БОЙОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ОВТ

UDC 621.9.048.6 DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.32-37

A. Andrukhiv[1], N. Huzyk[2], B. Sokil[2], M. Sokil[1], Yu. Chahan[2].

[1] *Lviv Polytechnic National University, Lviv*
[2] *Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv*

METHODOLOGY OF INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE EXPLOSION ON THE ELEMENTS OF PROTECTIVE STRUCTURES

The technique of investigation of dynamic processes in elements of protective structures caused by explosive action is developed. The applied technique is based on obtaining a mathematical model of the process dynamics in the elements of the protective structure and the use of special Ateb-functions in constructing the solution of the latter. Analytical dependencies were obtained that describe the laws of change of the defining parameters of the dynamics of a element of the protective structure. They serve as a basis for evaluating its strength characteristics and selecting the basic parameters of the elements of the protective structures that would reliably protect the objects from explosion. It is proposed to change the design of the interaction of the protective element and the environment.

Key words: *engineering structure, protective ability, explosive action, longitudinal oscillations.*

Problem statement

Different types of protective structures and protective equipment are used to protect various objects and personnel from the effects of the damage [1,2]. The effectiveness of their use depends on many factors: the structure of construction [3-5]; the properties of the material used in the protective structure or equipment [6]; fixing methods or interaction with the object of the external action etc. Although the impact of the means of destraction (it is only an explosive action of the striking elements) is characterized by a small duration of action, the magnitude of the shock impulse can cause considerable destructive effects on the objects of protection. Improving the protective ability of protective structures under the conditions of use of this material can, at first glance, by changing the geometric dimensions of the protective structure (increasing the thickness of the protective structure). However, this approach is not always effective because it requires a significant increase in material resources. In our opinion, more effective are the ways of making changes to the structural characteristics of the protective structure or the use of materials with improved properties. This work is devoted to reasoning of making changes to some of the simplest types of protective structures against explosive action of a striking factor. In it a nonlinear elastic body models the elements of the protective coating. In order to reduce the dynamic effect of the explosive force, which has taken place in the immediate vicinity of the object of protection, it is proposed to change the method of fastening the elements of the protective structure. Using the specified type of fastening elements of the protective structure, a mathematical model of the dynamics of such a modernized structure was constructed. Its analytical solution shows the effectiveness of the above.

Analysis of basic research and recent publications

The action of an explosive wave or projectile on protective structures and other objects leads to their deformation and in some cases to destruction [6-10]. It is possible to estimate the magnitudes of deformation of the elastic elements of the protective structures, and therefore their protective ability, on the basis of the relations that describe the “dynamic equilibrium” of the element of the protective structure. The elastic properties of the elements of the protective structures are described, as a rule, by nonlinear relations of elasticity theory. Therefore, mathematical models of the dynamics of elements of protective structures that take into account the effect of the explosion on the deformation of the latter are boundary value problems for differential equations with partial derivatives [11]. We can find their solution, and therefore, determine the maximum deformation and evaluate the efficiency of the elements of protective structures on the basis of the analytical solutions of the named mathematical models. Such studies have only been considered in individual cases (see, for example, [12-14]) for restrictions that are too rigid to analyze the effects of the impact of an explosion impulse. In connection with the above, the paper attempts to obtain analytical dependencies that would be basic for the evaluation of the strength characteristics of the elastic elements of the protective structures, the elastic properties of the material of which are described by nonlinear relations. In addition, the paper proposes to slightly change the design of the interaction of the protection element with the object that act on it that is with external environment, on which will be emphasized below.

Results. Research methodology

Modern elements of protective structures use different materials whose elastic properties are described by relationships that do not satisfy the linear elasticity law under their large deformations (wood, reinforced concrete, etc.). With a sufficient degree of accuracy, they can be described by the relation

$$\sigma = E\varepsilon^{\nu+1} + \mu f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}),$$

where σ, E, ε are the intensity, the "modulus of elasticity", the relative deformation of the material of the protective element respectively. The analytical function $\mu f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ describes a small deviation of the elastic properties of a material from a power law, that indicate a small parameter μ, $\nu + 1 = \frac{2m+1}{2n+1}$, $m, n = 0,1,2,\ldots$. The element of the protective structure can be modeled with a one-dimensional elastic body. In the case when the explosion is a short distance from the object of protection, the main value of the explosive action on the protective structure (we speak about the overlapping of the blind) is transmitted by soil. The maximum value of its action on the protective element (closest to the explosion pillar of the protective structure) depends on the type and magnitude of the charge, the properties of the medium (soil) [7, 8] etc. In a mathematical model, the named action is modeled by a boundary condition. Thus, the dynamic explosion action on the projective element depends on the method of contact between the projective element of the blind and the environment (soil). As will be shown below, the use of the traditional fixing of the ends of the protective element (the classical boundary conditions [11] in the mathematical model of the dynamics of the protective element respectively) in comparison with the proposed in the work does not reduce the dynamic effect of soil oscillations on the element of the protective structure. Therefore, it is proposed to put the ends of the elastic element of the protective structure on a sloping surface whose angle to the horizon is equal to α . Then the protective elastic element will perform longitudinal oscillations and mathematical model of this process will describe by the equation

$$w_{tt} - \alpha^2 (w_x)^{\nu} w_{xx} = \frac{\mu}{\rho} f(w_t, w_x, w_{txx}) \qquad (1)$$

with boundary conditions

$$w(t,0) = 0, \; w(t,l) = h_0 \sin a \exp(-kd) \cos \eta t . \qquad (2)$$

We denote by $w(t,x)$ the longitudinal movement of the cross section of the protective element with a coordinate x at arbitrary moment of time t. The coefficient α is defined by the formula $\alpha^2 = \frac{E}{\rho}$ where ρ is the running mass of the protective element. By l it is denoted the length of the protective element, d – the distance of the right support of the protective element (closest to the explosion) to the explosion point, h_0 – the amplitude of soil oscillations caused by the explosion [7], k, η are the coefficients expressed by the viscoelastic properties of the soil [8,9] (η is the frequency of wave propagation in the soil). The initial conditions for equation (1), must consistent with the action of the shock wave on the protective element, the initial velocity of movement of the protective element must be consistent with the velocity of the shock wave at the point of contact between the soil and the protective element.

Thus, the solution of the named problem was reduced to the construction and analysis of the solution to the equation (1) under boundary conditions (2) and the initial velocity of movement that follows from the above. Before constructing the solution to the equation (1) under nonhomogeneous boundary conditions (2) by replacing variables

$$w(x,t) = v(x,t) + \theta(x,t) \qquad (3)$$

we reduce it to the simplest one with homogeneous boundary conditions.

The function $\theta(x,t)$ in the formula (3) has to solve the homogeneous differential equation

$$\theta_{xx}(x,t) = 0$$

with nonhomogeneous boundary conditions

$$\theta(t,0) = 0, \; \theta(t,l) = h_0 \sin a \exp(-kd) \cos \eta t .$$

It is easy to find that

$$\theta(x,t) = \frac{h_0 \sin a \exp(-kd) \cos \eta t}{l} x.$$

Then from the relation (1) implies that the function $v = v(x,t)$ have to satisfy the nonlinear non-autonomous equation

$$v_{tt} - \alpha^2 (v_x)^{\nu} v_{xx} = \varepsilon f\left(v_t, v_x + \frac{h_0 \sin a \exp(-kd) \cos \eta t}{l}, v_{txx} \right) = \varepsilon g(v_t, v_x, \phi_{txx}, \eta t) \qquad (4)$$

with homogeneous boundary conditions

$$v(t,0)=0\,,\ v(t,l)=0\,. \tag{5}$$

In order to solve the nonlinear non-autonomous differential equation (4) under homogeneous boundary conditions (5) we can apply the principle of the single-frequency oscillations and asymptotic methods of nonlinear mechanics [14] summarized in [15] for the specified types of boundary value problems. Thus, the single-frequency oscillations of the protective element of the considered structure are described by the Ateb functions [16, 17] by the relation

$$v(x,t)=a(t)sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_x\frac{1}{l}x\right)ca\left(\nu+1,1,\psi_1\right)\ \psi_1=\omega(a)t+\theta(t), \tag{6}$$

where $\omega(a)=\alpha a^{\frac{\nu}{2}}\left(\frac{\Pi_x}{l}\right)^{\frac{\nu+2}{2}}$ denotes the own frequency, $a(t)$ – the amplitude of the longitudinal oscillations of the protective element, $\theta(t)$ – their phase. They are determined by different relations depending on the ratio between the own frequency $\omega(a)$ and the frequency of propagation of the explosion shock wave in the soil. The simplest case of oscillation of the protective element is non-resonant. It occurs when the own frequency of the oscillations does not coincide with the frequency of oscillations of the soil or when there is a relation between the specified parameters of the form $m\omega(a)\neq n\eta$, where m, n are relatively simple numbers. For this case the amplitude and phase of oscillation vary in time according to differential equations

$$\begin{aligned}\dot a(t)&=\mu\frac{sa(1,\nu+1,\psi_1)f_1^*(a(t),\psi_1(t))}{\omega_1(a)\mathrm{P}},\\ \dot\theta(t)&=\mu\frac{(\nu+2)ca(\nu+1,1,\psi_1)f_1^*(a(t),\psi_1(t))}{2a(t)\omega_1(a)\mathrm{P}},\end{aligned} \tag{7}$$

where

$$f_1^*(a(t),\psi_1(t))=\frac{1}{l}\int_0^l f\left(a(t)X_1(x)ca(\nu+1,1,\psi_1(t)),\ldots,-\frac{2a(t)}{\nu+2}\omega(a)X_1(x)sa(1,\nu+1,\psi_1(t))\right)X_1(x)dx\,.$$

We denote by $\{X_k(x)\}=\left\{sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\prod_x\frac{k}{l}x\right)\right\}$ a system of eigenfunctions that describe the forms of eigen oscillations, and by $\prod_x=\prod_x\left(1,\frac{1}{\nu+1}\right)$ – their period.

Taking into account that during the oscillation period, the amplitude and oscillation frequency of the element of protective structure change by a small amount, then the last equations can be simplified to the form

$$\begin{aligned}\dot a&=\frac{\mu}{2\Pi_T\mathrm{P}l\omega_1(a)}\int_0^{2\Pi_T}\int_0^l sa(1,\nu+1,\psi_1)X_1(x)f\left(a(t)X_1(x)ca(\nu+1,1,\psi_1(t)),\ldots,-\frac{2a(t)}{\nu+2}\omega(a)X_1(x)sa(1,\nu+1,\psi_1(t))\right)dxd\psi_1,\\ \dot\psi&=\omega_1(a)+\frac{\mu(\nu+2)}{4a\Pi_T l\mathrm{P}\omega_1(a)}\int_0^{2\Pi_T}\int_0^l ca(\nu+1,1,\psi_1)X_1(x)f\left(a(t)X_1(x)ca(\nu+1,1,\psi_1(t)),\ldots,-\frac{2a(t)}{\nu+2}\omega(a)X_1(x)sa(1,\nu+1,\psi_1(t))\right)dxd\psi_1.\end{aligned} \tag{8}$$

In the formula (8) Π_T denotes the period of the phase of eigen oscillations of the element of the protective structure.

Summarizing all said above, we can state that in the first approximate dynamic process of the elastic protective element is described by the dependence

$$w(x,t)=asa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\prod_x\frac{1}{l}x\right)ca\left(\nu+1,1,\psi_1\right)+\frac{h_0\sin a\exp(-kd)\cos\eta t}{l}x \tag{9}$$

where the parameters a, ψ_1 are related by the differential equations (8).

As an example of the effectiveness of using the general ideas of the described method, consider the single-frequency oscillations of the protective element, provided that the resistance force (viscoelastic friction) is proportional to the velocity at the power $2s+1$. The right-hand side of differential equation (1) in that case will have the form $\varepsilon f(\ldots)=\varepsilon\left(\beta_1(w_t)^{2s+1}\right)$ where β_1, s are the known constants.

To find the change in time of the amplitude and oscillation frequency of the protective structure element according to the dependences (8), we obtain

$$\dot{a} = \frac{\mu\beta_1}{\Pi_T \Pi_x P\omega_1(a)}\left(\frac{2a\omega(a)}{(\nu+2)}\right)^{2s+1} \frac{\left(\Gamma\left(\frac{2(s+1)+1}{2}\right)\right)^2 \Gamma\left(\frac{\nu+1}{\nu+2}\right)\Gamma\left(\frac{1}{\nu+2}\right)}{\Gamma\left(\frac{2(s+1)+1}{2}+\frac{\nu+1}{\nu+2}\right)\Gamma\left(\frac{2(s+1)+1}{2}+\frac{1}{\nu+2}\right)}, \tag{10}$$

$$\dot{\psi} = \alpha a^{\frac{\nu}{2}}\left(\frac{\Pi_x}{l}\right)^{\frac{\nu+2}{2}}.$$

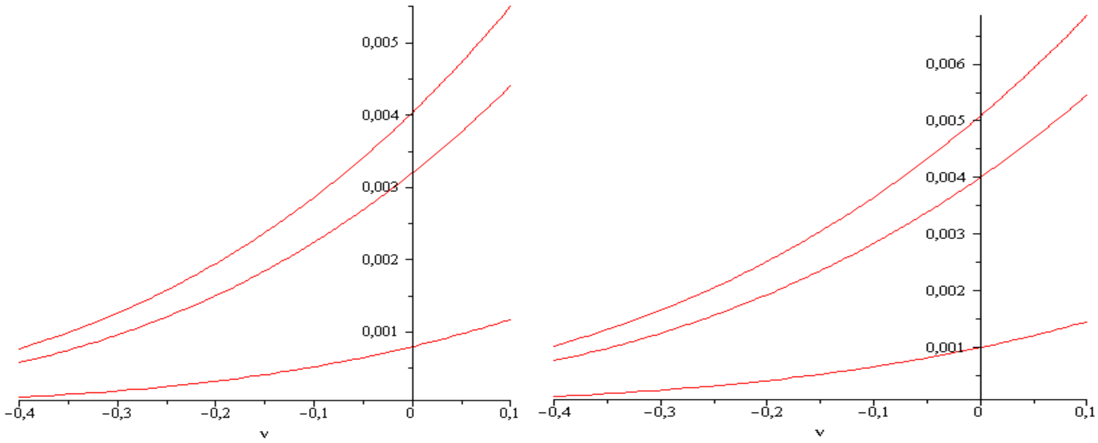
As for the practical use of the obtained results, then according to them, it is easy to find the maximum displacements of points of the protective element. As follows from (9), they are determined from the algebraic equation

$$\frac{2}{\nu+2}\bar{a}\omega(\bar{a}) + h_0\eta\sin a\exp(-kd) = V_0, \tag{11}$$

where V_0 denotes the velocity of propagation of the wave in the soil, more precisely at the point of contact of the protective element and the soil.

Below in Fig. 1. the maximum deformation value of the elastic protection element for different values of parameter ν is presented.

Note that for the graph a) we choose the following values for the parameters $\beta = \frac{\pi}{2}$, $d = 1.0, 1.5, 2$ and for the graph b) – $\beta = \frac{\pi}{3}$, $d = 1.0, 1.5, 2$.



a) b)

Fig. 1. **Dependence on the parameter of maximum movement of the element of the protective structure**

Conclusions

Analysis of the obtained results and graphical dependencies based on them show that the dynamic effect of the explosion on the element depends both on external and internal factors. To the external factors we refer the parameters h_0, η, d that denote the magnitude and type of charge of the explosive device, soil type, its humidity, the distance of the explosion to the protective structure. The parameters E, ν, α are the internal factors which denote the physical and mechanical properties of the material of the protective element, the type of its contact with the external environment.

The dynamic movement of the points of the protective element (for unchanged characteristics of the explosion and soil) is less for the cases of material of protective elements with a smaller parameter ν and a higher value of the modulus of elasticity. In order to reduce the dynamic effect of the explosion on the elements of the protective structure, it is advisable to make its support plane inclined to the horizon. Reducing the specified angle implies the maximum dynamic movement of the points of the protective element, and therefore increases the reliability of the protective structure.

Concerning the influence of external factors (explosion distance to the protective object, soil characteristics, etc.), then from the dependencies (9-11), when $\nu = 0, \alpha = \frac{\pi}{2}$, as a separate case, it is obtained the results from the literary sources known for linearly elastic longitudinal oscillations of the protective elements. This, in turn, is a validation of the results obtained in the work.

It should be noted that the above results can serve as the basis for calculating the protective structure from the impact of the explosion or other instant force and these methods may be understood in cases of more complex constructions.

References

1. Albert I. Analysis of the dynamic reaction of constructive-nonlinear mechanical systems / I. Albert, V. Petrov, A. Skvorthova // News VNIIG named after B. Vedeneeva. – 2002. – V. 241. – P. 38-59.

2. Belov N.N. Calculation of iron-concrete construction for rip and shock loading / Belov N.N., Kopanitsa D.G., Kumplyak O.G., Yugov N.T. // Tomsk STTT, 2004 .– 466 p.

3. Velychko L. Dynamics of a protective structure at impact of a bullet or a fragment of a projectile / L. Velychko, O. Petruchenko, V. Kondrat // Military technical collection. – 2015. – V. 13. – P. 13-19.

4. Petruchenko O. Reduction of effective bullets, shrapnel shells on object protection / O. Petruchenko, O. Khytriak, L. Velychko // Military technical collection. – 2015. – V. 12. – P. 65-69.

5. Andrukhiv A. The justification of a way for improving the protection of special buildings form shock effect of the projectile / A. Andrukhiv, B. Sokil, M. Sokil, N. Huzyk // Military technical collection. – 2019. – V.. 20. – С.69-74. DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.69-74

6. Dykan S.D. Safety in the industry and emergency /S.D. Dykan, O.Ye. Zyma. – Poltava: TVO «ACMI», 2015. – 273 p.

7. Orlenko L.P. Physics of explosion and shock / L.P. Orlenko. - M .: FIZMATLIT, 2006. – 394 p.

8. Frolov O.O. Calculation of the values of pressure at the shock wave front in the destruction of rocks by an explosion / O.O. Frolov, S.V. Tour // Bulletin of NTUU "KPI". The Mining Series. - 2009. - №18. - P. 43-47.

9. Kostyuchenko M.M. Soil Mechanics / M.M. Kostyuchenko. – K .: Internet resource of Kyiv Univ. – geol.univ @ kiev.ua. – 116 p.

10. Sokil B.I. Influence of parameters of the modernized working body of the mine trawl on its operational characteristics / B.I. Sokil, O.V. Yemelyanov, V.Ya. Nagachevsky, R.A. Nanivsky // Bulletin of mechanical engineering and transport. - 2019. - Vol. 10, No. 2. - P. 126-133/. DOI: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2019-10-2-126-133

11. Babakov I. The theory of oscillations / I. Babakov.– M.: Science, 1965. – 560 p.

12. Perestyuk M.O. Some modern aspects of asymptotics of the theory of differential equations with impulse action / Perestyuk M.O., Chernikova O.S. // Ukr. Math. J. – 2008. - 60. – P. 81-90.

13. Kapustyan O.V. Extreme Problems: Theory, Examples, Methods of Solving / O.V. Kapustyan, M.O. Perestyuk, O.M. Stenzhitsky // K.: VPC of Kiev university. – 2019. – 71 p.

14. Mytropolskyy Yu. / Asymptotic solutions of partial differential equations / Yu. Mytropolskyy, B. Moseenkov. – K.: High school, 1976. – 592 p.

15. Sokil B.I. On the construction of asymptotic approximations for a nonautonomous wave equation / B.I. Sokil // Ukrainian Mathematical Journal. – 1995. V. 47 (12). P. 1960-1963. DOI: 10.1007/BF01060972

16. Sokil B.. Mathematical models of dynamics of friable media and analytical methods of their research/ B. Sokil, A. Senyk, M. Sokil, A. Andrukhiv, M. Kovtonyuk, K. Gromaszek, G. Ziyatbekova, Y. Turgynbekov / Przegląd Elektrotechniczny. – 2019. V. 4. – P. 74- 78 doi:10.15199/48.2019.04.13

17. Senyk P.M. Inverse of incomplete Beta function / P.M. Senyk // Ukr. Math. j. – 1969. – 21, No. 3. – P. 325-333.

18. Nazarkevich M. Investigation of Beta- and Ateb-function dependencies. / M. Nazarkevich. // Lviv Politechnic National Institutional Repository http://ena. lp.edu.ua, 2004.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИБУХІВ НА ЕЛЕМЕНТИ ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ

А.І. Андрухів, Н.М. Гузик, Б.І. Сокіл, М.Б. Сокіл, Ю.А. Чаган

Розроблено методику дослідження динамічних процесів у елементах захисних конструкцій, викликаних вибуховою дією. Застосована методика базується на отриманні математичної моделі динаміки процесу в елементах захисної конструкції та використанні спеціальних Ateb-функцій при побудові розв'язку останньої. Щодо математичної моделі, то вона враховує широкий спектр зовнішніх та внутрішніх чинників, таких як основні характеристики вибухової дії на зовнішнє середовище (ґрунт), взаємодію останнього із елементом захисної конструкції; фізико-механічні властивості матеріалу елементу захисної конструкції та являє собою крайову задачу для нелінійного диференціального рівняння гіперболічного типу. Отримано аналітичні залежності, які описують закони зміни визначальних параметрів динаміки елементу захисної конструкції (амплітуди та частоти поздовжніх коливань). Вони служать базою для оцінки її міцнісних характеристик та вибору основних параметрів елементів захисних конструкцій, які б надійно захищали об'єкти від вибухової дії. Запропоновано зміну конструкції взаємодії захисного елементу та зовнішнього середовища. Показано, що на відміну від елементів захисних конструкцій, пружні властивості яких задовольняють лінійному закону для розглянутого у роботі випадку, власна частота їх коливань залежить від амплітуди; динамічне переміщення точок захисного елементу (для незмінних характеристик вибуху та ґрунту) є меншим для випадків матеріалів із меншим значенням параметра ν та більшим значенням модуля пружності. З метою зменшення динамічної дії вибуху на елементи захисної конструкції доцільно її площини опори робити нахиленими до горизонту. Шляхом використання останнього можна зменшити амплітуду коливань захисного елементу, а відтак – максимальні динамічні навантаження, зумовлені впливом зовнішньої вибухової дії. Основні результати роботи можуть бути узагальнені і на випадки безпосередньої дії сили вибуху на захисну конструкцію, а справедливість підтверджується отриманням у граничному випадку відомих у наукових джерелах результатів, які стосуються лінійно-пружних характеристик елементів захисних споруд.

***Ключові слова**: інженерна споруда, захисна здатність, вибухова дія, поздовжні коливання.*

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЗРЫВОВ НА ЭЛЕМЕНТЫ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

А.И. Андрухив, Н.М. Гузык, Б.И. Сокил, М.Б. Сокил, Ю.А. Чаган

Разработана методика исследования динамических процессов в элементах ограждающих конструкций от взрывного действия. Примененная методика базируется на получении математической модели динамики процесса в элементах ограждающей конструкции и использовании специальных Ateb-функций при построении решения последней. Математическая модель учитывает широкий спектр внешних и внутренних факторов, таких как основные *характеристики взрывного действия на окружающую среду (почву), взаимодействие последнего с элементом ограждающей конструкции; физико-механические свойства материала элемента ограждающей конструкции и представляет собой краевую задачу для нелинейного дифференциального уравнения гиперболического типа. Получены аналитические зависимости, описывающие законы изменения параметров динамики элемента ограждающей конструкции. Они служат базой для оценки ее прочностных характеристик и выбора основных параметров элементов ограждающих конструкций, которые надежно защищали объекты от взрывного действия. Предложено изменение конструкции взаимодействия защитного элемента и внешней среды. Показано, что в отличии от элементов защитных конструкцій, упругие характеристики которых удовлетворяют линейному закону упругости для рассматриваемого случая, собственная частота их колебаний зависит от амплитуды; динамическое перемещение точек защитного элемента (для постоянных характеристик взрыва и почвы) меньше для случаев материалов с меньшим значением параметра и большим значением модуля упругости. С целью уменьшения динамического воздействия взрыва на элементы ограждающей конструкции целесообразно ее плоскости опоры делать наклоненными к горизонту. Путем использования последнего можно уменьшить амплитуду колебаний защитного элемента, следовательно максимальные динамические нагрузки, обусловленные влиянием внешнего взрывного действия. Основные результаты работы могут бить обобщены и на случай непосредственного действия взрыва на защитную конструкцию, а их достоверность подтверждается получением в предельном случае известных в научных источниках результатов, касающихся линейно- упругих характеристик элементов защитных сооружений.*

Ключевые слова: *инженерное сооружение, защитная способность, взрывное действие, продольные колебания.*

УДК 331.451:620.267:674 DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.37-43

Р.В. Зінько[1], П.І. Казан[2], Ю.М. Черевко[2], О.С. Білик[1]

[1]*Національний університет "Львівська політехніка", Львів*
[2]*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів*

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЙ МОБІЛЬНИХ БОЙОВИХ РОБОТІВ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

У статті доведено, що на сучасному етапі розвитку вітчизняної військової науки моделювання бойових дій є важливим інструментом для прогнозування можливих результатів бойового зіткнення з подальшим виробленням рекомендацій щодо його планування та ведення. Визначено, що інші математичні методи дають широкі можливості вирішення часткових завдань під час реалізації принципів військового мистецтва. За допомогою різних математичних методів та електронної обчислювальної техніки є можливість виробляти кількісні рекомендації для прийняття рішень у різних бойових ситуаціях.

Розглянута можливість застосування методик систем масового обслуговування для моделювання бойових дій мобільних бойових роботів. Застосування таких методик дозволило отримати аналітичний опис фінальних ймовірностей для неповно доступної системи масового обслуговування та розширити можливості врахування умов виконання бойових завдань військових підрозділів, які оснащені мобільними бойовими роботами. З цією метою приведена та розглянута модель, що описує бій, коли стрільба ведеться по спостережуваних цілях і, у разі ураження цілі, вогонь миттєво переноситься на неуражені. Ця модель проілюстрована функціональною схемою, яка наочно показує роботу по цілях п'яти однотипних мобільних бойових роботів. При цьому виявлення цілей здійснюється за показниковим законом з функцією розподілу часу обслуговування цілі та середній інтенсивності їх виявлення й знищення.

Визначені характеристики ефективності роботи системи масового обслуговування у стаціонарному (усталеному) режимі, тобто при необмежено зростаючому часі її роботи. Також уведено два коефіцієнти, які характеризуватимуть відношення між тривалістю фази нанесення удару та часом всього процесу обслуговування цілі. На основі проведених досліджень для прикладу були проведені відповідні розрахунки та окреслені межі можливого застосування групи мобільних бойових роботів, яка складається з п'яти одиниць, для військового підрозділу. Визначена завантаженість кожної машини і, відповідно, ефективність підрозділу в цілому, надані рекомендації щодо їх кількісного складу.

Ключові слова: *ефективність застосування, мобільний бойовий робот, моделювання бойових дій, теорія масового обслуговування.*