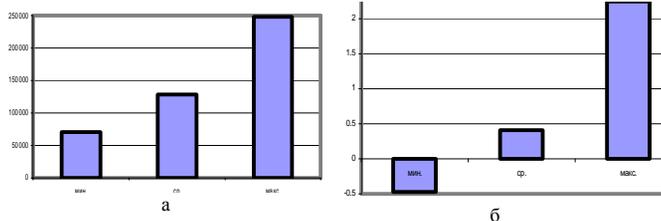


У табл. 1 та на рис. 8, а і 8, б наведено деякі характерні результати по діапазону значень тиску по поверхнях корпусу МТ-ЛБ. При надлишковому тиску  $\Delta P = 65$  кПа у фронті хвилі повний тиск на елементи корпусу може мінятися в межах від 70 кПа до 248 кПа. Таким чином, в деяких областях корпусу діятиме тиск, нижчий за атмосферний (30% атмосферного), а в деяких областях - вищий за середній надмірний тиск у фронті. Якщо врахувати (відняти) величину нормального атмосферного тиску і віднести до величини надлишкового тиску, то середній тиск на корпус буде 27 кПа (41% від початкової величини надлишкового тиску), а в деяких місцях тиск буде перевищувати початковий надлишковий тиск більш ніж у два рази. Також слід зазначити, що максимальна швидкість потоку, що огинає МТ-ЛБ, може досягти 423 м/с, що в 1.41 раз більше початкової швидкості потоку (300 м/с).

**Таблиця 1**  
Діапазон значень тиску по поверхнях корпусу МТ-ЛБ

	мін.	сер.	макс.
абс., кПа	70.5	128	247.5
відн.	-0.47	0.41	2.25

Рис. 8. Діапазон значень тиску по поверхнях корпусу МТ-ЛБ:  
а - абсолютні значення; б - безрозмірні (відносні)



**Висновки.** Як видно з наведених результатів, характер розподілу тиску сильно залежить від геометрії об'єкту, напряму розповсюдження ударної хвилі та інших чинників, вказаних раніше. Неврахування цього може привести до істотних похибок при розрахунку дії ударної хвилі на корпус. Так, по тиску максимальні значення можуть бути в два рази більше номінальних (проти 1.2 по стандартній методиці), а деякі зони навіть можуть бути навантажені протитиском, що виникає при обтіканні корпусу. CosmosFloWorks є зручним інструментом попереднього аналізу за рахунок існуючих методів побудови оптимізованої (збалансованої за точністю і швидкістю розрахунку) сітки, методів згущування, швидкості розрахунку. Проте за рахунок того, що він базується на МСР, для подальших досліджень, в рамках яких будуть проведені динамічні дослідження обтікання ЛБМ, слід надати перевагу методу скінченних об'ємів або методу скінченних елементів.

Отримані результати можуть бути використані надалі як основа для коректного задання навантажень від ударної хвилі при розрахунку напружено-деформованого стану корпусів транспортних засобів спеціального призначення.

**Список літератури.** 1. Чобиток В.А., Брижинець Ю.Н., Долганов А.А., Мирошник А.В. Конструкция и

расчет танков и БМП. – М.: Воениздат, 1984. – 376 с. 2. Васильев А.Ю., Пелешко Е.В. Построение параметрических моделей корпусов многоцелевых транспортеров для расчета их прочностных и жесткостных характеристик // Вестник НТУ “ХПИ”. Тем. вып.: „Колесные и гусеничные машины специального назначения” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. – № 28. – С.102-112. 3. Васильев А.Ю. К вопросу о деформировании корпусов транспортных средств под действием ударных нагрузок характеристик // Вестник НТУ “ХПИ”. Тем. вып.: „Динамика и прочность машин” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – № 47. – С. 42-50. 4. Пономарев Е.П., Васильев А.Ю. К вопросу о проведении многовариантного анализа напряженно-деформированного состояния корпуса МТ-ЛБ // Механіка та машинобудування – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2005. – № 1. – С.289-294. 5. Бруль С.Т., Васильев А.Ю. К вопросу о моделировании воздействия ударной волны на корпус боевой машины // Вестник НТУ “ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – № 53. – С.29-34. 6. Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Грищенко Г.Д., Орлов Е.А. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – №1. – С.184-194. 7. Бруль С.Т. Моделирование реакции корпуса боевой машины на действие подвижной нагрузки: теория, методы и модели // Вестник НТУ “ХПИ”. Тем. вып.: „Машинознавство та САПР” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2007. – № 3. – С.24-43. 8. Бейкер У., Кокс П., Уэстман П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия. – М.: Мир, 1986. Кн. 1. – 319 с.; Кн. 2. – 384 с. 9. Физика взрыва // Под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704 с. 10. Губайдуллин А.А., Иванова А.И., Низматуллин Р.И. Некоторые результаты численного исследования нестационарных волн в газозвезях // Изв. АН СССР, МЖТ. 1976. – № 5. – С. 64-69. 11. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа – М.: Мир, 1986. – с.184. 12. Дэйч М.Е. Техническая газодинамика. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. 13. <http://www.top500.org>. 14. <http://supercomputers.ru>. 15. <http://tensor.org.ua>. 16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с. 17. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006/2007. – М.: ДМК-пресс, 2007 – 784 с. 18. Грін О.Г. Газова динаміка. – Одеса: Астропринт, 2007. – 208 с. 19. Грін О.Г. Чисельні методи у газовій динаміці. – Одеса: Астропринт, 2006. – 168 с.

Поступила в редколлегию 10.07.09

УДК 539.3

**О. В. ВЕРЕТЕЛЬНИК**, мл. науч. сотр. каф. ТММиСАПР,  
**В.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК**, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.,  
доцент каф. „Прикладная математика” НТУ “ХПИ”

### О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛ, СОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛЫ С РЕЗКО ОТЛИЧАЮЩИМИСЯ СВОЙСТВАМИ

У роботі пропонується новий підхід досліджень механічної поведінки елементів конструкцій, які містять матеріали з властивостями, що різко відрізняються, на прикладі корпусу силового гідроциліндра. Була побудована параметрична модель для проведення дослідження напружено-деформованого стану гідроциліндра.

New approach of researches of mechanical conduct of elements of constructions is in-process offered containing materials with sharply different properties, on the example of corps of power hydrocylinder. A parametric model was built for the conduction of researches of the mode of deformation state of hydrocylinder.

**Введение.** Расчет напряженно-деформированного состояния различных элементов механических систем с резко отличающимися физико-механическими свойствами, в частности, модулями упругости материалов, можно

в некоторых случаях свести к решению двумерной задачи теории упругости. Примером таких элементов может быть корпус гидроцилиндра, состоящий из твердой внешней оболочки (сталь) и внутренней мягкой составляющей (акрил). Исследования таких элементов сводятся к решению осесимметричных задач, нахождение полей напряжений и деформации может быть осуществлено с помощью метода конечных элементов.

Ранее решение данного класса задач имело ряд недостатков[1-3], особенно если исследуемая геометрия имела сложную форму. Один из недостатков заключался в ручном разбиении границ исследуемой геометрии, которая приводила к перенумерации узлов конечно-элементной сетки. С развитием программных комплексов появилась возможность автоматизировать процесс разбиения геометрии на конечные элементы. Одним из таких комплексов является ANSYS/Workbench, примененный при моделировании напряженно-деформированного состояния силовых гидроцилиндров.

**Постановка задачи.** В работе предлагается новый подход к исследованию элементов конструкций с резко различающимися модулями, в частности, корпуса силового гидроцилиндра. С этой целью была создана параметрическая геометрическая модель корпуса гидроцилиндра в CAD-системе SolidWorks в осесимметричной постановке для дальнейшего экспортирования ее в программный комплекс ANSYS/Workbench, для создания конечно-элементной модели (КЭМ) и проведения дальнейших исследований. Управление изменением параметров проводится при помощи макросов, создаваемых специальной программой.

Сечение гидроцилиндра представлено на рис. 1. Приведенные размеры представлены для определенных значений внешнего и внутреннего радиусов. Как было сказано ранее, исследуемый объект является параметризованным, все габаритные и другие размеры вычисляются относительно двух параметров – внешнего и внутреннего радиусов. Формулы для вычислений остальных величин и пределы их изменений представлены ниже: внешний диаметр  $D = 12 \div 150$  мм; внутренний диаметр  $D_1 = 10 \div 100$  мм,  $D_1 \leq D$ ; длина цилиндра  $L = D \div 3D$ ; толщина стенки цилиндра  $H = (D - D_1) / 2$ ; толщина акрилового слоя  $H_1$  ( $H_1 / H = 0.05; 0.1; 0.2; 0.3$ ); толщина дна цилиндра  $L_1 = H$ ; высота выточки на дне цилиндра  $L_0 = H$ ; диаметр выточки  $D_2 = 2H_1 + D_1$ .

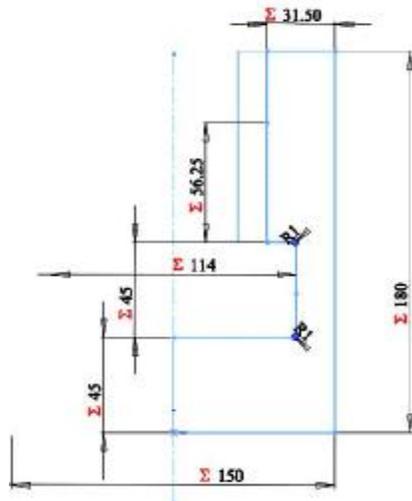


Рис. 1. Схема поперечного сечения корпуса гидроцилиндра

**Построение конечно-элементной модели.** После построения параметрической геометрической модели геометрия была передана в программный комплекс ANSYS/Workbench, в котором была построена конечно-элементная модель. При построении КЭМ использовался элемент PLANE 183 (внешний вид представлен на

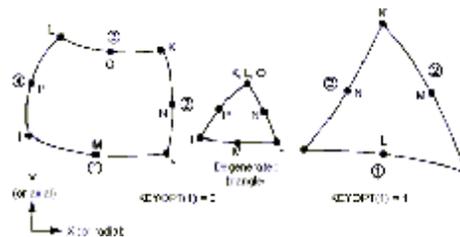


Рис. 2. Внешний вид и расположение узлов элемента Plane183

рис. 2). При моделировании в программном комплексе Workbench осесимметричной задачи очень важно соответствующим образом расположить оси координат относительно модели, т.е. ось Y совпадает с продольной осью, а ось X – радиальная.

Так как входные параметры были заданы в виде набора значений, был проведен ряд исследований для значений, определяющих внешние и внутренние габариты, задающих внешние и внутренние диаметры корпуса гидроцилиндра для случаев, приведенных в табл. 1. Все проведенные расчеты были сделаны при фиксированном соотношении:  $H_1 / H = 0.3$ .

В результате варьирования входных параметров конечно-элементная сетка изменялась в пределах 2-3 тыс. элементов при фиксированных средних размерах элементов. Также было проведено исследование по варьированию размерами конечных элементов, исследование проводилось для 1-й расчетной схемы. Полученные сетки насчитывали примерно 8,3; 33 и 92 тыс. элементов. Внешний вид геометрии и их конечно-элементные сетки для каждой расчетной схемы представлены на рис.3.

Нагружение и закрепление осуществлялось путем прикладывания к внутренней части цилиндра давления, равного 1 кПа, и жесткого защемления внешнего дна цилиндра. Распределение прикладываемых нагрузок представлено на рис. 4 (приведены нагрузки для 1-ой расчетной схемы, для остальных расчетных схем нагружение аналогичное).

**Анализ результатов.** При проведении многовариантных расчетов были получены поля распределений эквивалентных напряжений по von Mises (Па) и перемещений (м). В табл. 2 представлены физические характеристики материалов, участвовавших в исследованиях, а на рис. 5-9 – полученные поля как для геометрии в целом, так и для акрилового слоя (для каждой расчетной схемы).

После построения параметрической геометрической модели геометрия была передана в программный комплекс ANSYS/Workbench, в котором была построена конечно-элементная модель. При построении КЭМ использовался элемент PLANE 183 (внешний вид представлен на рис. 2). При моделировании в программном комплексе Workbench осесимметричной задачи очень важно соответствующим образом расположить оси координат относительно модели, т.е. ось Y совпадает с продольной осью, а ось X – радиальная.

Так как входные параметры были заданы в виде набора значений, был проведен ряд исследований для значений, определяющих внешние и внутренние габариты, задающих внешние и внутренние диаметры корпуса гидроцилиндра для случаев, приведенных в табл. 1. Все проведенные расчеты были сделаны при фиксированном соотношении:  $H_1 / H = 0.3$ .

Таблица 1

Наборы параметров для расчетов напряженно-деформированного состояния гидроцилиндра с футеровкой внутренней поверхности акриловым слоем

№ исследования	$D$ , мм	$D_1$ , мм
1	150	60
2	150	100
3	100	60
4	80	40
5	60	25

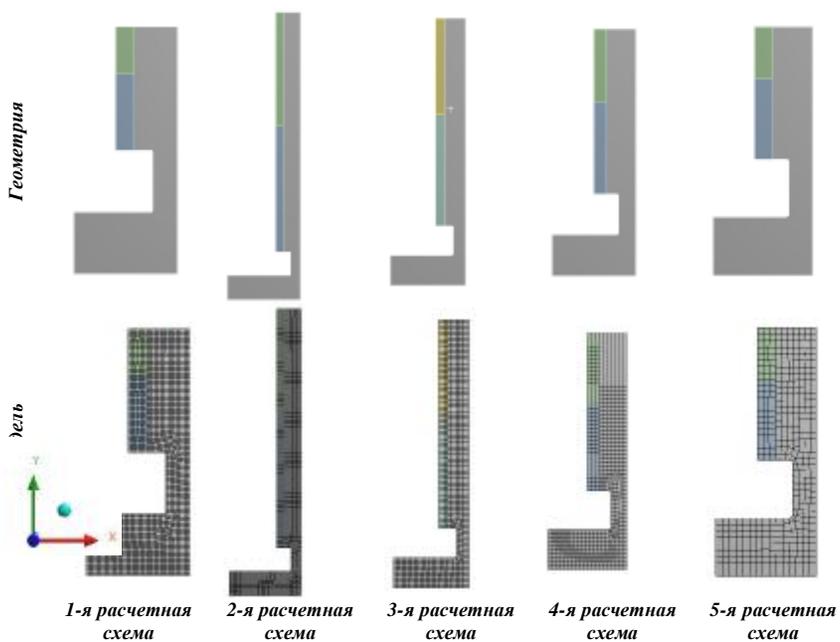


Рис. 3. Геометрии и КЭ модели для различных расчетных схем

**Выводы.** В результате проведенного исслед-

Таблица 2

Свойства материалов

Материал	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$
Сталь	$2.0 \cdot 10^{11}$	0.29
Акрил	$3 \cdot 10^9$	0.39

дования был отработан подход к построению параметрических моделей для решения осесимметричных задач для тел, состоящих из материалов с резко различающимися модулями упругости, а также была построена параметрическая модель на примере корпуса силового гидrocиллиндра, которая охватывает большой спектр значений, определяющих внешние и внутренние габариты гидrocиллиндра. Полученные распределения напряжений и перемещений обладают следующими особенностями.

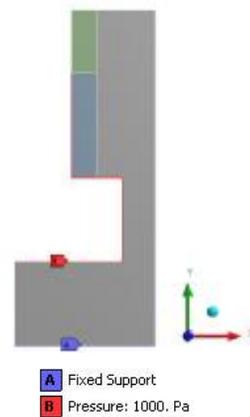


Рис. 4. Внешние силовые факторы

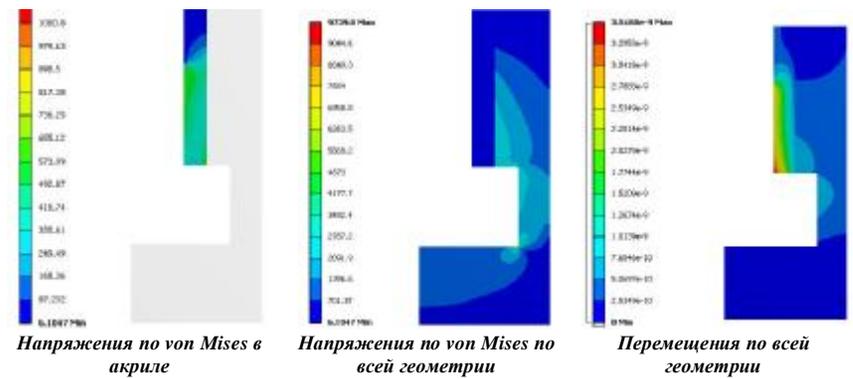


Рис. 5. Напряжения по von Mises и перемещения (1-я расчетная схема)

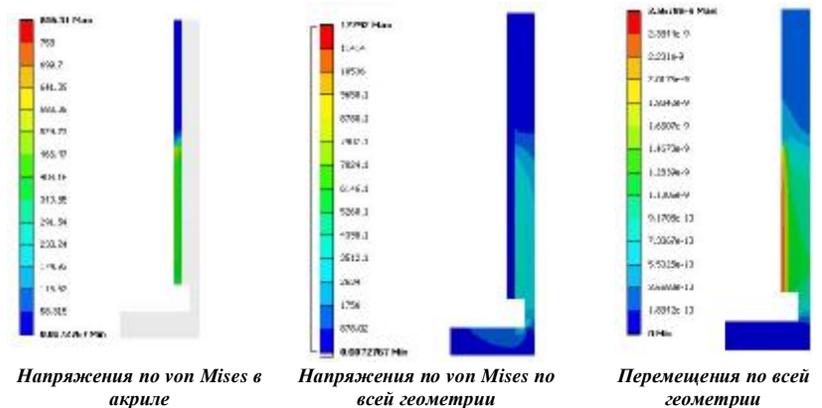


Рис. 6. Напряжения по von Mises и перемещения (2-я расчетная схема)

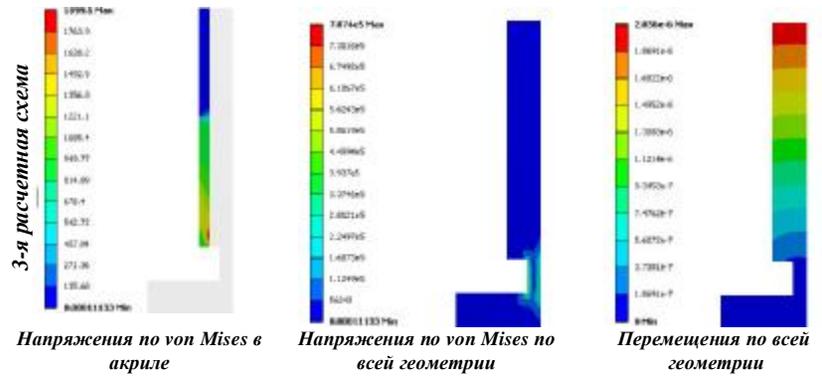


Рис. 7. Напряжения по von Mises и перемещения (3-я расчетная схема)

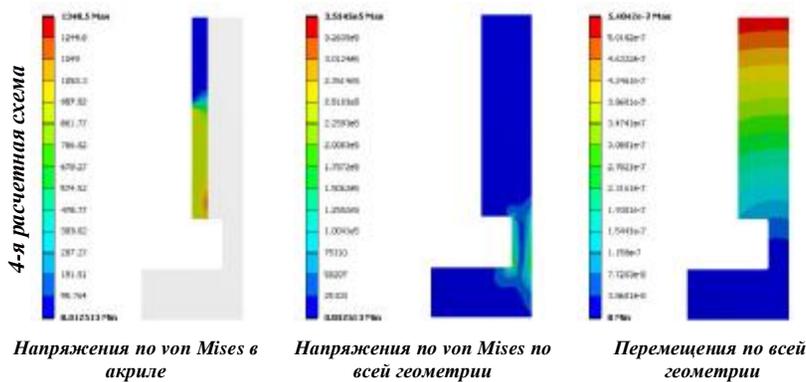


Рис. 8. Напряжения по von Mises и перемещения (4-я расчетная схема)

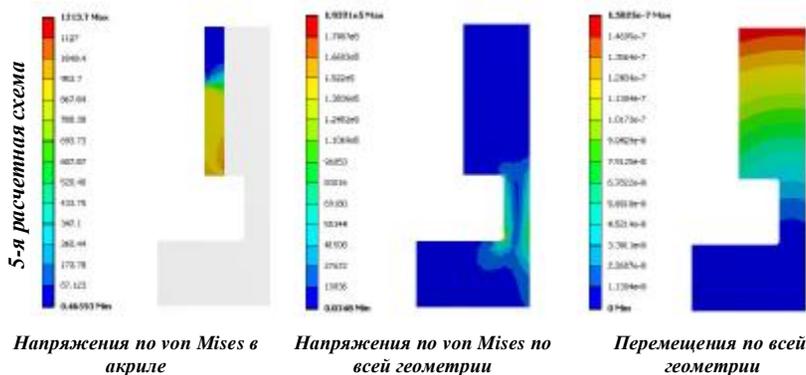


Рис. 9. Напряжения по von Mises и перемещения (1-я расчетная схема)

1. Акриловый слой испытывает напряженно-деформированное состояние, близкое к обжатию в радиальном направлении цилиндрического слоя, опирающегося по внешней образующей на жесткое тело.

2. Уровень перемещений точек акрилового слоя намного выше, чем у точек стальной части цилиндра.

3. Напряжения в стальной части корпуса гидроцилиндра на порядок превышают напряжения в акриловом слое.

Таким образом, при оценке в дальнейшем жесткости в сопряжении “поршень-корпус гидроцилиндра” следует учитывать высокую податливость слоя из низко модульного материала. При оценке же прочности элементов конструкции необходимо соотносить уровень напряжений в каждой отдельной части корпуса с допускаемыми напряжениями для акрила и стали (в данном случае). При примерно равном уровне допускаемых напряжений определяющим является прочность в высоко модульной части тела; при существенно (на два и более порядков)

ниже уровне допустимых напряжений для низко модульного материала – наоборот, в части, изготовленной из этого материала.

**Список литературы.** 1. Боровик А.И., Заярненко Е.И., Ткачук Н.А. Расчет паяных корпусов гидроцилиндров // Вестник машиностроения. – М., 1987. – № 7. 2. Заярненко Е.И., Ткачук Н.А. Автоматизация процесса создания конечно-элементных моделей для исследования напряженно-деформированного состояния корпусов гидроцилиндров // Динамика и прочность машин. – Харьков: ХПИ, 1987. – Вып. 46. 3. Ткачук Н.А., Ткачук Г.В., Рьжков Ю.М. Гидропоры штампов: расчеты прочности и жесткости корпусов // Вопросы оборонной техники. – М., 1991. – Сер.2. – Вып. 4 (233).

Поступила в редколлегию 21.09.09

УДК 623.438:539.3

**Г.Д.ГРИЦЕНКО**, канд. техн. наук, **Н.А.ТКАЧУК**, докт. техн. наук, проф., **Е.В.ПЕЛЕСЬКО**, канд. техн. наук, НТУ „ХПИ”,  
**А.В.ЛИТВИНЕНКО**, канд. техн. наук, ОАО „Головной специализированный конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАКЕТАХ БРОНЕКОРПУСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

У статті описані результати експериментальних досліджень динамічних процесів при дії ударів на макети бронекорпусу БТР-80. Отримані результати є базою для синтезу та оцінки достовірності результатів при числовому моделюванні динамічних процесів у бронекорпусах.

In the paper the results of experimental researches of dynamic processes are described at operating of shocks on the models of BTR-80 armored hull. The got results are the base for a synthesis and estimation of results authenticity at the numerical modeling of dynamic processes in armored hulls.

**Введение.** Как отмечалось в работах [1-3], в настоящее время актуальность и важность исследований динамических процессов в бронекорпусах современных легкобронированных машин (ЛБМ), возникающих при стрельбе из усовершенствованных боевых модулей, определяется и потребностями практики, и недостаточным развитием средств численного моделирования этих процессов, и отсутствием достаточного количества экспериментальных данных об этих процессах. В указанных работах [1-3] разработаны общие подходы к расчетно-экспериментальному исследованию динамических процессов в бронекорпусах, а также описаны методика, аппаратура и некоторые экспериментально полученные результаты.

В данной статье описано продолжение и развитие этой серии экспериментальных исследований, содержащей исследование реакции макета бронекорпуса на имитацию ударного воздействия от реактивных усилий при осуществлении выстрела из боевого модуля.

**1. Методика проведения эксперимента.** Подробно методика проведения аналогичных экспериментов описана в статьях [1-3]. В данном случае использовал-