

УДК 623.438

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.1\(21\).22-31](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.1(21).22-31)**S.P. BISYK,***Philosophy Doctor, Senior Research Fellow***I.B. CHEPKOV,** *Doctor of Science, Professor***M.I. VASKIVSKYY,** *Doctor of Science, Professor***L.S. DAVYDOVSKYI,** *Philosophy Doctor,**(Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine)***O.A. SLYVINSKYI,** *Philosophy Doctor, Associate Professor**(Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv)***O.M. ARISTARKHOV,** *Master of Science**(Ivan Chernyakhovsky National Defense University of Ukraine, Kyiv)*

Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis

Представленні результати моделювання дії вибуху на металеву пластину з використанням різних розрахункових методів: LOAD_BLAST; LOAD_BLAST_ENHANCED; Arbitrary Lagrangian Eulerian; Particle Blast Method; Smooth Particle Hydrodynamics, що реалізовані в програмі LS-DYNA. Оцінена адекватність та точність цих методів в залежності від коефіцієнту відстані до вибухової речовини. Наведенні переваги й недоліки кожного методу та рекомендації по їх застосуванню за результатами цього моделювання та досвіду авторів.

Ключові слова: вибух, протимінна стійкість, моделювання, LS-DYNA.

Представлены результаты моделирования действия взрыва на металлическую конструкцию с использованием разных расчетных методов: LOAD_BLAST; LOAD_BLAST_ENHANCED; Arbitrary Lagrangian Eulerian; Particle Blast Method; Smooth Particle Hydrodynamics, которые реализованы в программе LS-DYNA. Оценена адекватность и точность этих методов в зависимости от коэффициента расстояния к взрывчатому веществу. Представлены преимущества и недостатки каждого метода и рекомендации по их использованию порезультатах этого моделирования и опыта авторов работы.

Ключевые слова: взрыв, противоминная стойкость, моделирование, LS-DYNA.

Introduction

The results of the combat losses analysis in armed conflicts over the past decades have shown that a large number of damages to armored combat vehicles (ACV) and their crews are caused by mines and improvised explosive devices [1,2]. Therefore, a topical solution to the problem of determining the effectiveness of protective structures during explosive loading is to improve of the anti-mine protection of ACV. Nowadays, numerical methods are used for solving physic problems on high-speed processes. This is quite effective tool for modeling processes occurring in conditions of explosive load of the protective structure. Modern software with integrated numerical methods allows us to estimate the influence of design parameters and physical and mechanical characteristics of the material and its elements on the operation of the structure as a whole during impulse influence. Numerical modeling can't replace traditional experimental research methods, but can significantly reduce their number and make the whole process more efficient and improve the anti-mine protection of ACV.

Currently, one of the most popular programs that allows to model the impact of explosion on protective structures is LS-DYNA [3]. A lot of works are devoted to research of the explosive on constructions, the main are there are [4-33]. Usually researchers choose one of the methods of numerical modeling that is implemented in this software package without substantiation of their choice. Each of these methods has errors for specific modeling conditions, so we must compare its accuracy and adequacy for determining the explosive loads and deflections of armored hull of ACV.

Preconditions and means for resolving the problem

Theoretical Model

The main criterion for assessing the impact of explosion on protective structures is the coefficient of distance Z (Table 1) to the explosive charge, which is determined in such a manner [34]:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

where: Z – coefficient of distance to the explosive charge; R – distance from center of charge; W – charge weight in TNT.

Table 1
Conditional classification of the explosion depending on the value of Z

Classification	Z, kg/m ^{1/3}
Far field	>4 - ~40
Average field	0,4-4
Near field	~0,053-0,4
Contact explosion	~0,053

The application of the coefficient of distance Z to the explosive charge avoids the attachment to the actual mass of charge, the distance to it, and conducts an assessment taking into account similarity laws.

The following calculation methods are implemented in the form of commands in LS-DYNA [3]:

Table 2

Possibility of application of calculation methods depending on [38].

Classification	Z, kg/m ^{1/3}	LOAD_BLAST	LOAD_BLAST_ENHANCED	ALE	PBM	SPH
Far field	>4 - ≈40	Yes	Yes	Yes*	No	No
Average field	0,4-4	Yes	Yes	Yes/Yes*	possibly	No
Near field	0,053-0,4	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes?
Contact explosion	≈0,053	No	No	Yes	Yes	Yes

*Note: in conjunction with the LOAD_BLAST_ENHANCED method

LOAD_BLAST;
LOAD_BLAST_ENHANCED;
Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE);
Particle Blast Method (PBM);
Smooth Particle Hydrodynamics (SPH).

Application of these calculation methods is possible depending on the value of Z (Table 2).

Correspondence of theoretical results with experimental data allows to control the legality of the main references laid down in the calculation scheme, as well as the certainty of the resulting numerical results. As experimental data, these works are selected [36,37].

The general view of the experimental setup for the explosive load of the armor plate is shown in Fig. 1. [36, 37]. When performing research, the armor plate was clamped between two plates (Fig. 1). The explosive charge of trinitrotoluene (TNT) in the form of a sphere was placed at different distances (R) from the target plate. The value of the charge weight also varied. The scheme of conducting an experiment is shown in Fig. 1b.

Cowper-Symonds model (2) for the material of plate was used in the course of numerical modeling [3].

$$\sigma_T = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p);$$

$$E_p = E_{ig} E / (E - E_{ig});$$

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt,$$
(2)

where: p and C – parameters of strain rate; $\dot{\varepsilon}$ – equivalent strain rate; σ_0, σ_T – Static and dynamic yield stress; E – Young's modulus; E_{ig} – hardening modulus.

The equation of the state of explosive detonation products [3]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp\{-R_1 V\} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp\{-R_2 V\} + \frac{\omega}{V} \bar{E}, \quad (3)$$

where: $v = \rho_0 / \rho = v_0 / v_0$ – relative specific volume; A, B, C, R₁, R₂, ω – empirical constants; \bar{E} – internal energy.

The equation of state of air [3]:

$$p = e \cdot (\gamma - 1) \rho / \rho_0 \quad (4)$$

where: $\gamma = 1,4$ – indicator of air adiabatic.

The mechanical characteristics of the armor plate are summarized in Table 3. Characteristics for the equation of the state of explosive detonation products are given in Table 4.

Table 3

Characteristics of the plate material [36, 37]

Characteristic	Value
Young's modulus, GPa	210
Poisson's ratio	0,28
Static yield stress, MPa	950
Dynamic yield stress, MPa	1250
Relative elongation, %	9
Density, kg/m ³	7838

Table 4

Characteristics of the equation of state of detonation products [39]

explosive index	Chapman-Jouget Parameters, *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN					The coefficients of the state equation of detonation products in the form Jones-Wilkens-Lee, *EOS_JWL					
	ρ_0	P	D	E ₀	G	A	B	C	R ₁	R ₂	ω
	kg/m ³	GPa	m/c	GJ/m ³		GPa	GPa	m ³ /kg			
TNT	1630	21,0	6930	7,00	2,727	371,2	3,231	1,045	4,15	0,95	0,30

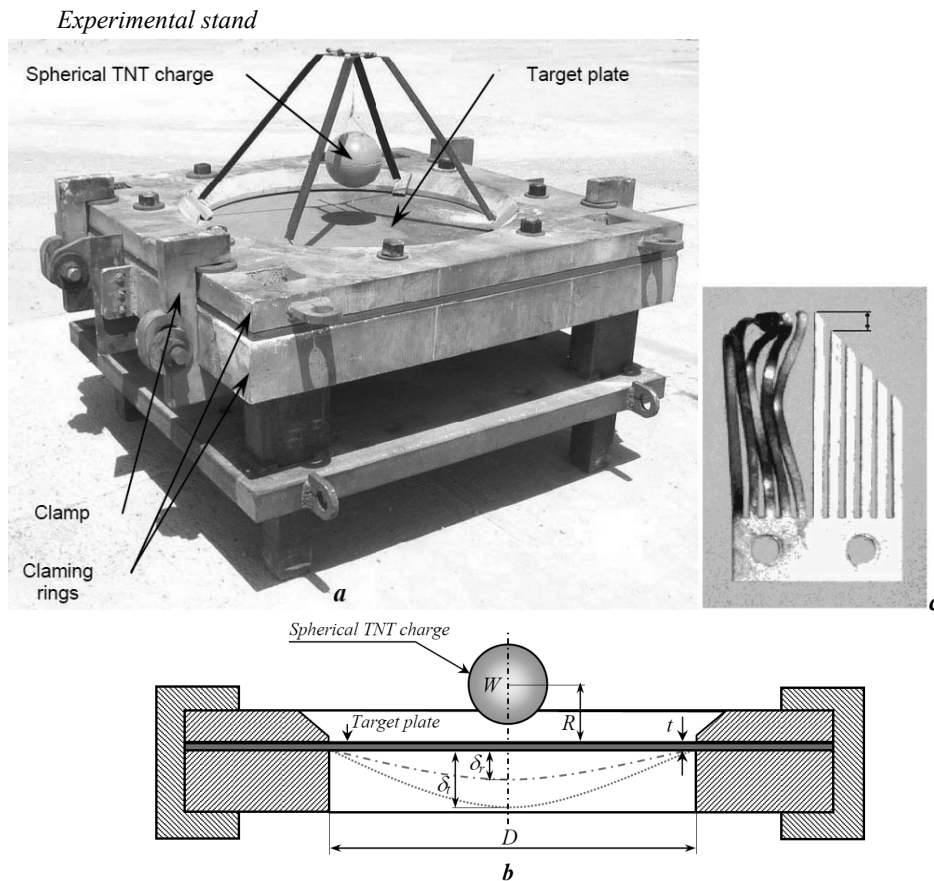


Fig. 1. The general view of the experimental setup (a), the scheme of conducting an experiment (b) and Comb-like device for dynamic deflection measurement [36,37]: R – distance from center of charge, t – plate thickness; D – plate diameter; δ – maximal mid-point transient deflection; δ_r – residual mid-point deflection.

Numerical modeling

The plate on which the explosion acts, is modeled as three-dimensional, four-node, shell finite elements (Shell) and three-dimensional, eight-node, solid elements (Solid) in all variants. Accordingly, in each calculation scheme, the weight of the explosive varied and the distance to it varied.

Finite-element models for other methods for modelling air blast are presented in Fig. 2. And results of numerical simulations are presented in Fig. 3-4 and table 5.

Result and Discussion.

The obtained simulation results using the considered calculation methods showed high accuracy in comparison with the experimental data, which were selected as reference ones. An additional point is that obtained results correlate with results of other works. [40-42].

The use of Solid or Shell elements in the numerical model has approximately the same level of precision while solving tasks. However, the amount of data needed to store the solution of the same task for Solid elements will be on average three times more than Shell. It is clear that the time of solving the problem with the use of Solid elements will be significantly higher compared with the use of shell elements. Such conclusions aren't new and completely

logically proceed from the mathematical content of both elements. For the majority of tasks regarding the assessment of the impact of explosions on protective structures, it is quite sufficient to use Shell elements except for the presence of significant plastic deformations and the destruction of structural elements. In this case, the use of Solid elements will be expedient.

Application of the LOAD_BLAST and LOAD_BLAST_ENHANCED method has significant advantages over other methods because of their ease of use, relative simplicity of the preparation of the finite element model, the smallest volumes of data compared with other methods, the smallest hardware requirements for computers. The disadvantages of such calculation methods are the impossibility of taking into account "shading" by one design of another, the absence of reflection and overlay of shock waves, which leads to an increase of measure of inaccuracy in the evaluation of the protective properties of complex structures. By the way, there is a fairly small choice of charge explosive form. The effect of a spherical charge in the air or on the surface of the soil is integrated in this calculation method. This requires a recalculation of the charge value of the charge, taking into account the soil and coefficients taking into account the shape of the charge. LOAD_BLAST_ENHANCED further allows us to estimate the pressure acting

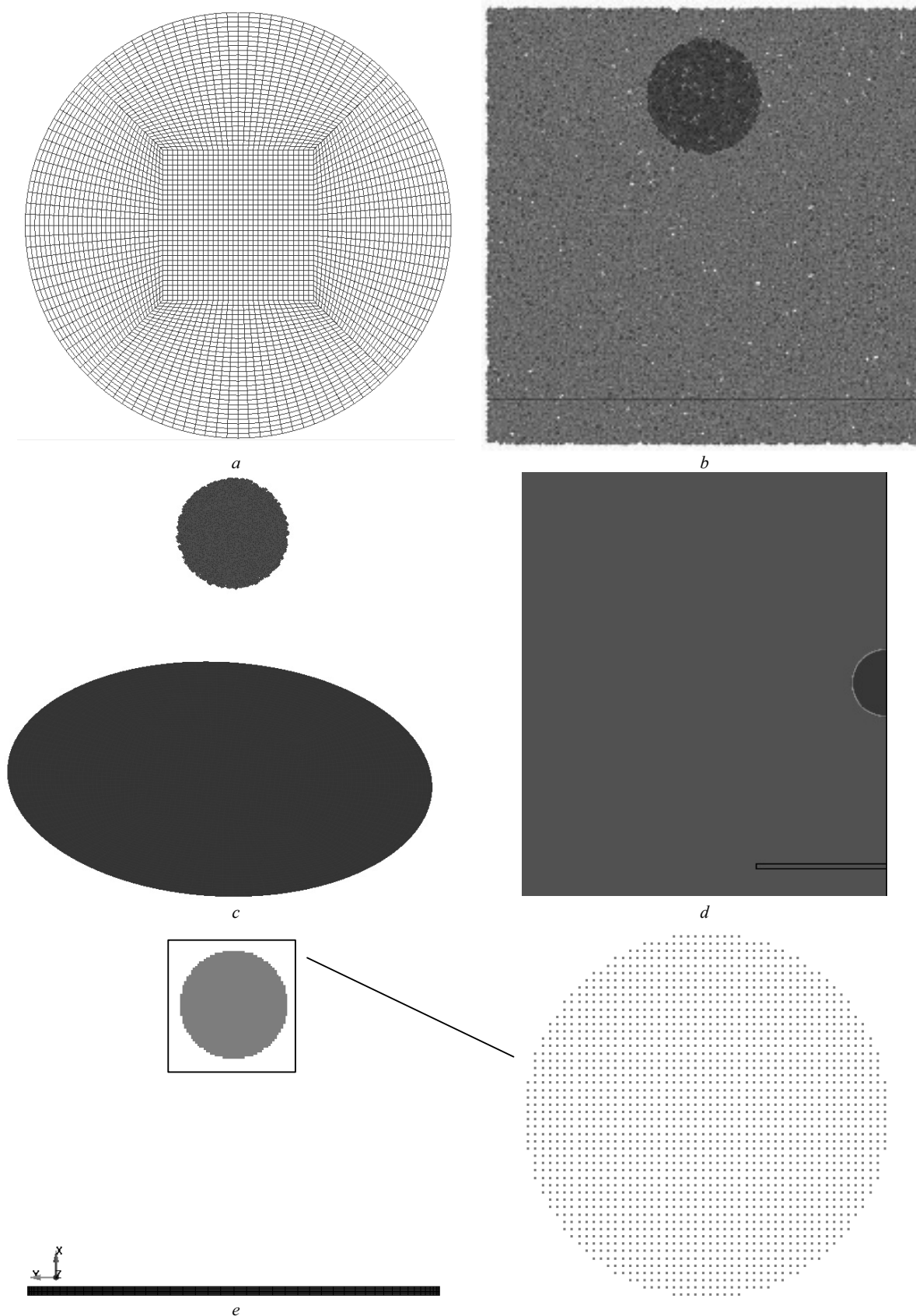


Fig. 2. Finite-element models for other methods for modelling air blast: *a* - LOAD_BLAST and LOAD_BLAST_ENHANCED; *b* - PBM (with air); *c* - PBM (not air); *d* - ALE 2D; *e* - SPH

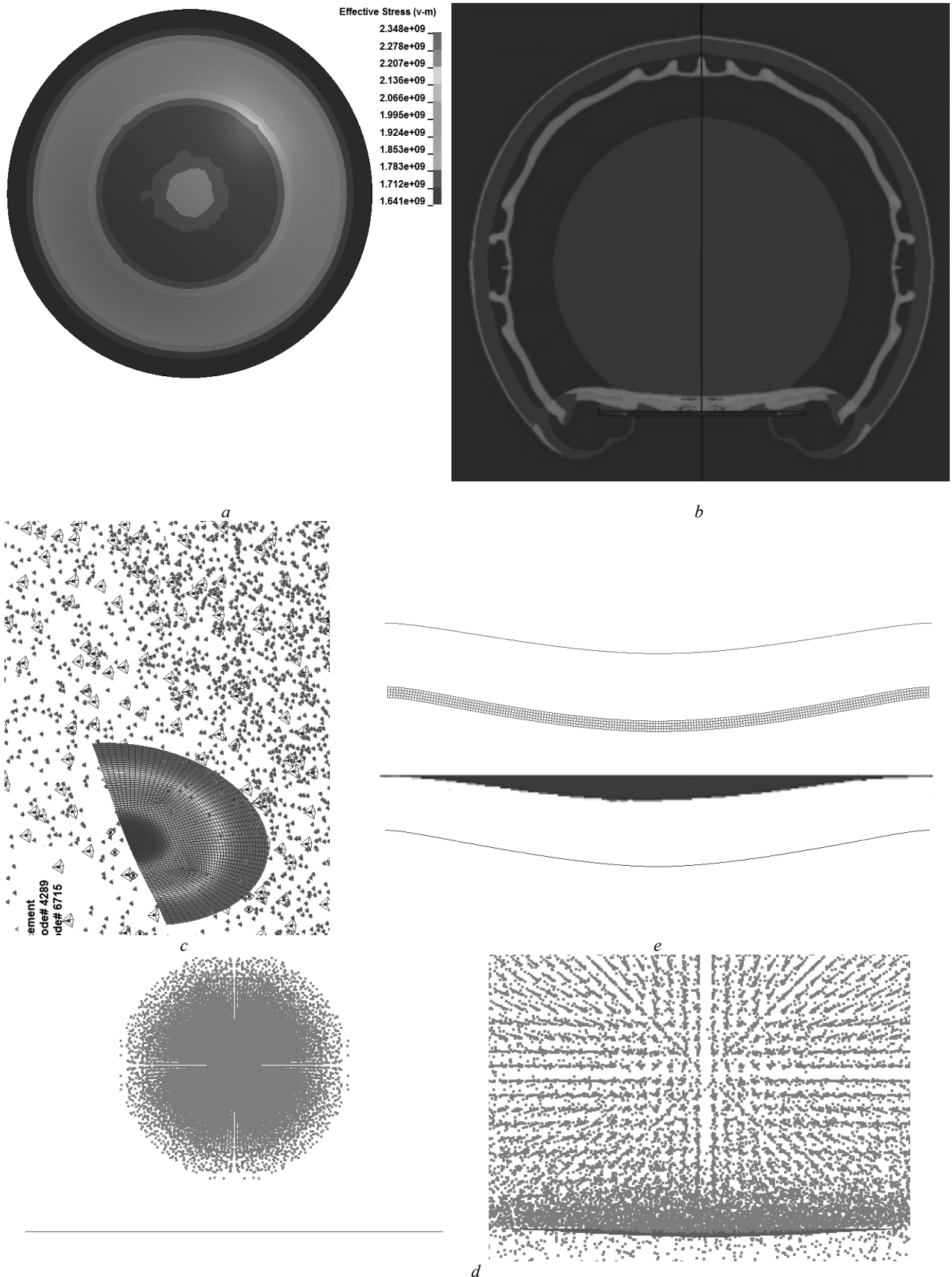


Fig. 3. Different methods of numerical modeling of explosive loading of a plate ($W=15\text{ kg}$, $R=0.4\text{ m}$) : *a* – LOAD_BLAST and LOAD_BLAST_ENHANCED; *b* – ALE 2D; *c* – PBM; *d*– SPH; *e*–maximum deflections of the plate with the application of the appropriate method

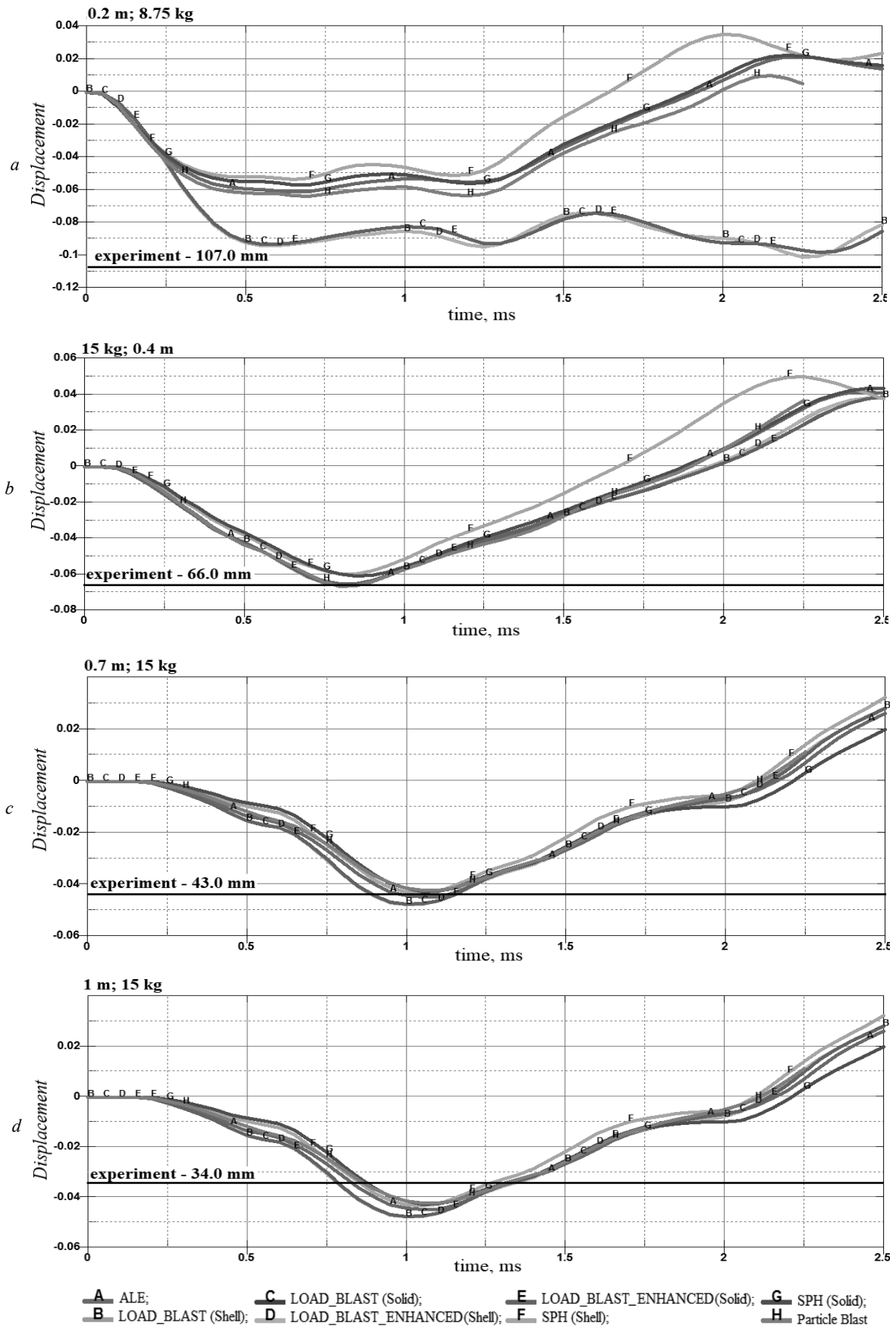


Fig. 4. Graphs of the displacement of the central node of a plate during the simulation of the explosion of charge

Table 5: Results of numerical modeling of the impact of explosion on a plate using various calculation methods

Calculation method	W, kg	R, m	δ_r , mm experiment	δ_r , mm calculation	Δ , %	Time of calculation, s	Data volume, MB	Dimensions of a finite element, mm	Number of finite elements, units.	Z, kg/m ^{1/3}
LOAD_BLAST (Shell)	8,75	0,13	165,0	109,7	33,5	81	41,8	12x12	4380	0,063
		0,2	107,0	100,9	5,7	78				0,097
	15	0,4	66,0	66,2	0,3	79				0,162
		0,7	43,0	47,7	10,9	80				0,284
LOAD_BLAST (Solid)	8,75	0,13	165,0	34,6	1,8	83	128	14x14	18150	0,405
		0,2	107,0	105,2	36,2	377				0,063
	15	0,4	66,0	98,1	8,3	374				0,097
		0,7	43,0	66	0,0	371				0,162
LOAD_BLAST (ENHANCED) (Shell)	8,75	0,13	165,0	47,6	10,7	367	55,8	12x12	4380	0,284
		0,2	107,0	34,6	1,8	371				0,405
	15	0,4	66,0	109,8	33,5	98				0,063
		0,7	43,0	100,9	5,7	96				0,097
LOAD_BLAST (ENHANCED) (Solid)	8,75	0,13	165,0	66,3	0,5	88	151	14x14	18150	0,162
		0,2	107,0	47,7	10,9	86				0,284
	15	0,4	66,0	47,6	1,8	85				0,405
		0,7	43,0	105,2	36,2	376				0,063
SPH (Shell)	8,75	0,13	165,0	98,1	8,3	374	498	12x12	65752 (SPH)	0,097
		0,2	107,0	66	0,0	366				0,162
	15	0,4	66,0	47,6	10,7	361				0,284
		0,7	43,0	34,5	1,5	367				0,405
SPH (Solid)	8,75	0,13	165,0	84,1	49,0	608	18150(Solid)	14x14	18150(Solid)	0,063
		0,2	107,0	54,5	49,1	596				0,097
	15	0,4	66,0	59,6	9,7	585				0,162
		0,7	43,0	43,2	0,5	505				0,284
ALE 2D (Solid)	8,75	0,13	165,0	27,2	20,0	498	583	14x14	65752 (SPH)	0,405
		0,2	107,0	97,8	40,7	2630				0,063
	15	0,4	66,0	56,5	47,2	2421				0,097
		0,7	43,0	60,8	7,9	2305				0,162
Particle Blast (with air) (Shell)	8,75	0,13	165,0	42,6	0,9	2032	2100	5x5	196400	0,284
		0,2	107,0	23,9	23,8	1918				0,405
	15	0,4	66,0	70,8	57,1	37850				0,063
		0,7	43,0	61	43,0	37630				0,097
Particle Blast (with air) (Shell)	8,75	0,13	165,0	65,1	1,4	21030	100 000 (PBPM)	4380 (Shell)	100 000 (PBPM)	0,162
		0,2	107,0	44,8	4,2	8951				0,284
	15	0,4	66,0	32,1	5,6	9748				0,405
		0,7	43,0	100,9	38,8	136				0,063
Particle Blast (with air) (Shell)	8,75	0,13	165,0	63,8	40,4	133	65	100 000 (PBPM)	100 000 (PBPM)	0,097
		0,2	107,0	66,4	0,6	130				0,162
	15	0,4	66,0	42,2	1,9	122				0,284
		0,7	43,0	42,1	23,8	65				0,405

on the protective structure on its surface and the effect of the negative phase of the shock wave (this isn't counted in LOAD_BLAST).

Using the SPH method allows us to take into account processes of reflection and overlaying of shock waves, but requires considerable hardware resources. In addition, this method is very sensitive to grid density, the number of SPH elements, and the correct choice of contact between the elements of the SPH and the elements of the Lagrange.

The ALE method requires a lot of hardware resources, requires the greatest amount of time in order to calculate the task and consumes the highest volume of data to note.

The Particle Blast method has the advantage because of the lack of a mesh, needs a relatively small amount of data to note, has a fairly high accuracy and high speed of problem solution. The application of this method is quite promising at the present time.

Conclusion

The obtained results show that for the conditions of charge demolition under the bottom or chassis of the ACV, all the methods of modeling the impact of the explosion described in this article have high adequacy and accuracy. The use of each method is expedient in view of their disadvantages and advantages at the discretion of the researcher. Taking into account the authors' experience, it is expedient to carry out the research of the protective structure in the initial stages using the methods LOAD_BLAST and LOAD_BLAST_ENHANCED. We should use one of the methods such as Arbitrary Lagrangian Eulerian, Corpuscular Particle Method, Smooth Particle Hydrodynamics in order to receive more detailed information about the protective structure.

LITERATURE

- Summary of global armoured vehicle market report 2013 URL: <https://http://rfventures.co/wp-content/uploads/2018/01/iq2018.pdf>
- Давидовський Л.С., Бісик С.П. Визначення напрямів підвищення захищеності бойових броньованих машин на основі аналізу бойових уражень / ЦНДІ ОБТ ЗСУ / ЦНДІ ОБТ ЗС України. Вип. 1 (68). К.: ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2018. С. 45–54.
- LS-DYNA keyword user's manual Version 970. Livermore: LSTC, 1998. 498 с
- NATO AEP-55. Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles. Volume 2 for mine threat. North Atlantic Treaty Organization, Unclassified publication 2009. 54 с.
- Showichen A. Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions: PhD thesis. Adisak Showichen. Cranfield university, 2008. 328 с.
- Numerical analysis of a lightarmoured vehicular personnel carrier loaded with a mine or ied explosion on a human transported in it. URL: <https://dSPACE.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1209/1/darina%20fiserova.pdf>.
- Shape Optimization of Panels Subject to Blast Loading Modeled with LS-DYNA. URL: <http://www.dynalook.com/international-conf-2010>.
- Бісик С.П. Аналіз пріоритетних напрямів вдосконалення протимінного захисту бойових броньованих машин // Зб. наук. праць ЦНДІ ОБТ ЗСУ. – Вип. 19(41). – К.: ЦНДІ ОБТ ЗСУ, 2011. – С. 77-81.
- Бісик С.П. Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2»/ Бісик С.П., Чепков І.Б., Васильківський М.І., Давидовський Л.С., Корбач В.Г., Висоцький О.М., Захаревич Д.М. // Озброєння та військова техніка : шокв. наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОБТ ЗСУ. 2016. №1 (9). С. 26-31.
- Бісик С.П., Давидовський Л.С. Дослідження протимінної стійкості бронетранспортера БТР-60 // Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців: тезис доп. на Міжнарод. наук.-практ. та наук.-метод. конф. / ХНАДУ. Харків, 2016. С.231-234.
- Analysis of IED sidebar explosion influence on hull of light fighting vehicle. URL: <file:///C:/Users/HP/Downloads/fulltext.pdf>.
- Landmine protection of armoured personnel carrier M113. URL: <http://www.dynalook.com/european-conf-2007/landmine-protection-of-armoured-ersonnel-carrier.pdf>.
- F. Tarlochan, Samer. F. Design of thin wall structures for energy absorption applications: design for crash injuries mitigation using magnesium alloy. International Journal of Research in Engineering and Technology. Tenaga. : 2013. p. 24-36.
- Бісик С. П. Числове моделювання вибухового навантаження модульних сотових конструкцій бойових броньованих машин / С.П. Бісик, В.А. Голуб, О.Ю. Ларін, О.Л. Чеченкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Машинознавство та САПР. –Х.: НТУ «ХПІ». – 2013-№ 23(996). – С. 27-35.
- Бісик С. П. Дослідження навантаження вибухом макетів днищ бойових машин / С.П.Бісик, К.Б. Круковський-Сіневич, І.Б.Чепков, Л.О. Волгін, В.А.Голуб, О.Ю. Ларін // Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012-№2. – С. 110-118.
- Бісик С. П. Оцінка впливу способу кріплення протимінного екрана на протимінну стійкість бойових броньованих машин / С.П. Бісик, І.Б.Чепков, В.А.Голуб, В.Г.Корбач // Системи озброєння і військова техніка. Щоквартальний науковий журнал. – Х.: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2013-№1(33). – С. 8-12.
- Чернозубенко О.В. Дослідження впливу уражаючих факторів підриву мінно-вибухових пристроїв на організм людини / О.В. Чернозубенко, О.М. Купріненко, С.П. Бісик // Системи озброєння і військова

- техніка. Щоквартальний науковий журнал. – Х.: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2014. – №2(38). – С. 39-44.
18. Бісик С.П. Критерії травмування організму людини при ударному та вибуховому навантаженнях / С.П. Бісик, Л.С. Давидовський, В.Р. Схабицький // Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал. – Х.: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2015 – №1(41). – С. 153-159.
 19. Бісик С.П. Оцінка протимінної стійкості легкої бойової колісної машини / С.П. Бісик, О.М. Купріненко, В.Г. Корбач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Машинознавство та САПР. –Х.: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 31 (1140). – С. 11-20.
 20. Бісик С.П. Аналіз механогенезу травмування екіпажу бойових броньованих машин при підриві на мінно-вибухових пристроях / С.П. Бісик, Л.С. Давидовський // Військово-технічний збірник. – №13/2015. – Львів: НАСВ, 2015. – С. 34-40.
 21. Бісик С.П. Дослідження конструкції захисного протимінного екрана / Бісик С.П. // Військово-технічний збірник. – №12/2015. – Львів: АСВ, 2015. – С. 110-117.
 22. Бісик С.П. Числове моделювання ударно-хвильового навантаження днища транспортного засобу / С.П. Бісик, І.Б. Чепков, В.А. Голуб, В.Г. Корбач // Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №1. – С. 149-154.
 23. Сливінський О.А. Структура та властивості зварних з'єднань броньових сталей закордонного виробництва / Сливінський О.А., Бісик С.П., Чернозубенко О.В. // Технологические системы. 2016. №3(76). С. 103-112
 24. Бісик С.П. Методика дослідження ефективності енергопоглинаючого елемента / С.П. Бісик, Л.С. Давидовський, В.Г. Корбач // Технологические системы – 2016. – №4(77). – С. 103-112.
 25. Давидовський Л.С. Дослідження енергопоглинаючого елемента протимінного сидіння бойової броньованої машини / Давидовський Л.С., Бісик С.П., Корбач В.Г. // Озброєння та військова техніка : шокв. наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2017. №1 (13). С. 24-33.
 26. Бісик С.П. Підхід до оцінки протимінної стійкості корпусів бойових броньованих машин з урахуванням зварних з'єднань // Наука і техніка Повітряних Сил ЗС України / ХНУПС ім. Кожедуба. Вип. 3(28). Х. : ХНУПС ім. Кожедуба, 2017. С. 121-127. – DOI: 10.30748/nitps.2017.28.15
 27. Бісик С.П. Дослідження вибухового навантаження V-подібної моделі днища бойової машини/ С.П. Бісик, І.Б. Чепков, В.А. Голуб, О.Ю. Ларін // Зб. наук. праць ЦНДІ ОВТ ЗСУ. – Вип. 1 (22) – К.: ЦНДІ ОВТ, 2012. – С. 232-240.
 28. Бісик С.П. Числове вирішення задачі ударно-хвильового навантаження пластини / С.П. Бісик, В.А. Голуб, В.Г. Корбач // Військово-технічний збірник / Академія Сухопутних військ. №2(5). – Львів: АСВ, 2011. – С. 3-6.
 29. Грабовський, А. В. Забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень / А. В. Грабовський, А. Ю. Васильєв, М. М. Ткачук, А. Ю. Танченко, О. В. Мартиненко, Д. В. Киричук, С. В. Борисенко, О. І. Касай // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 22-29. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.04.
 30. Набоков А. В. Математическое моделирование динамических процессов в корпусе легкобронированной машины при импульсном воздействии / А.В. Набоков, Н.А. Ткачук, А.Н. Малакей, А.В. Грабовский, А.Ю. Васильев, С.В. Куценко, А.Ю. Танченко, Е.С. Ананьин // Вісник НТУ «Харківський Політехнічний Інститут»: Серія: Машинознавство та САПР. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 7 (1283). С. 76-85.
 31. Хлань А.В. Проектно-технологически-производственное обеспечение тактико-технических характеристик боевых бронированных машин: подходы, модели и методы / А.В. Хлань, А.Н. Малакей, Н.А. Ткачук, А.А. Зарубина, А.В. Грабовский, А.Ю. Танченко, А.Ю. Васильев, А.В. Литвиненко, В.В. Посохов, О.В. Кохановская, Набоков А.В. // Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №1. С. 156-182.
 32. Бондаренко, М. О. Розрахунково-експериментальна верифікація динамічної моделі макета корпусу бронетранспортера / М.О. Бондаренко, С. В. Пелешко, А. Ю. Васильєв, А. В. Грабовський, Р. В. Граборов, Ю. В. Веретельник, В. В. Посохов // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – №32 (1254). – С. 5-13. – doi:10.20998/2413-4295.2017.32.01.
 33. Ткачук Н.А. Компьютерный программно-аппаратный комплекс для анализа и синтеза моделей элементов объектов бронетанковой техники / Н.А. Ткачук, В.Ф. Климов, А. В. Хлань, А.И. Шейко, А. Н. Малакей, В.И. Кохановский, А.В. Грабовский, А.Ю. Танченко, А.Ю. Васильев, М.А. Бондаренко, А.А. Зарубина, А. В. Набоков // Вісник НТУ «Харківський Політехнічний Інститут»: Серія: Машинознавство та САПР. Харків: НТУ «ХПІ», 2017 - №12 (1234). С. 96-109.
 34. Development of a strategy for simulating blast-vehicle interactions. URL: <http://dodreports.com/ada535049>.
 35. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Кн. 2. Пер. с англ./ Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др.; Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М.: Мир, 1986. – 319 с.
 36. Neuberger A., Peles S., Rittel D. Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: Air-blast loading,

- International Journal of Impact Engineering 34, 2007, pp. 859-873.
37. Neuberger A., Peles S., Rittel D. Springback of circular clamped armor steel plates subjected to spherical air-blast loading, International Journal of Impact Engineering 36, 2009, pp. 53–60.
38. Hilding D. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA // Nordic LS-DYNA Users' Conference, Gothenburg, Sweden, 2016.
39. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.
40. Schwer L., Teng H., Souli M. LS-Dyna Air Blast Techniques: Comparios with Experiments for Close-in Charges // 10-th European LS-Dyna Conference, Wurzburg, Germany, 2015.
41. Teng H., Wang J. Particle Blast Method (PBM) for the Simulation of the Simulation of Blast Loading // 13-th International LS-Dyna Users Conference, Dearborn, USA, 2014.
42. Olovsson, L., Hanssen, A.G., Børvik, T., Langseth, M. A particle-based approach to close-range blast loading, European Journal of Mechanics / A Solids (2009), DOI: 10.1016/j.euromechsol.2009.06.003

Стаття надійшла до редколегії 19.02.2019 р.

Рецензент С.В. Лапицький, д-р техн. наук, професор
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)
<https://orcid.org/0000-0003-2645-0256>