: experimental research, armored hull, strain-strain state, method of vibro-accelerometry, method of electric tensometry, method of holographic interferometry.

Введение. В ряде ранее опубликованных работ [1-15] описана методология формирования адекватных, достоверных, точных математических и численных (в частности, конечно-элементных) расчетных моделей бронекорпусов транспортных машин специального назначения. Она базируется на параллельном взаимосвязанном расчетном и экспериментальном исследовании объектов, представляющих разные уровни детализации бронекорпусов: от фрагментов бронекорпусов и макетов, выполненных в масштабе, – до натуральных образцов корпусов отдельных бронемашин. Такая „многокаскадность” моделей является одним из факторов избыточности базового экспериментального материала, что существенно повышает точность и достоверность создаваемых на их основе численных моделей.

В данной работе в развитие предложенного ранее подхода предлагаются дополнительные средства повышения качества создаваемой базы данных.

Методика исследований. Как известно [2, 5, 6, 10], в цикле проектных исследований вновь проектируемых машин особое внимание уделяется обеспечению точности и достоверности проводимых численных расчетов на основе сравнения с экспериментальными данными (рис. 1). Здесь **R** – реальный объект (машина); **M** – математическая модель протекающих физико-механических процессов и реализуемых состояний в процессе эксплуатации; **N** и **E** – численная и экспериментальная модели изучаемых процессов и состояний исследуемых объектов; **I, D, F, C** – этапы идеализации, дискретизации, физического моделирования и верификации результатов.

При этом ключевым в данном цикле является этап „C” – сопоставление результатов численных и экспериментальных исследований, служащий источником принятия решения относительно выбора параметров создаваемых численных моделей как приемлемых либо об их корректировке, а в отдельных случаях – коренном изменении вплоть до замены математической и экспериментальной моделей объекта исследований.

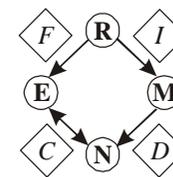


Рис. 1 – Цикл проектных исследований

Учитывая значимость данного этапа „С” (см. рис. 1), естественно улучшать и „качество” проведения самого процесса сравнения. Ведь «цена вопроса» в этом случае очень велика: принятая по его итогам в работу численная модель служит для проведения с ее использованием, как правило, серии многовариантных расчетов при варьировании конструкции и условий нагружения. Адекватность принятой математической модели обеспечивает (не обеспечивает) в этом случае отражение основных качественных особенностей моделируемого процесса или состояния (например, вопросы допустимости представления тонкостенной конструкции в виде оболочечных или стержневых элементов или игнорирования (учета) на той или иной стадии расчетов неоднородности физико-механических свойств материалов свариваемых элементов и сварного шва и т.п.).

Следующим этапом является, например, вопрос выбора типов конечных элементов (КЭ), их количества и расположения зон сгущения-разрежения конечно-элементных сеток, – на шаге численного моделирования. С другой стороны, при изготовлении физической модели для экспериментального исследования объекта могут быть упущены важные (или оставлены второстепенные) элементы конструкции или нагрузок. Таким образом, наложение погрешностей на этапах *I, D, F* (см.рис. 1) не дает позитивного результата на этапе *C*. В противном случае, т.е при высоком качестве моделей *M, N, E*, роль этапа *C* резко возрастает, становясь определяющей.

С точки зрения повышения достоверности численной модели с параметрами p_N при сравнении результатов численных u_N и экспериментальных u_E исследований можно видоизменить предложенный ранее [1-17] критерий:

$$p_N^* : I\{u_N(p_N) - u_E\} \rightarrow \min . \quad (1)$$

Здесь I – функционал несоответствия результатов численных и экспериментальных исследований.

Для расширения информативности критерия (1) можно, например, вместо сравнения отдельных величин u_N и u_E в дискретном множестве точек объекта проводить сравнение полей их распределений по части или по всей поверхности (для этих целей, например, подходит метод голографической интерферометрии [18]). Другим путем является процесс отслеживания соответствия временных распределений контролируемых и сравниваемых величин (например, в местах установки тензодатчиков или акселерометров [19]). Еще одним из путей является использование для этих целей результатов *серии* экспериментальных исследований машин-аналогов (т.е. хронологических предшественников проектируемой машины одного и того же семейства). В дополнении к упомянутым способам в работах [13-17] предложен способ поэтапного исследования „фрагмент – макет – натурный образец”.

Естественно, что возрастание объема сравниваемой информации ($u_N - u_E$) приводит к росту достоверности результатов процедуры (1). В то же время в некоторых случаях требуется дополнить и эту возрастающую точность этапа „С”

(см. рис. 1). В связи с этим в данной работе предлагается, в дополнении к рассмотрению „многокаскадных” моделей исследуемого объекта, проводить также процедуру дублирования исследований одного и того же объекта различными методами. Схематически данный процесс представлен на рис. 2.

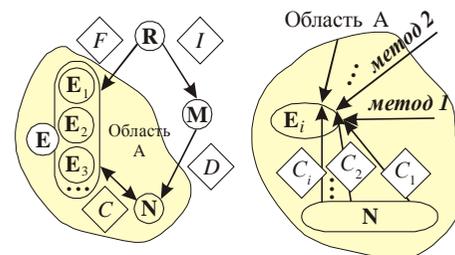


Рис. 2 – Предлагаемый вариант расчетно-экспериментальных исследований

В данном случае в дополнение к сравнению по различным моделям, проводится также сравнение результатов ($u_N - u_E$), полученных при одной и той же модели, с помощью различных методов:

$$I = \sum_{i,j} \gamma_{ij} I_{ij} , \quad (2)$$

где I_{ij} – „парциальные” критерии соответствия единичных актов сравнения типа (1), а γ_{ij} – весовые коэффициенты, соответствующие удельной значимости для той или иной модели того или иного метода экспериментальных измерений.

Выражение (2) требует для вычислений критерия несоответствия ($u_N - u_E$) гораздо большего количества исследований, однако является и более убе-

дительным аргументом при обосновании достоверности получаемых результатов. Последнее обстоятельство особенно важно для таких объектов как бронекорпуса легкобронированных машин. Эти объекты подвергаются действию многих поражающих факторов, в силу чего создаваемые для их проектных исследований конечно-элементные модели (КЭМ) должны быть адекватными, полными и точными.

Таким образом, принимаемые на основе конечно-элемент-



Рис. 3 – Стенды и аппаратура для экспериментальных исследований фрагмента бронекорпуса

ного моделирования решения являются чрезвычайно ответственными.

Примеры применения методики. В качестве иллюстрации рассмотрим фрагмент внешней панели бронекорпуса, выполненный цельным ($i = 1$) и сварным с двусторонней разделкой и швом с полным переплавлением ($i = 2$). В качестве используемых методов рассмотрим методы голографической интерферометрии ($j = 1$) и акселерометрии ($j = 2$). Иллюстрации рабочих моментов и полученные результаты исследований приведены на рис. 3, 4.

Макет бронекорпуса легкобронированных машин. Исследованию подвергаются макеты верхней части бронекорпусов БТР-80 ($i = 1$) и МТ-ЛБ ($i = 2$). Применяются методы акселерометрии ($j = 1$) и фиксации собственных форм при возбуждении на вибростенде ($j = 2$).

Иллюстративные материалы приведены на рис. 5, 6.

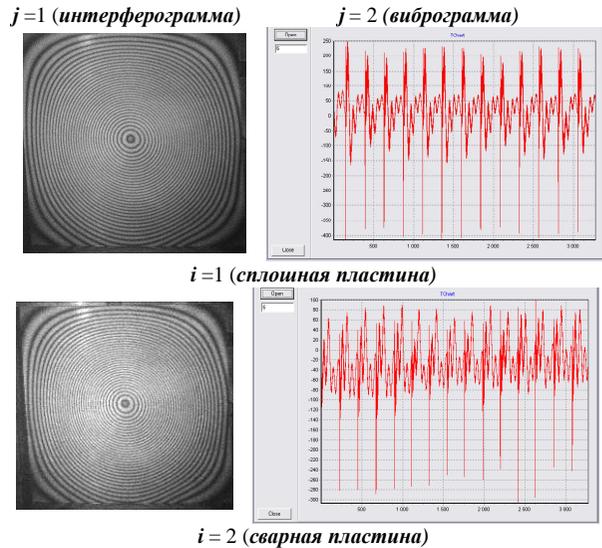


Рис. 4 – Результаты экспериментальных исследований фрагмента бронекорпуса

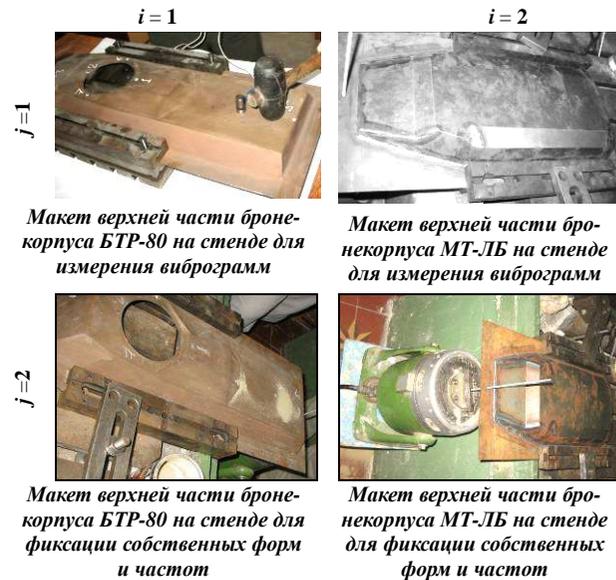


Рис. 5 – Стенды и аппаратура для экспериментальных исследований макетов бронекорпуса

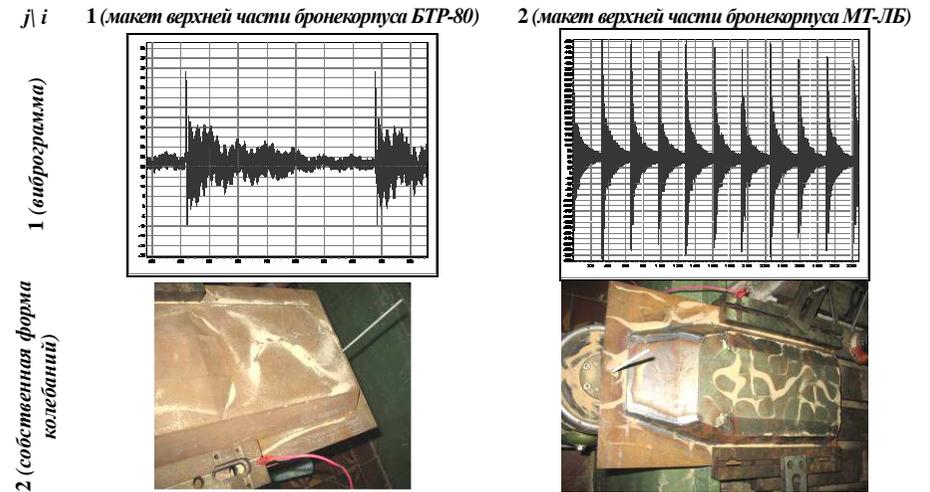


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований макетов бронекорпуса

Натурный образец бронекорпуса легкобронированных машин. В качестве объектов выбраны бронекорпуса МТ-ЛБ ($i = 1$) и БТР-3Е ($i = 2$). Применяются методы электротензометрии ($j = 1$) и акселерометрии ($j = 2$). На рис. 7, 8 приведены отдельные материалы исследований.

Закключение. Предложенный в работе подход к организации расчетно-экспериментальных исследований элементов бронекорпусов транспортных средств

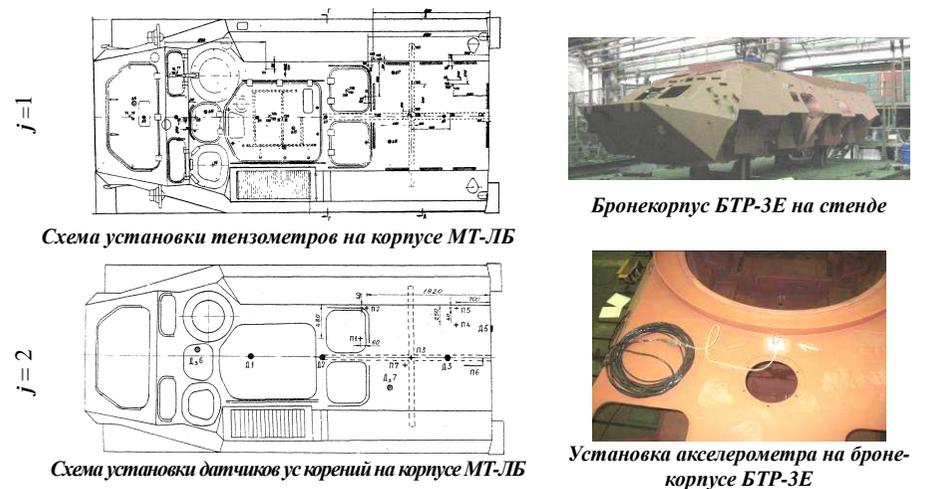


Рис. 7 – Стенды и аппаратура для экспериментальных исследований натуральных образцов бронекорпуса

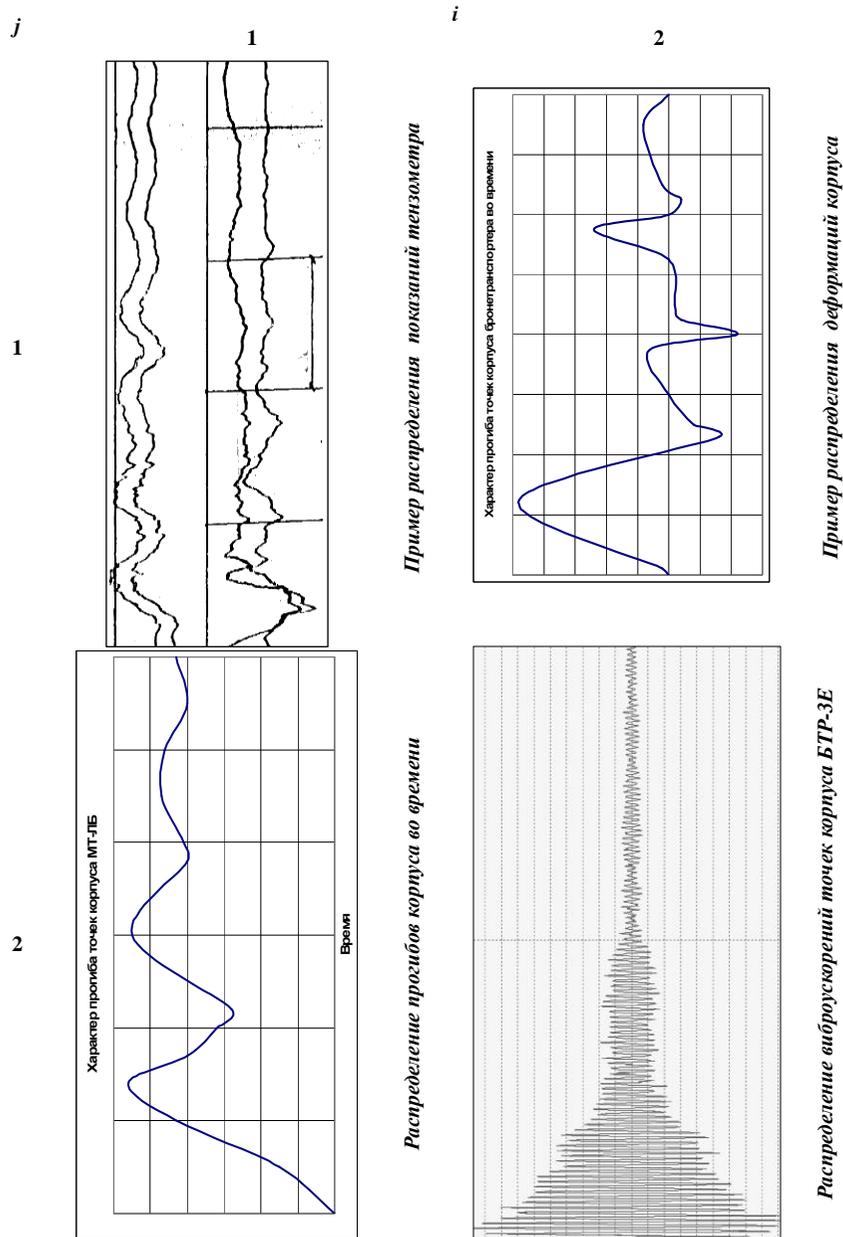


Рис. 8 – Результаты экспериментальных исследований натуральных образцов бронекорпуса

специального назначения является развитием традиционных методов исследований процессов и состояний в этих ответственных объектах. Он обладает большой вариативностью применения как по отношению к объектам исследований, так и применительно к выбираемым методам экспериментальных измерений. Кроме того, естественным образом известные критерии несоответствия распространяются на более широкую базу экспериментально полученных результатов.

В дальнейшем планируется провести сравнение полученных экспериментальных результатов с данными численных исследований при помощи метода конечных элементов и на этой основе установить параметры конечно-элементных моделей бронекорпусов, позволяющих моделировать их динамику и напряженно-деформированное состояние с заданной точностью и без чрезмерных затрат вычислительных ресурсов.

Список литературы: 1. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Динаміка і міцність машин.– Харків: НТУ «ХПІ», 2002.– № 10. – С.126-132. 2. Гриценко Г. Д., Малакей А.М., Миргородский Ю. Я. и др. Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002.– № 1. – С.6-13. 3. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальное исследование элементов сложных механических систем // Сб. тр. Второй конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH. – Москва. – 2002. – С.256-260. 4. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния элементов транспортных средств и технологических систем // Вісник держ. техн. ун-ту сільск. господарства. Тем. вип.: Механізація сільськогосподарського виробництва. – Харків: ХДТУСГ. – 2003. – № 21– С.20-30. 5. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Глуценко Е.В. и др. Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2004.– № 2, т. 2. – С.85-96. 6. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной и др. // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С. 57–79. 7. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Мартыненко А.В., Нечепуренко А.В., Полищук Т.В. К вопросу расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2007. – № 23. – С. 81-92. 8. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Ткачук А.Н. и др. Расчетно-экспериментальное обоснование параметров численных моделей элементов механических систем // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2008. – №14. – С. 117-125. 9. Чепурной А.Д., Глинин Г.П., Ткачук Н.А. Базовые экспериментальные исследования для синтеза гибридных расчетных моделей высокоответственных машин // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2009. – №28. – С. 140-162. 10. Чепурной А.Д., Глинин Г.П., Литвиненко А.В. и др. Общий подход к обоснованию параметров проектируемых машин на основе гибридных расчетно-экспериментальных моделей // Механіка та машинобудування. – 2009. – №2. – С. 103-108. 11. М.А. Tkachuk, A.V. Grabovsky and M.M. Tkachuk. An Approach to Identification of Impact Interaction Model for a Vibroimpact System // Proceedings of the 3d International Conference on Nonlinear Dynamics. – Kharkov, 2010, September 21-24. – P. 207-212. 12. Комплексне дослідження міцності та жорсткості корпусів транспортних засобів спеціального призначення / Є.В. Пелешко, М.А. Ткачук, С.Т. Бруль и др. // Вестник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Транспортне машиностроєння. – 2010. – №39. – С. 116-131. 13. Карапейчик И.Н., Глинин Г.П., Ткачук Н.А. Базовые экспериментальные исследования автотопливоправящих: методика, результаты, проектно-технологические рекомендации // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2011. – № 51. – С. 65–93. 14. Карапейчик И.Н., Чепурной А.Д., Ткачук Н.А. Многоуровневые гибридные расчетно-экспериментальные модели для синтеза параметров элементов специальных транспортных средств // Механіка та машинобудування. – 2011. – №2. – С. 113–119. 15. Карапейчик И.Н. Методика экспериментальных исследований реакции корпусов бронетранспортеров на локальное импульсное воздействие / И.Н. Карапейчик // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2012. – № 22. – С.65-69. 16. Расширенная расчетно-экспериментальная

идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств специального назначения // *И.Н. Карпейчик, А.В. Литвищенко, С.Т. Бруль и др.* // *Вісник НТУ „ХПІ”*. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2012. – № 22. – С.69-77. **17.** Расчетно-экспериментальные исследования реакции бронекорпусов военных колесных и гусеничных машин на ударно-импульсное воздействие / *Миргородский Ю.Я., Белов Н.Л., Карпейчик И.Н. и др.* // *Вісник НТУ „ХПІ”*. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2012. – № 22. – С. 87-92. **18.** *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с. **19.** *Пригоровский Н.И.* Экспериментальные исследования и расчет напряжений в конструкциях. – М.: Наука, 1975. – 163 с.

Поступила в редколлегию 04.08.2011

УДК 623.438:539.3

Б.А. МЕЛЬНИК, адъюнкт каф. технического обеспечения

Нац. ун-та обороны Украины, Киев;

А.Н. МАЛАКЕЙ, зам. ген. директора ГП „Завод им. Малышева”,

Д.С. МУХИН, ст. гр. ТМ-88Б НТУ „ХПИ”, Харьков;

А.Ю. ТАНЧЕНКО, мл. научн. сотр. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”;

О.В. КОХАНОВСКАЯ, научн. сотр. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ БОЕВЫХ МАШИН

У статті викладено питання комплексного моделювання динамічних процесів в елементах легкоброньованих бойових машин. Побудована комплексна математична модель збуреного руху з урахуванням змінних параметрів підвіски колісних бойових машин. Наведені результати тестового числового моделювання динамічних процесів на прикладі бронекорпусу і підвіски бронетранспортера БТР-80.

Ключові слова: легкоброньована машина, динамічний процес, комплексна математична модель, напружено-деформований стан, підвіска.

В статье изложен вопрос комплексного моделирования динамических процессов в элементах легкобронированных боевых машин. Построена комплексная математическая модель возмущенного движения с учетом переменных параметров подвески колесных боевых машин. Приведены результаты тестового численного моделирования динамических процессов на примере бронекорпуса и подвески бронетранспортера БТР-80.

Ключевые слова: легкобронированная машина, динамический процесс, комплексная математическая модель, напряженно-деформированное состояние, подвеска.

In the paper questions of complex modeling of dynamic processes in elements of lightly armored fighting vehicles are expounded. The complex mathematical model of disturbed motion is built taking into account variable parameters of pendant of wheeled fighting vehicles. Results of test numerical modeling of dynamic processes are presented on example of armored hull and pendant of BTR-80 armored troop-carrier.

Keywords: lightly armored vehicle, dynamic process, complex mathematical model, stressed-deformed state, pendant

© Б.А. Мельник, А.Н. Малакей, Д.С. Мухин,
А.Ю. Танченко, О.В. Кохановская