

# ДИНАМІКА ТА МІЦНІСТЬ МАШИН

УДК 539.3: 623.438

Васильев А.Ю.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБТЕКАНИЯ КОРПУСОВ ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

**1. Актуальность задачи.** В литературе [1-3], посвященной описанию процессов обтекания военных колесно-гусеничных машин (ВГКМ) ударной волной от мощных взрывов, предполагается простая схема распределения давлений по поверхностям (пример схематичной эпюры показан на рис. 1).

Эта же схема практически без изменений используется и во многих исследованиях последних лет [4-9]. Как видно из схемы, 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  $\Delta P_0$ . При этом на лобовую проекцию действует избыточное давление  $1.2P_0$ , а на заднюю проекцию –  $0.8P_0$ .

Анализируя результаты исследований, проведенных в Украине и за рубежом, по взаимодействию ударных 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 сильно зависят от следующих факторов: геометрия внешних обводов объекта; направление движения фронта волны; скорость фронта волны; величина давления во фронте волны; протяженность ударной волны. Кроме того, в общем случае воздействия ударной волны на ВГКМ можно отметить следующие существенные факторы: процесс обтекания ударной волной объекта является динамическим (время прохождения волны около  $20 \div 30$  мкс) и высоконелинейным; 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 потребностями проектирования легкобронированных машин (ЛБМ), устойчивых к широкому спектру поражающих факторов, необходимо перед

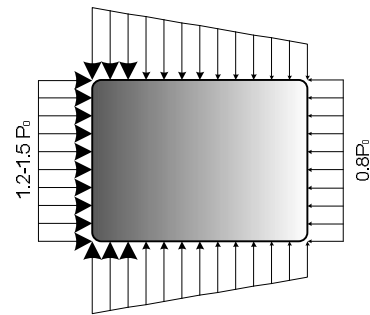


Рисунок 1 – Традиционная схема распределения давлений по поверхностям боевой машины

принятием проектных решений проводить численные исследования с варьированием как геометрических, так и параметров самой ударной волны. В силу этого актуальной и важной является задача разработки методов и моделей для исследования напряженно-деформированного состояния процесса обтекания корпусов легкобронированных машин ударной волной. Эта задача и является предметом данной статьи.

**2. Постановка задачи.** Несмотря на развитие возможностей теоретических и численных методов, а также возможностей вычислительной техники, решение описанной задачи в полной постановке является чрезвычайно сложной задачей. Это связано с отсутствием (с невозможностью точно определить) большого количества исходных данных, отсутствием доступа к высокопроизводительной технике, которая могла бы решить задачу в полной постановке (на порядки больше того, что есть сейчас в распоряжении исследователей), и большой продолжительностью подобных расчетов [15,16]. Таким образом, для получения более адекватных сведений о распределении давления по корпусу боевой машины необходимо проводить длительные исследования с поэтапным усложнением (уточнением) расчетной модели (с постепенным приближением расчетной модели к реальным условиям).

На первом этапе предлагается следующий подход:

- геометрия исследуемой ЛБМ представлена основными конструктивными параметрами корпуса и движителя;
- мелкие элементы машины снаружи корпуса, которые влияют на распределение потока лишь в локальных зонах, не моделируются;
- движитель моделируется без некоторых небольших элементов подвески;
- корпус моделируется цельным без внутреннего устройства ЛБМ;
- затеканием потока внутрь корпуса через щели люков – пренебрегается;
- расчетная область, в которую «погружена» машина, моделируется в виде канала с прямоугольным сечением;
- продольная ось ЛБМ ориентирована вдоль канала;
- движение воздуха обеспечивает граничное условие на входе  $V_{\text{вх}}=300$  м/с;
- величина избыточного давления регулируется путем задания выходного статического давления величиной  $P_{\text{вых}} = P_{\text{атм}} + \Delta P_0$ .

Приведенные упрощения можно использовать в связи с тем, что: мелкие элементы снаружи ЛБМ слабо влияют на общие характеристики потока и вносят лишь локальные возмущения; при расчете режима обтекания давление затекания влияет достаточно слабо; в первом приближении, для определения характера обтекания, поток от ударной волны, можно считать квазистатическим, так как изменение величины избыточного давления волны вдоль корпуса в каждый момент времени – минимальны (рис.2)

В качестве исследуемых объектов были выбраны ЛБМ, показанные на рис. 3-7: БМП-3 (гусеничный движитель, шесть катков, заднее ведущее колесо), рис.3; БРДМ-2 (колесный движитель, восемь колес, колесная формула 4x4), рис. 4; БТР-80 (колесный движитель, восемь колес, колесная формула 8x8), рис. 5; МТ-ЛБ (гусеничный движитель, шесть катков, передняя ведущая звездочка), рис.6; НММWV M998 (High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle) «ХАММЕР» (колесный движитель, четыре колеса, колесная формула 4x4), рис. 7.

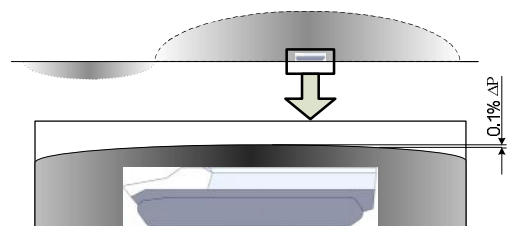


Рисунок 2 – Соотношение длин корпуса ЛБМ и фронта ударной волны



Рисунок 3 – БМП-3



Рисунок 4 – БРДМ-2



Рисунок 5 – БТР-80

Все эти машины имеют значительные различия между собой по форме и размерам корпуса, типу движителя. Все перечисленные ЛБМ имеют модификации для выполнения различных тактических задач.

Кроме собственно расчета газодинамических характеристик потока, в статье предлагается провести сравнительный анализ процесса обтекания, а также выработать первичные интегральные характеристики для оценки машины в первом приближении.



Рисунок 6 – МТ-ЛБ



Рисунок 7 – "ХАММЕР"

Таблица 1

Рамерность расчетных моделей

Тип корпуса	Количество ячеек (тыс.)
БМП-3	47,9
БРДМ-2	16,6
БТР-80	34,3
МТ-ЛБ	23,2
"ХАММЕР"	50,9

**3. Методика исследований.** Движение и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса [18-21]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0, k = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $t$  — время,  $u$  — скорость текучей среды  $\rho$  — плотность текучей среды, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды.

В общем случае, аналитически для сложной (произвольной) расчетной области решить описанную выше задачу невозможно. Для решения поставленной задачи использовался численный метод решения на базе модифицированного метода конечных разностей (МКР), реализованного в программном комплексе COSMOSFloWorks [19, 21]. Более подробно методика исследований приведена в [22].

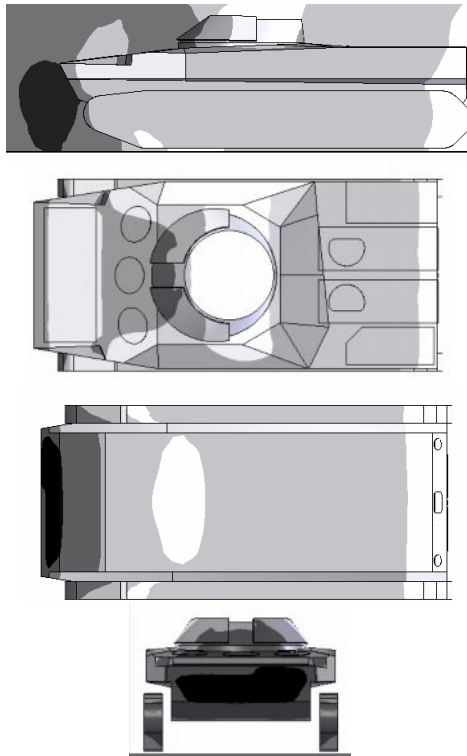


Рисунок 8 – Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса БМП-3 (проекционные виды)

Расчетная сетка строилась из кубических ячеек базовой и уменьшенной размерности. Вблизи внешних обводов корпусов ЛБМ было задано сгущение сетки до восьми раз по сравнению с основной расчетной областью. Размерность расчетных моделей (количество расчетных ячеек) для корпусов разного типа указана в табл. 1. Существенная разница в количестве расчетных ячеек обусловлена различием в сложности геометрии корпусов и в типе движителя.

**4. Результаты расчетов.** На рис. 8-20 показаны картины распределения давлений при обтекании бронекорпусов различных машин. На этих рисунках различным давлениям соответствуют различные градации серого цвета: от светлого (минимум для данной машины), до темного (соответственно максимум). На рис. 8, 10, 13, 16, 19 показаны проекционные виды, на рис. 9, 12, 14, 17, 20 - изометрические. Рис. 11, 15, 18 показывают картину распределения давления в потоке в продольном вертикальном сечении канала по среднему продольному сечению машины.

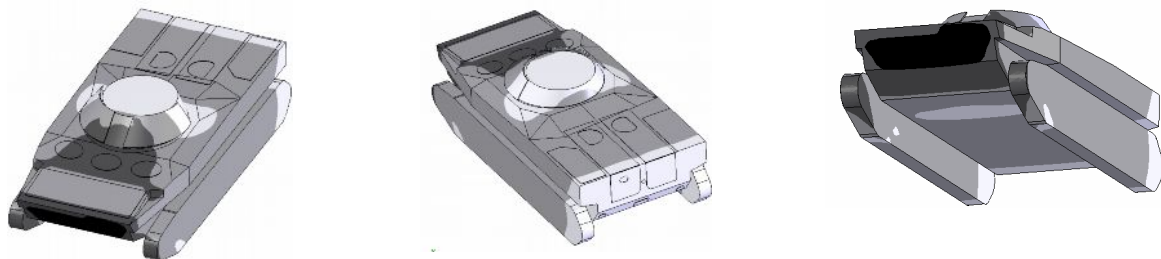


Рисунок 9 – Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса БМП-3 (изометрические виды)

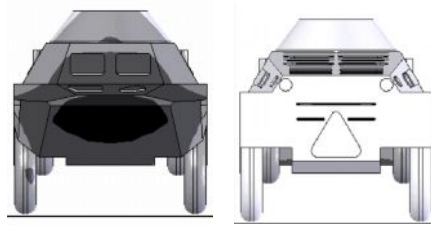


Рисунок 10 - Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса БРДМ-2 (проекционные виды)

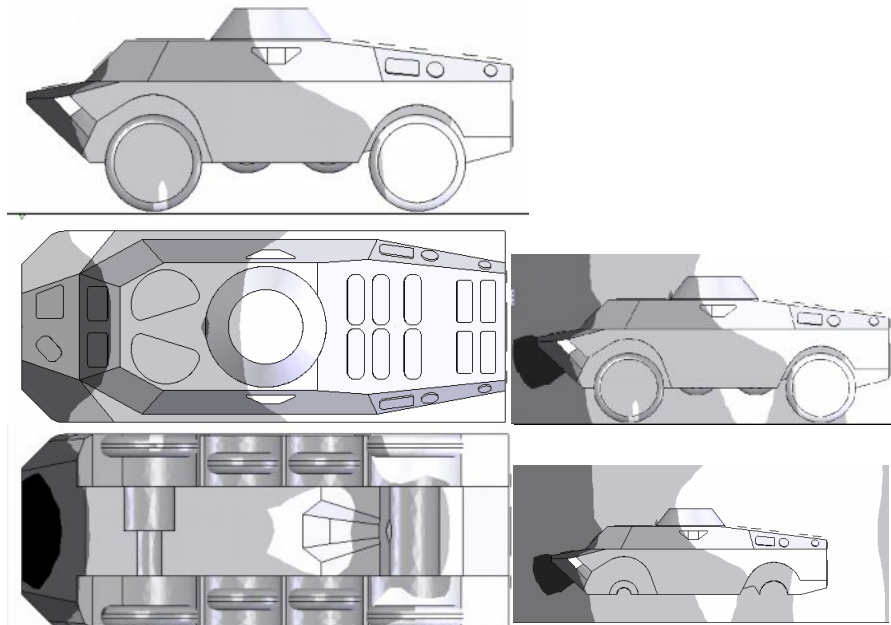


Рисунок 11 – Картина распределения давления при обтекании БРДМ-2 ударной волной в вертикальной срединной плоскости



Рисунок 12 – Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса БРДМ-2 (изометрические виды)

На рис. 8 и 9 отображены результаты расчета обтекания корпуса БМП-3 ударной волной. На рис. 10-12 показаны результаты расчета процесса обтекания ударной волной корпуса БРДМ-2. На рис.13-15 показаны результаты полученные при расчете огибания высокоскоростным потоком корпуса БТР-80. Картины распределения давлений для задачи обтекания корпуса МТ-ЛБ ударной волной показаны на рис. 16-18. На рис. 19, 20 приведены некоторые результаты расчета корпуса боевой машины «ХАММЕР» при взаимодействии с воздушным потоком, имитирующем действие ударной волны от мощного взрыва. На рис. 21 представлена картина распределения скоростей в вертикальной срединной плоскости корпусов БРДМ-2 (рис.21, а), БТР-80 (рис. 21, б), МТ-ЛБ (рис. 21, в). Принцип раскраски аналогичен использованному ранее для визуализации картины распределения давлений.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Вблизи корпуса боевой машины скорость потока снижается.
2. За корпусом образуется «мертвая зона» с очень низкими скоростями воздуха (до 0 м/с).
3. Фронтальные поверхности корпуса также образуют «мертвые зоны», хотя в них скорости снижаются в среднем лишь наполовину.
4. Зоны замедления потока воздуха (аналогичные пунктам 2 и 3) образуются также фронтальными и задними поверхностями крупных внешних элементов (к примеру, башни, движители).

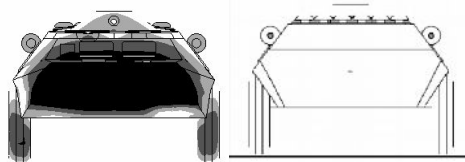


Рисунок 13 – Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса БТР-80 (проекционные виды)

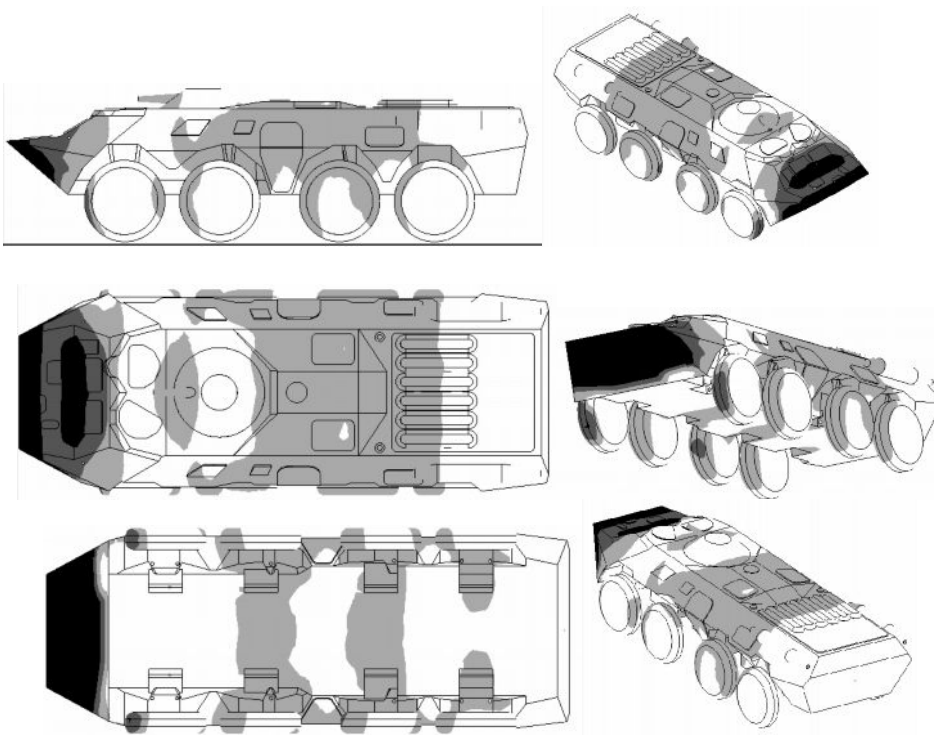


Рисунок 14 – Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса БТР-80 (изометрические виды)

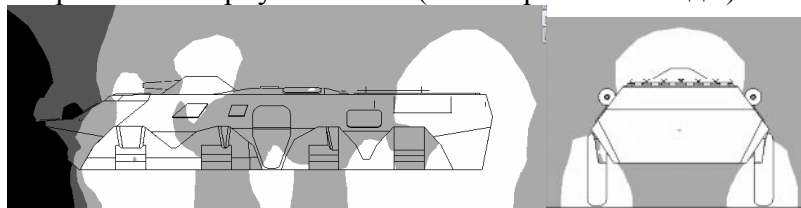


Рисунок 15 – Картина распределения давления при обтекании БТР-80 ударной волной в вертикальной срединной плоскости

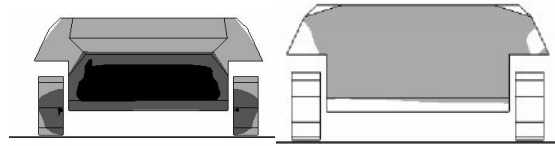


Рисунок 16 – Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса МТ-ЛБ (проекторные виды)

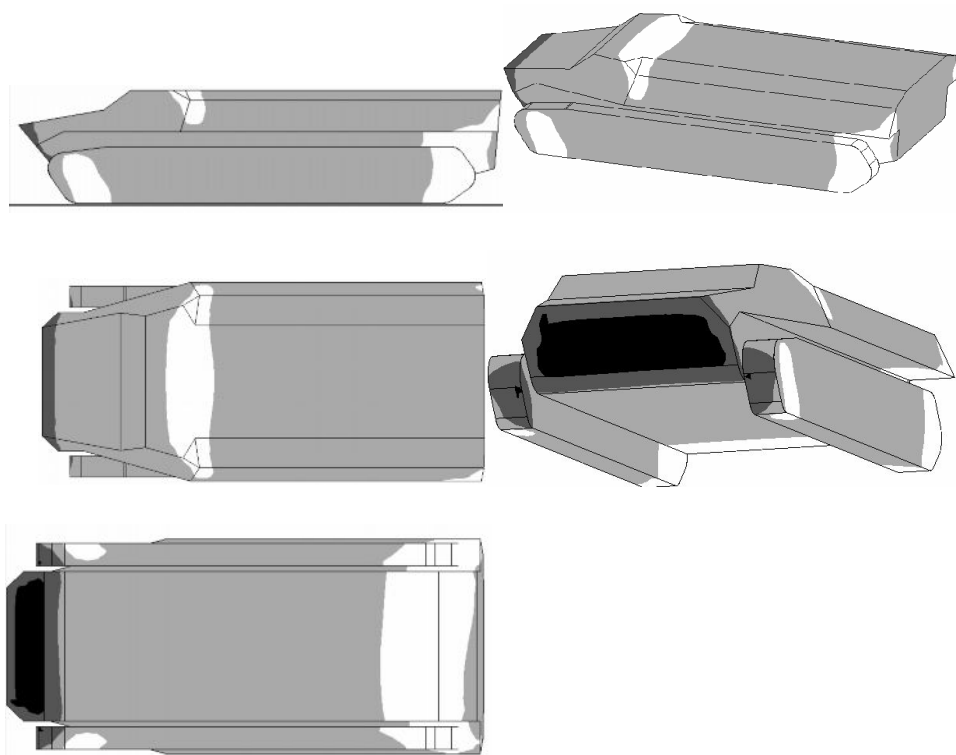


Рисунок 17 – Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса МТ-ЛБ (изометрические виды)

5. На краях корпуса и внешних элементах образуются зоны «срыва потока», в которых скорость воздуха существенно выше средней по потоку.

6. Для ЛБМ с колесным двигателем колесные арки также являются зонами «замедления» и пониженного давления по сравнению с остальным потоком.

Рис. 22, 23 демонстрируют примеры изоповерхностей равного уровня давления, возникающих в процессе обтекания корпусов боевых машин БТР-80 (рис. 22) и МТ-ЛБ (рис. 23). Характер поверхностей равного уровня позволяет судить о характере огибания объекта фронтом ударной волны («прилипание» потока к корпусу, «разрезание» корпусом потока, «лобовой удар» и т.п.).

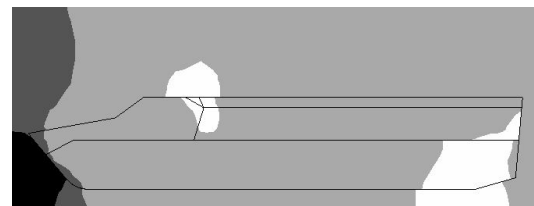


Рисунок 18 – Картина распределения давления при обтекании МТ-ЛБ ударной волной в вертикальной срединной плоскости

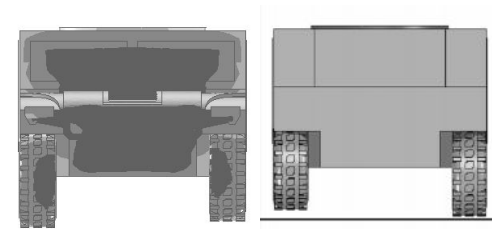


Рисунок 19 – Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса «ХАММЕР» (проеекционные виды)

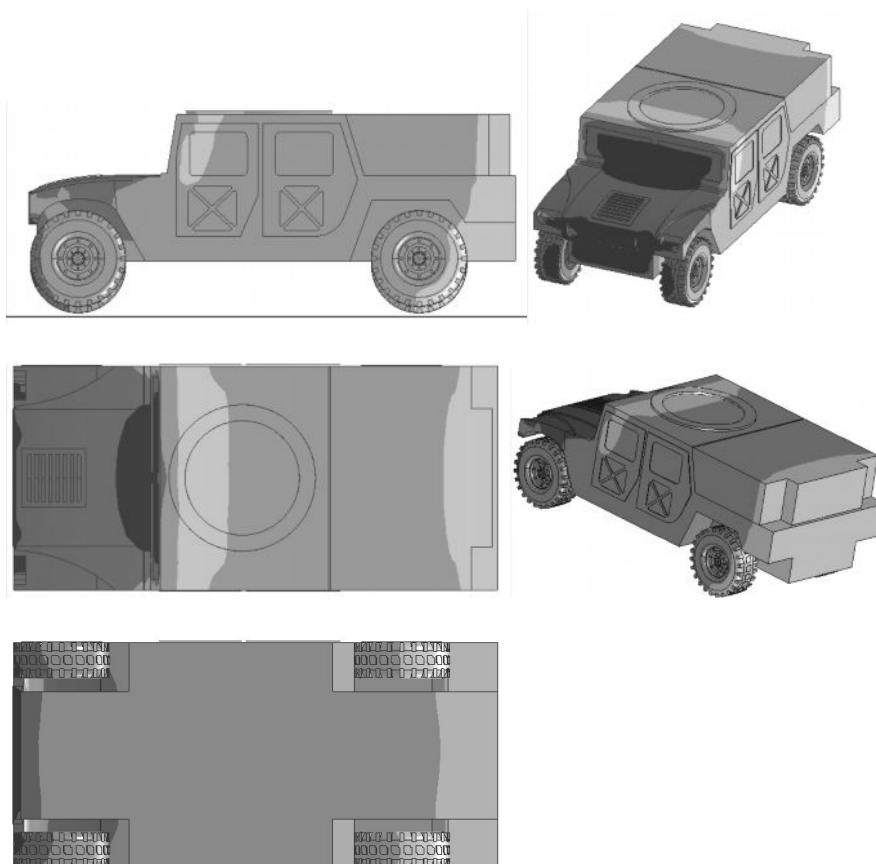
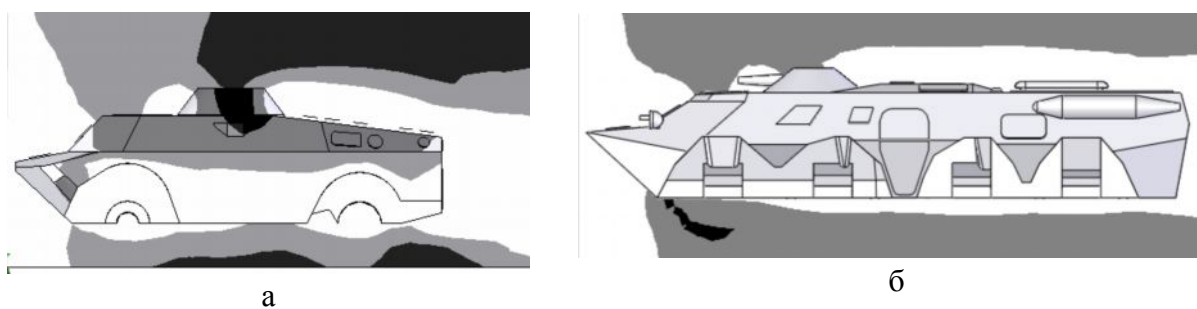
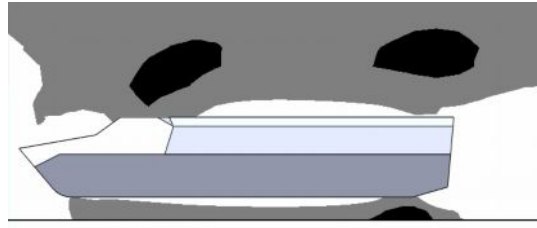


Рисунок 20 – Картина распределения давления по внешним поверхностям корпуса «ХАММЕР» (изометрические виды)







в

Рисунок 21 – Сравнение картин распределения скоростей воздушного потока при обтекании различных корпусов ЛБМ (срез вертикальной срединной продольной плоскостью): а – БРДМ-2; б – БТР-80; в – МТ-ЛБ

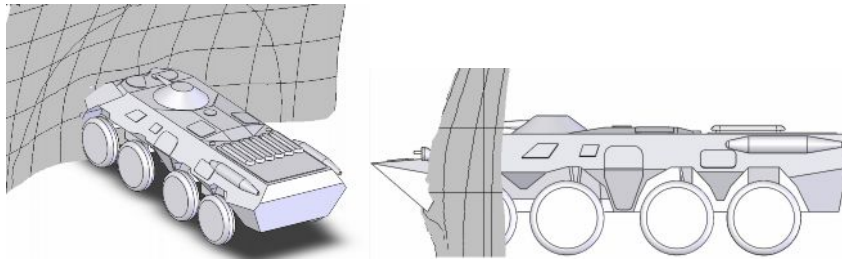


Рисунок 22 – Пример огибания ударной волной корпуса БТР-80

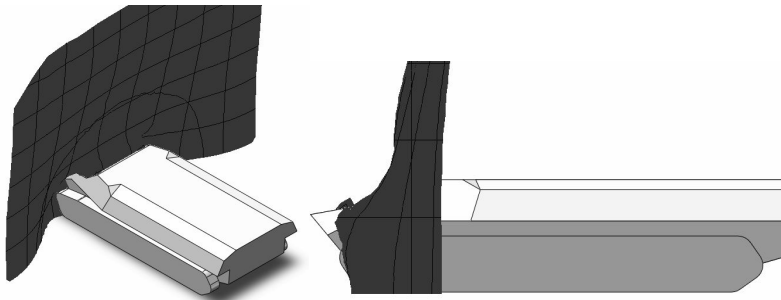


Рисунок 23 – Пример огибания ударной волной корпуса МТ-

В табл. 2-5 и на рис. 24, а и 24, б приведены некоторые характерные результаты по разбросу значений давления по поверхностям корпусов боевых машин. При избыточном давлении  $\Delta P = 65$  кПа во фронте волны, полное давление на элементы корпуса может меняться в пределах  $70 \div 160$  кПа (минимум по машине) до  $248 \div 956$  кПа (максимум по машине). Таким образом, можно заметить, что геометрия внешнего обвода корпуса ЛБМ может быть такова, что на некоторые зоны корпуса боевой машины может действовать давление ниже атмосферного (30% атмосферного), а в некоторых зонах – выше среднего избыточного давления во фронте. Среднее давление на корпус будет в пределах  $27 - 370$  кПа (41-570% от исходной величины избыточного давления), а в некоторых зонах давление будет существенно превышать исходное избыточное.

Таблица 2

Разброс значений полных давлений по поверхностям корпусов ЛБМ, кПа

Вид ВГКМ	Мин.	Ср.	Макс.
БМП-3	131.8	279.3	572.4

Таблица 3

Разброс значений избыточных давлений по поверхностям корпусов ЛБМ, кПа

Вид ВГКМ	Мин. разн.	Средн. разн.	Макс. разн.
БМП-3	30.5	178	471.1

БРДМ-2	129.3	210.6	403.7
БТР-80	137	198.2	336.3
МТ-ЛБ	70.5	128	247.5
"ХАММЕР"	160.5	474.1	956.3

БРДМ-2	28	109.3	302.4
БТР-80	35.7	96.9	235
МТ-ЛБ	-30.8	26.6	146.2
"ХАММЕР"	59.2	372.8	855

Таблица 4

Приведенные значения избыточных давлений

Вид ВГКМ	(м-101325) /65000	Ср.	Макс.
БМП-3	0.47	2.74	7.25
БРДМ-2	0.43	1.68	4.65
БТР-80	0.55	1.49	3.62
МТ-ЛБ	-0.47	0.41	2.25
"ХАММЕР"	0.91	5.74	13.15

Таблица 5

Сравнение максимальных скоростей потока при обтекании различных ЛБМ

Вид ВГКМ	Скорости	
	абс. (м/с)	отн.
БМП-3	425	1.42
БРДМ-2	398	1.33
БТР-80	378	1.26
МТ-ЛБ	423	1.41
"ХАММЕР"	440	1.47

Также следует отметить, что полученная максимальная скорость потока, огибающего корпус боевой машины, может достигать вплоть до 440 м/с, что в 1.47 раза больше исходной скорости потока (300 м/с).

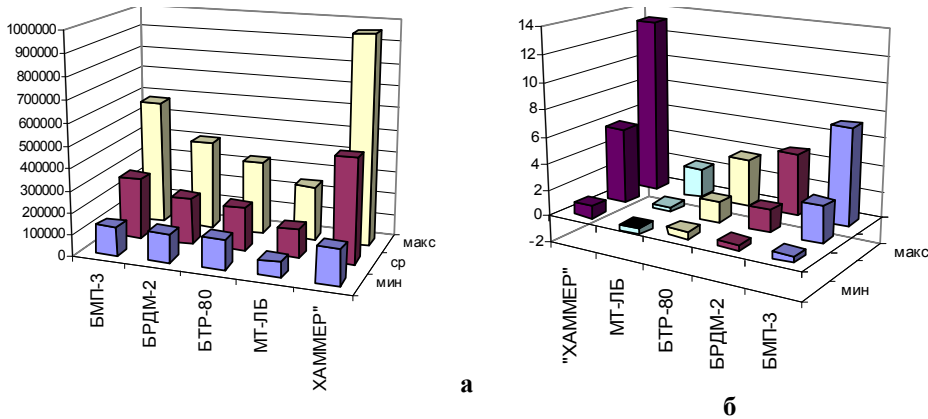


Рисунок 24 – Разброс давлений по поверхностям бронекорпусов различного типа: а – абсолютные значения; б – безразмерные (приведенные)

**Выводы.** Как видно из представленных результатов, характер распределения давления сильно зависит от геометрии объекта и других факторов, указанных ранее. При этом даже для существенно различающихся машин результаты могут быть качественно похожи. Так, из пяти ВГКМ три машины: БМП-3 (гусеничный движитель), БРДМ-2 (колесный движитель), БТР-80 (колесный движитель) показывают схожие картины по интегральным характеристикам, в то время как МТ-ЛБ и «ХАММЕР» выпадают из общей картины и показывают соответственно минимальные и максимальные результаты по машинам.

Таким образом, можно утверждать, что для большого спектра машин может быть справедливо следующее утверждение: в зонах минимального давления действует около 0.5 от исходного избыточного (против 0.8 по ранее принятой методике), среднее избыточное давление, действующее на машину, в полтора-три раза больше исходного, а максимальное избыточное давление превышает исходное в среднем в пять раз (против 1.2-1.5 по стандартной методике). При учете результатов, полученных для МТ-ЛБ и «ХАММЕР», можно заметить, что максимальное избыточное давление для некоторых ВГКМ может быть на порядок больше, чем исходное расчетное. В тоже время геометрия внешнего обвода корпуса ЛБМ может быть такова, что на некоторые зоны корпуса боевой машины может действовать давление ниже атмосферного, т.е. при обтекании корпуса возникает противодавление. Неучет этого может привести к существенным погрешностям при расчете напряженно-деформированного состояния от воздействия ударной волны на корпус.

COSMOSFloWorks является удобным инструментом предварительного анализа за счет существующих методов построения оптимизированной (сбалансированной по точности и скорости расчета) сетки ячеек для дискретизации задачи, методов сгущения, скорости счета. Однако за счет того, что он основан на методе конечных разностей, для дальнейших исследований, в рамках которых будут проведены динамические исследования обтекания ЛБМ, предпочтительнее выбрать метод конечных объемов или метод конечных элементов.

Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для сравнения степени нагруженности ВГКМ разного типа от взрывных волн. Разработанные критерии применимы лишь для грубого сравнения характеристик машин, и необходима разработка более качественных интегральных характеристик. Для этого следует рассмотреть больше типов корпусов, провести анализ влияния внешних элементов (к примеру, различных типов вооружения) и модификаций на характер обтекания машины потоком, а также рассмотреть большее количество выходных параметров и большего количества характеристик потока (скорость, давление, направление). Кроме того, полученные результаты могут быть использованы как основа для корректного задания нагрузок от ударной волны при расчете напряженно-деформированного состояния корпусов транспортных средств специального назначения.

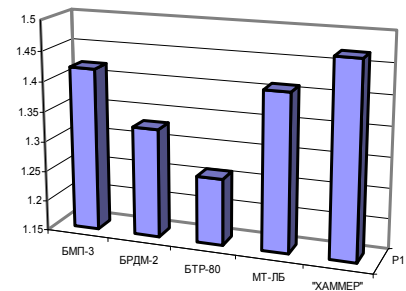


Рисунок 25 – Сравнение максимальных скоростей потока при обтекании различных ЛБМ

Литература: 1. <http://armor.kiev.ua>. 2. <http://dwg.ru/dnl/1829>. 3. <http://sm-7.net/upload/books.html>. 4. 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. 5. 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. 6. 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 7. 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. 8. Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А. Структура специализированных интегрированных си-

стем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения // 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. вып.: „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 газозвесах // 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. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. 15. <http://www.top500.org> 16. <http://supercomputers.ru> 17. <http://tensor.org.ua> 18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с. 19. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006/2007. – М.: ДМК-пресс, 2007 - 784 с. 20. Гірін О.Г. Газова динаміка. – Одеса: Астропринт, 2007. – 208 с. 21 . Гірін О.Г. Чисельні методи у газовій динаміці. – Одеса: Астропринт, 2006. – 168 с. 22. Васильев А.Ю. Дослідження процесу обтікання корпусу МТ-ЛБ ударною хвилею // Вісник НТУ „ХПІ”. Тематичний випуск „Машинознавство та САПР” – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2009. – № 12. - С.10-19.

Васильев А.Ю.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБТІКАННЯ КОРПУСІВ  
ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН УДАРНОЮ ХВИЛЕЮ

Розв'язана задача розробки методики аналізу процесу обтікання корпусів легкоброньованих машин ударною хвилею від потужного вибуху.

Vasilyev A.Y.

RESEARCH OF PROCESS OF SHOCK WAVE FLOW AROUND THE LIGHTLY  
ARMORED VEHICLES HULLS

The methods of shock wave flow analysis of lightly armored vehicles hulls was developed.

---