

Васильев А.Ю., канд. техн. наук; Веретельник О.В., Танченко А.Ю., канд. техн. наук; Мартыненко А.В., канд. техн. наук; Грабовский А.В., канд. техн. наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА КОРПУСА БОЕВЫХ БРОНИРОВАННЫХ МАШИН

Актуальность. В литературе, посвященной описанию процессов обтекания объектов ударной волной от мощных взрывов [1-21], предполагается простая классическая схема распределения давлений по поверхностям. Например, схематичная эпюра прикладываемой нагрузки, моделирующей давление от ударной волны, показана на рис. 1.

Эта же схема практически без изменений используется и во многих современных исследованиях последних лет [4-9]. Как видно из схемы (рис. 1), при таком подходе геометрия обтекаемого объекта существенно не влияет на распределение давлений по поверхностям объекта. Считается, что на весь объект, за исключением лобовой и задней проекции, действует одно и то же избыточное давление ΔP_0 . При этом на лобовую проекцию действует избыточное давление $1.2P_0$, а на заднюю проекцию – $0.8P_0$.

Анализируя результаты проведенных в Украине и за рубежом исследований по воздействию взрывных волн различного характера с различными объектами [4-12], а также анализируя результаты газо-гидродинамических исследований различных объектов [12-14], можно с уверенностью сказать, что реальная физика процесса сильно отличается от принятой модели. В действительности характер распределения зон избыточного и пониженного давления, а также их величины, как указывается в статье [21], сильно зависят от следующих факторов: – геометрия внешних обводов объекта; – направление движения фронта волны; – скорость фронта волны; – величина давления во фронте волны; – длительность ударной волны.

Кроме того, в общем случае:

- процесс обтекания ударной волной объекта является высоконелинейным динамическим процессом;
- процесс происходит со скоростями, близкими к скорости звука, т.е. в разных частях поток может находиться как в звуковой, так и в дозвуковой или зазвуковой области, что существенно усложняет численное исследование процесса;
- объекты не являются абсолютно твердыми и при обтекании ударной волной могут деформироваться, в результате чего также может меняться характер обтекания.

Таким образом, на сегодняшний день отсутствует методика численного моделирования обтекания ударной волной корпусов различных машин с учетом их формы. В то же время в связи с резко возрастающими потребностями проектирования легкобронированных машин (ЛБМ), устойчивых к широкому спектру поражающих факторов, необходимо перед принятием проектных решений проводить численные исследования с варьированием как геометрических параметров конструкции ЛБМ, так и свойств-параметров самой ударной волны. Эта задача и является предметом данной статьи.

Постановка задачи. В статье [21] описана общая постановка задачи обтекания корпусов легкобронированных машин ударной волной. В данной работе она была использована, адаптирована и развита в части дополнения учитываемых

© А.Ю. Васильев, 2014

факторов. Рассматривался также такой важный фактор как направление прихода ударной волны.

Цель работы – компьютерное моделирование процесса встречи ЛБМ с ударной волной на открытом пространстве. Размеры расчетной области – 30м*30м*10м (ширина, глубина, высота). Подобные размеры выбраны для исключения влияния краевых эффектов. Граничные условия моделируют ситуацию, происходящую при нахождении ЛБМ в области максимальных давлений фронта ударной волны. Для этого, в качестве входного условия задается скорость потока, равная 300 м/с, в качестве выходного – задается величина максимального избыточного давления во фронте 100 кПа.

Расчет выполнялся с помощью CAE системы Autodesk Simulation CFD 2015, основанной на методе конечных элементов (МКЭ). Средняя величина ребра конечных элементов (КЭ) на геометрии ЛБМ – 10 см (рис. 2). Для уточнения поведения потока вблизи машины моделируются пристеночные слои в количестве 3 шт.

При проведении тестовых исследований проводилось варьирование положения машины по отношению к потоку. Угол между продольной осью машины и вектором движения потока изменялся в диапазоне от 0 до 180° с шагом в 30°.

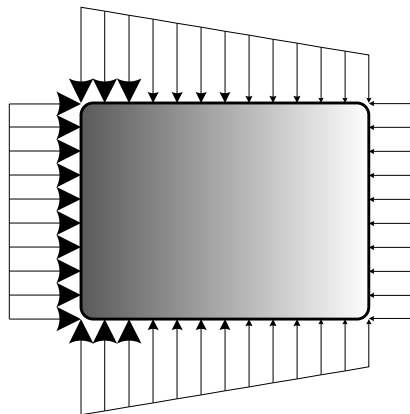


Рис. 1. Традиционная схема распределения давлений по поверхностям боевой машины

Методика исследований. Движение и теплообмен текучей среды моделируется в нестационарной постановке с помощью уравнений Навье-Стокса (1), описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0, \quad (1)$$

где t — время, u — скорость текучей среды ρ — плотность текучей среды.

В общем случае, для сложной (произвольной) расчетной области, решить аналитически описанную выше задачу невозможно. Для решения поставленной задачи использовался численный метод решения на базе метода конечных элементов, реализованный в программном комплексе Autodesk Simulation CFD [18]. Более подробно методика исследований приведена в [21].

Результаты исследований. На рис. 3–5 представлены результаты решения тестовых задач. В качестве исследуемых объектов были выбраны следующие ЛБМ: БТР-80, БМП-2 и БМД-2. Картины распределения приведены в гамме оттенков от минимума до максимума.

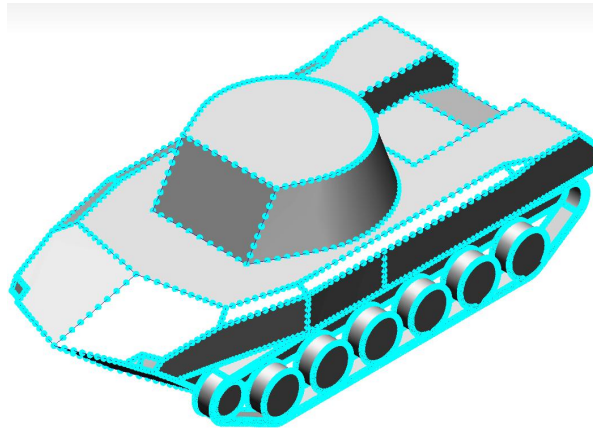


Рис. 2. Настройка для автоматической генерации КЭ сетки для БМД

Все эти машины стоят на вооружении украинской армии. Корпуса имеют значительные различия по форме, типу движителя и вариантам модификаций в зависимости от выполняемой задачи. Также все перечисленные ЛБМ имеют модификации для выполнения различных тактических задач. Кроме расчета газодинамических характеристик потока, в статье предлагается провести сравнительный анализ процесса обтекания, а также выработать интегральные характеристики для оценки машины.

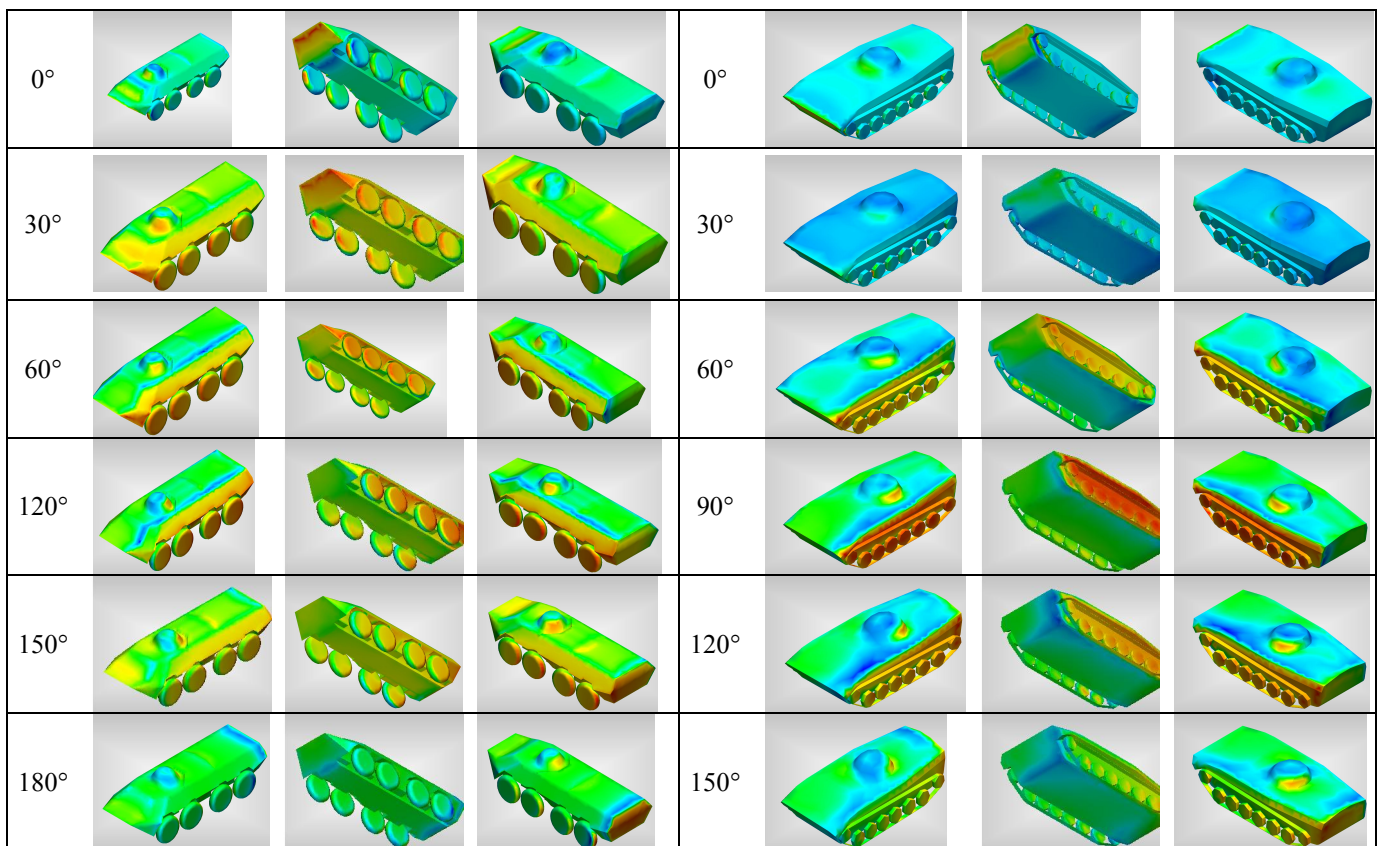


Рис. 3. Картины распределения давлений при обтекании БТР-80 ударной волной в зависимости от различных углов встречи

Рис. 4. Картины распределения давлений при обтекании BMP-2 ударной волной, в зависимости от различных углов встречи

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- 1) вблизи корпуса боевой машины скорость потока снижается;

- за корпусом (по отношению к потоку) образуется «мертвая зона» с очень низкими скоростями воздуха (до 0 м/с);
- 2) за корпусом (по отношению к потоку) может образовываться зона с вихревым течением и противотоком;
- 3) зоны застоя воздуха и вихревого течения (аналогичные пунктам 2 и 3) образуются также фронтальными (по отношению к потоку) и задними поверхностями машины и крупного внешнего оборудования (к примеру, башни, движители);
- 4) на краях корпуса и внешнего оборудования образуются зоны «срыва потока», в которых скорость воздуха существенно выше средней по потоку;
- для ЛБМ с колесным движителем колесные арки также являются зонами сложного течения;
- 5) для углов встречи больших 60° характерно наличие зоны резкого перехода от высокого давления, к низкому давлению (в т.ч. и разрежения), за счет чего локально может возникать крутящий момент, опасный для сварных швов машины

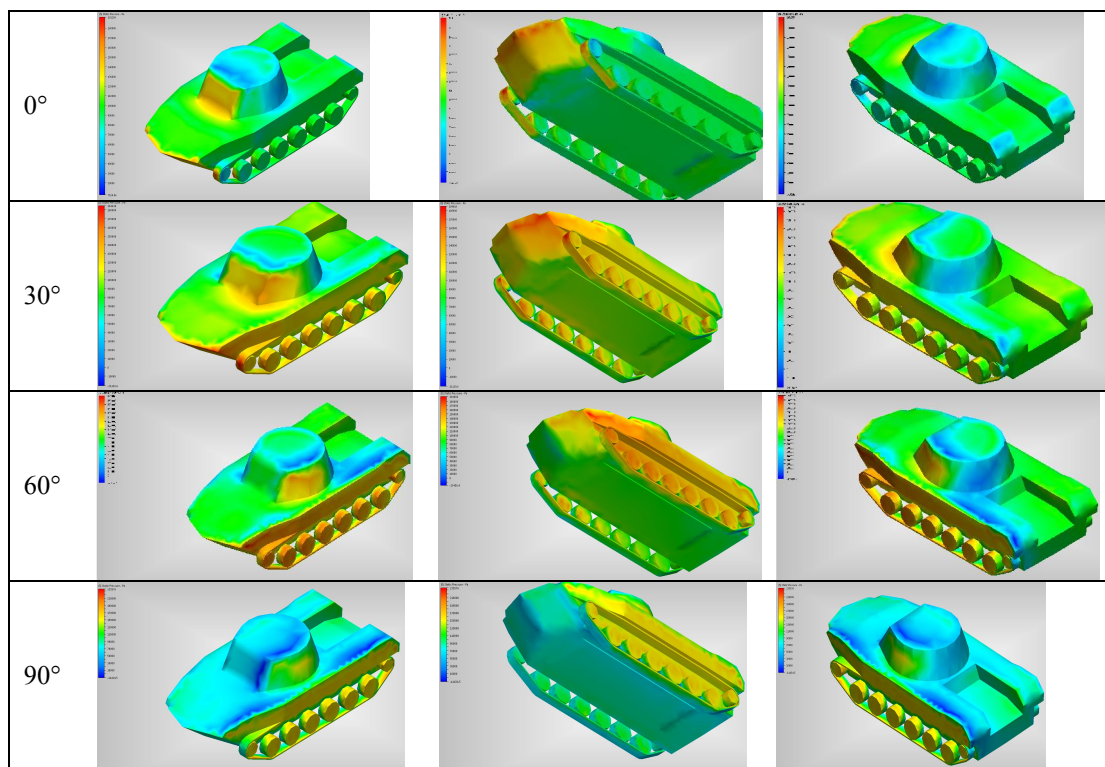


Рис. 5. Картины распределения давлений при обтекании БМД-2 ударной волной, в зависимости от различных углов встречи

При избыточном давлении $\Delta P=100\text{КПа}$ во фронте волны, минимальное давление по машине на элементы корпуса рассмотренных машин может меняться в пределах от -50 до 30 КПа, максимальное давление по машине варьируется в пределах 154 – 340 КПа (максимум по машине). В то же время, если рассматривать интегральное значение давлений на бронелисты, то передние (по отношению к потоку) проекции воспринимают от 0.75 до 1.5 относительно исходного избыточного давления. Таким образом, можно заметить, что не только геометрия внешнего обвода корпуса ЛБМ влияет на обтекание, но и ориентация машины по отношению к потоку. Также следует учесть, что разные проекции машины обладают существенным различием по толщине бронелистов и структуре усиления. Например, для многих гусеничных машин, с учетом уменьшенной толщины листов задней проекции и наличия дверей для высадки десанта, последствия могут быть критическими при существенно более низких значениях

избыточного давления. Кроме того, следует учесть, что на некоторые зоны машины действует не просто разреженное давление, а комбинация повышенного и разреженного, что создает крутящий эффект в данной зоне.

Выводы. Как видно из представленных результатов, характер распределения давления сильно зависит как от геометрии объекта, так и от направления распространения ударной волны. Можно с уверенностью сказать, что на распределение давлений по элементам машины влияет и множество других факторов, указанных ранее (например, строения, расположенные вблизи). Следует отметить, что в результате тестовых расчетов были также получены значения интегральных сил, действующих на машину в целом. Значения данных сил сравнимы или существенно превышают массу машины. Косвенно в качестве подтверждения этого факта можно назвать явления сдвига или даже переворота машин, не прикрепленных к «земле», при испытаниях. Однако говорить о конкретных величинах действующих сил можно будет только проведя дополнительные исследования, в том числе и в динамической постановке. В то же время, следует отметить, что время, за которое происходит деформация элементов бронекорпуса, существенно меньше времени на передвижение машины как единого целого. При этом даже для существенно различающихся машин и для различных направлений встречи есть возможность сделать некоторые обобщения:

- в зонах минимального давления действует около ± 0.5 от исходного избыточного;
- зоны с минимальным давлением (от -0.5 до -0.2) располагаются не только с противоположной относительно потока стороны машины, но и на поверхностях, близких к горизонтальным и примыкающим к зонам максимального давления;
- на противоположной (относительно потока) стороне машины действует давление около 0.5 (против 0.8 по ранее принятым методикам);
- среднее давление на передние листы (относительно потока) достигает от 0.75 до 1.5 (против 1.2 по ранее принятым методикам).

Также были получены некоторые принципиально новые результаты (интегральная сила, локальное кручение элементов бронекорпуса от давления), которые требуют дополнительных исследований, так как при отсутствии их учета могут возникнуть существенные погрешности при расчете воздействия ударной волны на корпус.

Используемый программный комплекс (Autodesk Simulation CFD) является удобным инструментом предварительного анализа за счет существующих методов построения оптимизированной (сбалансированной по точности и скорости расчета) сетки, методов сгущения, скорости счета. За счет того, что он основан на МКЭ, он является более предпочтительным для дальнейших исследований, чем использованный в работах ранее Cosmos FloWorks [21].

Дальнейшим направлением исследований является уточнение постановки (например, расширение ее до динамической) и расчет влияния большего количества параметров ударной волны.

Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для сравнения степени нагруженности ЛБМ разного типа эффектами от воздействия взрывных волн. Разработанные критерии применимы лишь для грубого сравнения машин, и необходима разработка более качественных интегральных характеристик. Для этого необходимо рассмотреть больше типов корпусов, провести анализ влияния внешнего оборудования (к примеру, различных типов вооружения) и модификаций на характер обтекания машины потоком, а также рассмотреть большее количество выходных параметров и большего количества характеристик потока.

Кроме того, полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем как основа для корректного задания нагрузок от ударной волны при расчете напряженно-деформированного состояния корпусов транспортных средств специального назначения.

Литература: 1. Чобиток В.А., Брижинёв Ю.Н., Долганов А.А., Мирошник А.В. Конструкция и расчёт танков и БМП. – М.: Воениздат, 1984. – 376 с. 2. Буров С.С. Конструкция и расчёт танков. – М.: Изд-во Академии им. Малиновского Р.Я., 1973. – 602 с. 3. Балдин. В.А. Теория и конструкция танка. – М.: Воениздат, 1975. – 442 с. 4. Васильев А.Ю., Пелешко Е.В. Построение параметрических моделей корпусов многоцелевых транспортеров для расчета их прочностных и жесткостных характеристик // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск „Колесные и гусеничные машины специального назначения” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. – № 28. – С.102-112. 5. Васильев А.Ю. К вопросу о деформировании корпусов транспортных средств под действием ударных нагрузок характеристик // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск „Динамика и прочность машин” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – № 47. – С. 42-50. 6. Пономарев Е.П., Васильев А.Ю. К вопросу о проведении многовариантного анализа напряженно-деформированного состояния корпуса МТ-ЛБ // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск „Механіка та машинобудування” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – № 1. – С.289-294 7. Бруль С.Т., Васильев А.Ю. К вопросу о моделировании воздействия ударной волны на корпус боевой машины// Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск „Машиноведение и САПР” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – № 53. – С.29-34. 8. Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск „Механіка та машинобудування” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005, №1. – С.184-194 9. Бруль С.Т. Моделирование реакции корпуса боевой машины на действие подвижной нагрузки: теория, методы и модели // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип. : Машинознавство та САПР. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2007. – № 3. – С.24-43. 10. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия. – М.: Мир, 1986. Кн. 1.– 319 с.; Кн. 2. – 384 с. 11. Физика взрыва // Под ред. К.П. Станюковича.– М.: Наука, 1975. – 704 с. 12. Губайдуллин А.А., Ивандаев А.И., Нигматулин Р.И. Некоторые результаты численного исследования нестационарных волн в газовзвесьях // Изв. АН СССР, МЖГ. 1976.– № 5. – С. 64-69. 13. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа – М.: Мир, 1986. – с.184. 14. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. Изд. 2-е, переработ. М.-Л. Госэнергоиздат, 1961 15. <http://www.top500.org> 16. <http://tensor.org.ua> 17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с. 18 <http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2014/ENU/> 19. Гірін О.Г. Газова динаміка // Навч. посібн. Одеса: Астропринт, 2007. – 208 с. 20 . Гірін О.Г. Чисельні методи у газовій динаміці // Навч. посібн. Одеса: Астропринт, 2006. – 168 с. 21. Васильев А.Ю. Исследование процесса обтекания корпусов легкобронированных машин ударной волной / А.Ю. Васильев // Механіка та машинобудування. – 2009. – №1, С. 96-107.

Bibliography (transliterated): 1. Chobitok V.A., BrizhinYov Yu.N., Dolganov A.A., Miroshnik A.V. Konstruktsiya i raschYot tankov i BMP. – М.: Voениzdat, 1984. – 376 s. 2. Burov S.S. Konstruktsiya i raschYot tankov. – М.: Izd-vo Akademii im. Malinovskogo R.Ya., 1973. – 602 s. 3. Baldin. V.A. Teoriya i konstruktsiya tanka. – М.: Voениzdat, 1975. – 442 s. 4. Vasilev A.Y., Peleshko E.V. Postroenie parametriceskih modeley korpusov mnogotselevyih transporterov dlya rascheta ih prochnostnyih i zhestkostnyih harakteristik // Vestnik NTU “KhPI”. Tematicheskiy vyipusk „Kolesnyie i gusenichnyie mashinyi spetsialnogo naznacheniya” – Kharkov: NTU “KhPI”, 2003. – # 28. – S.102-112. 5. Vasilev A.Y. K voprosu o deformirovanii korpusov transportnyih sredstv pod deystviem

udarnykh nagruzok karakteristik // Vestnik NTU "KhPI". Tematicheskii vyipusk „Dinamika i prochnost mashin” – Kharkov: NTU “KhPI”, 2005. – # 47. – S. 42-50. 6. Ponomarev E.P., Vasilev A.Y. K voprosu o provedenii mnogovariantnogo analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya korpusa MT-LB // Vestnik NTU “KhPI”. Tematicheskii vyipusk „Mehanika ta mashinobuduvannya” – Kharkov: NTU “KhPI”, 2005. – # 1. – S.289-294 7. Brul S.T., Vasilev A.Y. K voprosu o modelirovanii vozdeystviya udarnoy volny na korpus boevoy mashiny// Vestnik NTU “KhPI”. Tematicheskii vyipusk „Mashinovedenie i SAPR” – Kharkov: NTU “KhPI”, 2005. – # 53. – S.29-34. 8. Tkachuk N.A., Brul S.T., Malakey A.N., Gritsenko G.D., Orlov E.A. Struktura spetsializirovannykh integrirovannykh sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza elementov transportnykh sredstv spetsialnogo naznacheniya // Vestnik NTU “KhPI”. Tematicheskii vyipusk „Mehanika ta mashinobuduvannya” – Kharkov: NTU “KhPI”, 2005, #1. – S.184-194 9. Brul S.T. Modelirovanie reaktsii korpusa boevoy mashiny na deystvie podvizhnoy nagruzki: teoriya, metody i modeli // VIsnik NTU „KhPI”. Tem. vip. : Mashinostnavstvo ta SAPR. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2007. – # 3. C.24-43. 10. Beyker U., Koks P., Uestayn P. i dr. Vzryivnyie yavleniya. Otsenka i posledstviya. – M.: Mir, 1986. Kn. 1.– 319 s.; Kn. 2. – 384 s. 11. Fizika vzryiva // Pod red. K.P. Stanyukovicha.– M.: Nauka, 1975. – 704 s. 12. Gubaydullin A.A., Ivandaev A.I., Nigmatulin R.I. Nekotoryie rezultaty chislennogo issledovaniya nestatsionarnykh voln v gazovzvesyah // Izv. AN SSSR, MZhG. 1976.– # 5. – S. 64-69. 13. Van-Dayk M. Albom techeniy zhidkosti i gaza – M.: Mir, 1986. – s.184. 14. Deych M.E. Tehnicheskaya gazodinamika. Izd. 2-e, pererabot. M.-L. Gosenergoizdat, 1961 15. <http://www.top500.org> 16. <http://tensor.org.ua> 17. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika. T. VI. Gidrodinamika. – M.: Nauka, 1986. – 736 s. 18 <http://help.autodesk.com/view /SCDSE/2014/ENU/> 19. GIrIn O.G. Gazova dinamika // Navch. posIbn. Odesa: Astroprint, 2007. – 208 s. 20 . GIrIn O.G. Chiselni metodi u gazoviy dinamitsi // Navch. posIbn. Odesa: Astroprint, 2006. – 168 s. 21. Vasilev A.Y. Issledovanie protsessa obtekaniya korpusov legkobronirovannykh mashin udarnoy volnoy / A.Y. Vasilev // Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2009. – #1, S. 96-107.

Васильев А.Ю., Веретельник О.В., Танченко А.Ю., Мартыненко А.В., Грабовский А.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА КОРПУСА БОЕВЫХ БРОНИРОВАННЫХ МАШИН

В статье предложена новая методика анализа процесса обтекания корпусов различных легкобронированных машин ударной волной от мощного взрыва различного происхождения.

Васильев А.Ю., Веретельник О.В., Танченко А.Ю., Мартыненко А.В., Грабовський А.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ГАЗОДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОРПУС БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН

У статті запропонована нова методика аналізу процесу обтікання корпусів різних легкоброньованих машин ударною хвилею від потужного вибуху різного походження.

Vasilev A.Y., Veretelnik O.V., Tanchenko A.Y., Martynenko A.V., Grabovskiy A.V.

MODELING OF THE IMPACT OF FLUID FORCES ON ARMOURED COMBAT VEHICLES

This paper proposes a new method of analysis of the flow past buildings of different light armored vehicles from the powerful shock wave of the explosion of different origin.