

УДК 629.4.027



В. П. Пісарєв

ОЦІНКА ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ І ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ НА ДИНАМІКУ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ЗА НАВАНТАЖЕННЯМ ПРИ ПІДРИВІ НА МІНІ

Наведені підходи з математичного моделювання і результати розрахунків з визначення навантаження елементів конструкції транспортного засобу (на прикладі типових конструктивних рішень сучасних бронетранспортерів). Особливість математичної моделі полягає в урахуванні одночасної дії надлишкового тиску газу на колесо і днище корпусу машини при підриві на міні під переднім по ходу колесом. Врахований вплив основних параметрів об'єкта дослідження за геометрією, жорсткістю, демпфіруванням, масою і вагою. Враховані також основні нелінійності пружно демпферних зв'язків коліс з корпусом машини і з опорною поверхнею. Розрахунки проведені чисельним методом Рунге – Кута зі змінним шагом. За оригінальною обчислювальною програмою проведені розрахунки і отримана комплексна кількісна оцінка за особливостями робочого процесу навантаження при підриві.

К л ю ч о в і с л о в а: транспортний засіб, підрив на міні, особливості навантаження, математична модель, комплексна оцінка.

Постановка проблеми. У процесі створення та модернізації транспортних засобів, зокрема автобронетанкової техніки, виникає проблема оцінювання впливу особливостей конструкції на робочі процеси за умовами експлуатації. При підриві, після наїзду колесом на міну, надлишковий тиск газу у місті контакту колеса з опорною поверхнею буде більшим, ніж на частині днища корпусу машини, найближчої до підірваного колеса. За теорією і практикою, при інших рівних умовах, різниця тиску тим більше, чим більше відстань від центра підірваного заряду до перешкоди. В нашому випадку перешкодами є як колесо, так і днище машини. Очевидно, що фактори збурювання (сили, прикладені до колеса і днища) будуть різними. З іншого боку, робочі процеси трансформації прикладених зусиль на шляху до членів екіпажу також суттєво різняться за фізичним змістом. Зусилля, прикладене до колеса, на шляху до корпусу машини, насамперед, змінюється залежно від пружно демпферних та інерційних якостей підвіски підірваного колеса. На відміну від цього має місце робочий процес безпосередньої дії надлишкового тиску на днище корпусу машини.

Розроблення теорії та практики комплексного чисельного оцінювання впливу конструктивних особливостей машини і особливостей зміни надлишкового тиску газу при підриві на міні є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впливу конструктивних особливостей і параметрів транспортного засобу на динаміку робочого процесу за навантаженням при підриві на міні розглянуті у працях [1–5]. У статті [1] розглянуті питання навантаження членів екіпажу з позицій ергономіки і безпеки. Стаття [1] є подальшим розвитком праць [2–5]. Зокрема у статтях [2, 3] наведено підходи з моделювання процесу підриву машини у випадку наїзду на міну. Змодельовано збурюючий фактор щодо дії надлишкового тиску газу на перше по ходу колесо. Чисельним методом отримана оцінка

ступеня можливого ураження членів екіпажу залежно від місця їх розташування. Оцінювання виконано на прикладі задачі з підриву на міні машини за компонованням і параметрами, близькими до БТР-60, БТР-70, БТР-80. У статті [4] трансформовано математичні моделі для колісної машини за працями [2, 3] в математичну модель для гусеничної машини. Чисельним методом отримана оцінка навантаження елементів ходової частини МТЛ в режимі пробою підвіски. У статті [5] наведені підходи з визначення раціональних параметрів підсистеми “оператор – робоче місце – машина”, що зазнає дії збуджуючих силових факторів різної природи.

Мета статі. Довести до наукової спільноти результати дослідження з розв’язання підходів до математичного моделювання робочих процесів складних технічних об’єктів і результати розрахунків з визначення їх навантаження (на прикладі реалізації конструкцій, близьких за параметрами до сучасних бронетранспортерів).

Подальше розроблення теорії та практики комплексного чисельного оцінювання впливу конструктивних особливостей машини і особливостей зміни надлишкового тиску газу при підриві на міні на екіпаж машини є актуальною задачею.

Виклад основного матеріалу. Для проведення чисельного експерименту вибраний транспортний засіб, за показниками ваги і геометричних параметрів близький до бронетранспортерів БТР-70, БТР-80. Розрахункова схема об’єкта дослідження наведена на рис. 1.

Як інструментарій для розв’язування комплексу практичних задач застосовано розроблену математичну модель об’єкта досліджень за системою диференціальних рівнянь другого порядку.

$$\begin{aligned}
 M \cdot \ddot{z} &= \sum_{i=1}^4 P_{zpi} - \sum_{i=1}^4 NP_{zpi} - G + Pzv + yKP(t); \\
 I_y \cdot \ddot{\alpha} &= \left(\sum_{i=1}^4 P_{zpi} - \sum_{i=1}^4 NP_{zpi} \right) \cdot l_i + Pzv + yKP(t) \cdot LYKP; \\
 m_1 \cdot \ddot{z}_1 &= P_{zn1} - G_1 - P_{zp1} + yKL(t); \\
 m_2 \cdot \ddot{z}_2 &= P_{zn2} - G_2 - P_{zp2}; \\
 m_3 \cdot \ddot{z}_3 &= P_{zn3} - G_3 - P_{zp3}; \\
 m_4 \cdot \ddot{z}_4 &= P_{zn4} - G_4 - P_{zp4}; \\
 Nm_1 \cdot N\ddot{z}_1 &= NP_{zn1} - NG_1 - NP_{zp1}; \\
 Nm_2 \cdot N\ddot{z}_2 &= NP_{zn2} - NG_2 - NP_{zp2}; \\
 Nm_3 \cdot N\ddot{z}_3 &= NP_{zn3} - NG_3 - NP_{zp3}; \\
 Nm_4 \cdot N\ddot{z}_4 &= NP_{zn4} - NG_4 - NP_{zp4}; \\
 I_x \cdot \ddot{\psi} &= \left(\sum_{i=1}^4 P_{zpi} - \sum_{i=1}^4 NP_{zpi} \right) \cdot L_i + Pzv \cdot Ly + yKP(t) \cdot LxKP; \\
 mv \cdot \ddot{z}_v &= Pzv + Gv.
 \end{aligned} \tag{1}$$

На розрахунковій схемі (рис. 1) і в диференціальних рівняннях (1) введені такі позначення:

M, G, I_y, I_x – маса, вага та моменти інерції підресореного корпусу відносно поперечної OY і повздовжньої OX осей системи координат $OXYZ$ з началом O у центрі мас;

mv, Gv – маса і вага сидіння з оператором;

$\ddot{z}_1, \ddot{z}_2, \ddot{z}_3, \ddot{z}_4$ – лінійні прискорення в напрямку осі OZ центра мас корпусу та коліс 1, 2, 3, 4 по ходу машини;

\ddot{z}_v – лінійне прискорення в напрямку осі OZ сидіння з оператором;

$\ddot{\alpha}, \ddot{\psi}$ – кутові прискорення корпусу машини відносно поперечної OY і поздовжньої OX осей відповідно;

P_{zpi} – зусилля між колесом і корпусом машини, спричинене дією пружних і демпферних сил підвіски;

P_{zv} – зусилля між корпусом машини і сидінням з оператором, спричинене дією пружних і демпферних сил зв'язку корпусу з сидінням;

l_i – відстані в напрямку осі OX від центра маси підресореного корпусу до осі i -го колеса (вздовж машини);

L_i – відстані в напрямку осі OY від центра маси підресореного корпусу до i -го колеса (поперек машини);

Lx, Ly – відстані сидіння в напрямку осей OX, OY від центра маси підресореного корпусу;

m_i, G_i – маса та вага не підресорених частин ходової частини;

P_{zni} – зусилля між опорною поверхнею і колесом i -ї підвіски;

$y_{KL}(t), y_{KP}(t)$ – сили від дії вибухових газів відповідно на колесі і днищі при підриві міні під першим по ходу колесом лівого борту машини;

$A1$ – точка прикладання рівнодіючої сили $y_{KL}(t)$ від надлишкового тиску газу на частині поверхні колеса, площа якої S_{PTKL} ;

$A2$ – точка прикладання рівнодіючої сили $y_{KP}(t)$ від надлишкового тиску газу на частині поверхні днища, площа якої S_{PTKP} ;

LY_{KP}, LX_{KP} – відстані точки $A2$ прикладання сили $y_{KP}(t)$ до днища від дії вибухової рівнодіючої сили відповідно до площин YOZ і XOZ системи координат $OXYZ$;

$Lkol, Lbaz$ – колія і база машини.

Літерою N в диференціальних рівняннях позначені сили на правому по ходу борту машини.

У математичній моделі величини зусиль P_{zpi}, P_{zni} обумовлені характеристиками пружно демпферних зв'язків коліс відповідно з корпусом машини і опорною поверхнею, а зусилля P_{zv} – зв'язків сидіння з корпусом машини. Ці характеристики суттєво нелінійні (залежать від конструкції і параметрів направляючих елементів; пружних елементів – ресор, обмежувачів ходу; демпферних елементів – амортизаторів). Нелінійність обумовлена також наявністю відривів коліс від опорної поверхні за певних умов руху.

$y_{KL}(t), y_{KP}(t)$ – сили від дії вибухових газів; визначаються як експоненціальні функції $y_{KL}(t) = f(Qz, R0, S_{PTKL}, t)$, $y_{KP}(t) = f(Qz, R02, S_{PTKP}, t)$, де: Qz – величина заряду; $R0, R02$ – відстані точок $A1, A2$ до заряду під колесом.

Відстань $R02$ визначається через параметри об'єкта дослідження за формулою

$$R02 = \sqrt{(0.25Lkol)^2 + (0.25Lbaz)^2 + (hkl)^2}. \quad (2)$$

Математична модель об'єкта досліджень створена на основі математичних моделей за статтями [1–5].

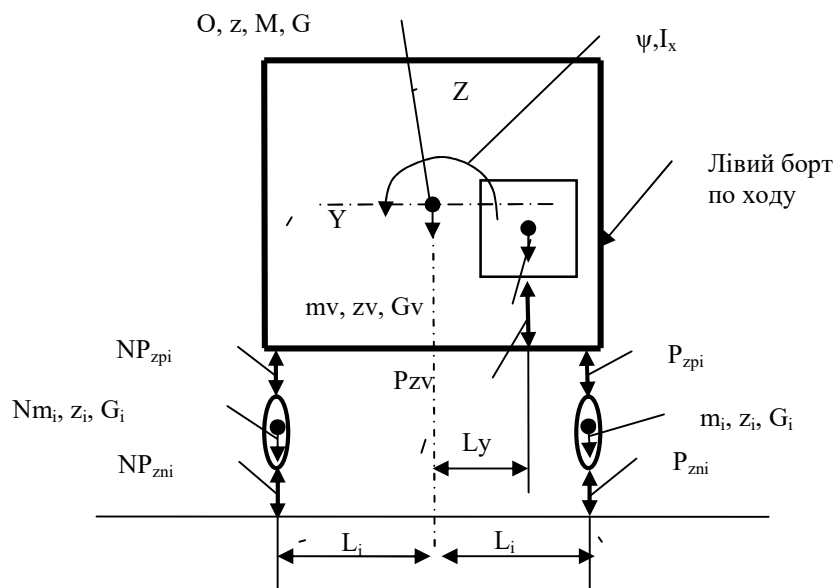
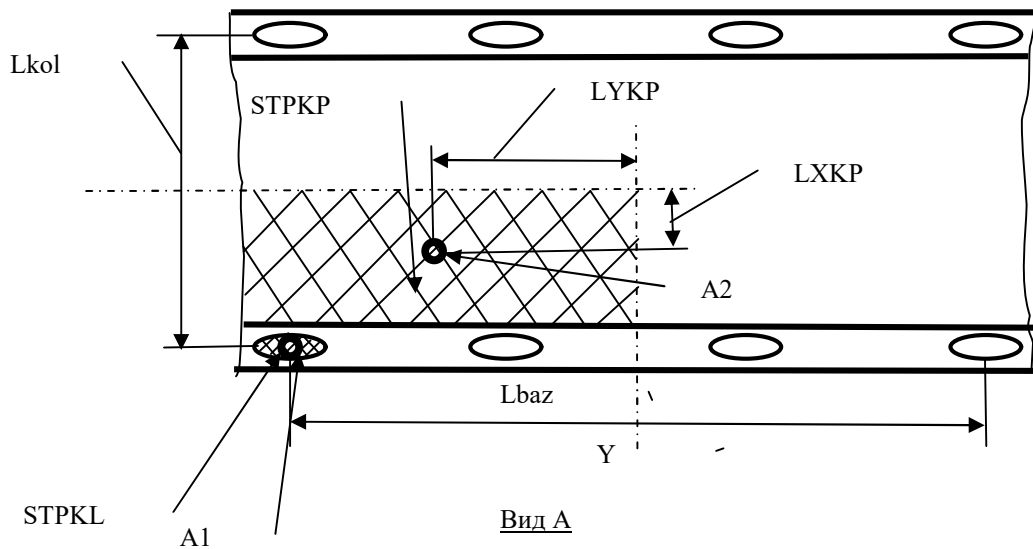
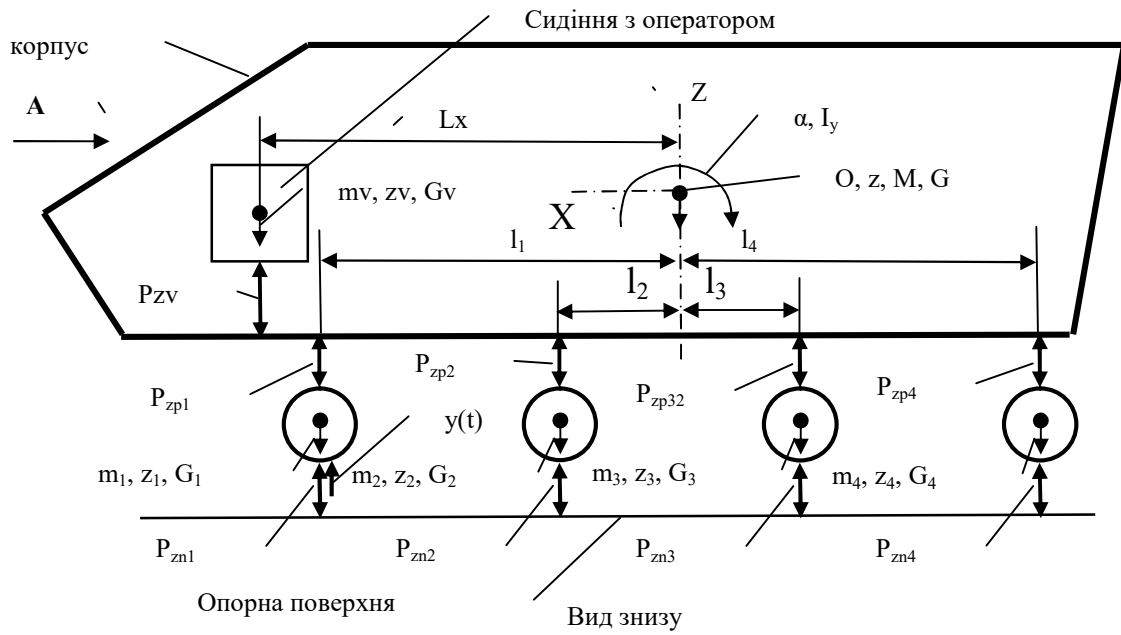
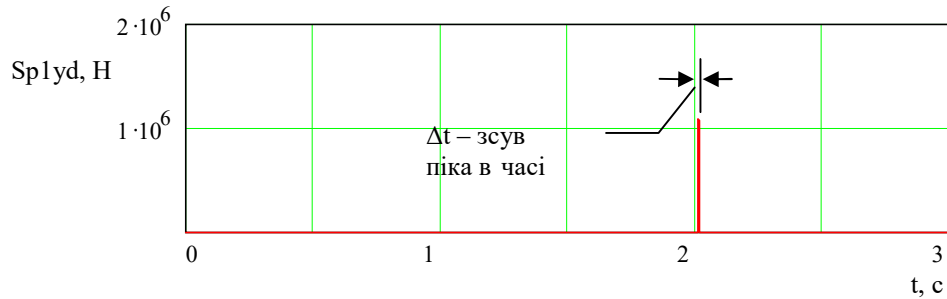
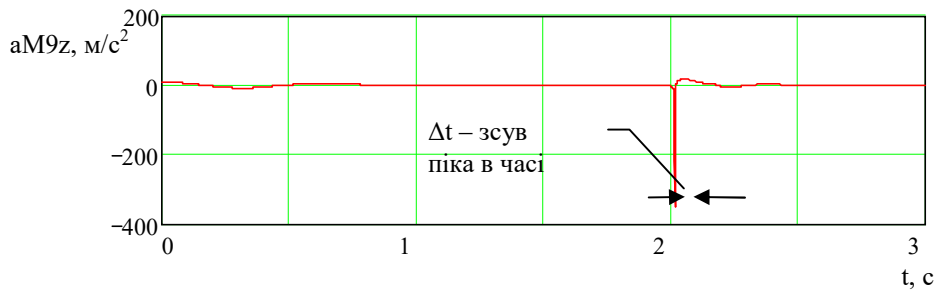


Рисунок 1 – Розрахункова схема об'єкта дослідження

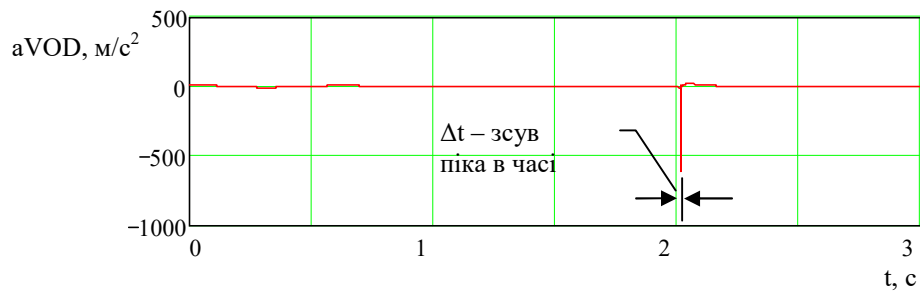
Розглянемо особливості робочих процесів за осцилограмами параметрів Sp_{1yd} , $aM9z$, $aVOD$ (рис. 2, 3, 4).



a – зусилля на корпусі при пробі підвіски



б – прискорення водія

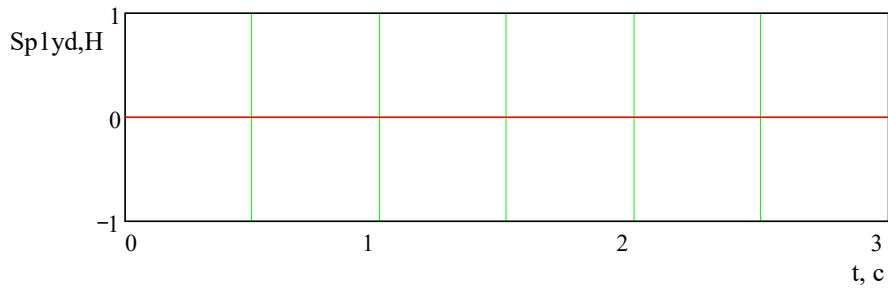


в – прискорення корпусу на місці водія

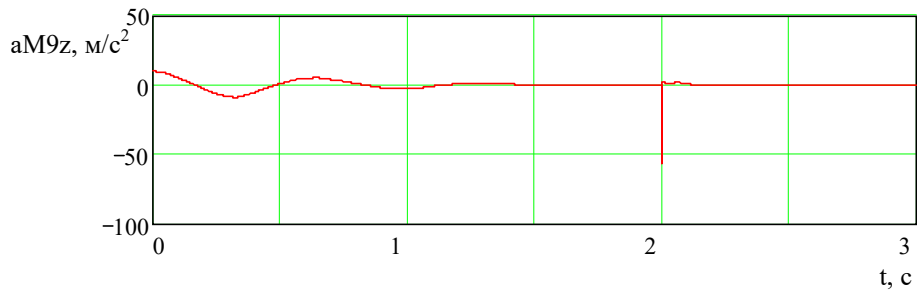
Рисунок 2 – Параметри робочого процесу дії надлишкового тиску газу тільки на колесо.

Варіант 1: підриві під колесом на другій секунді.

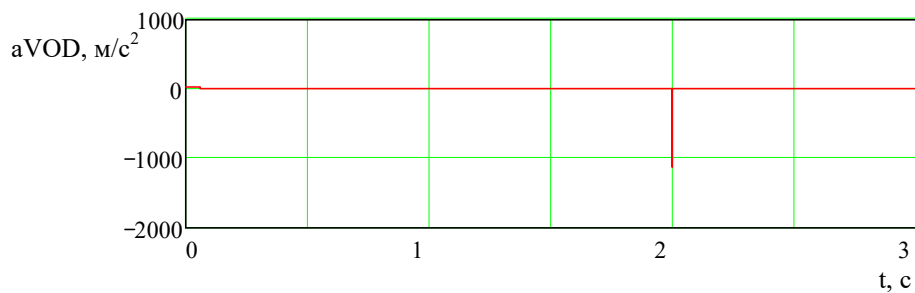
Параметри імпульсної дії: $\tau_{KL} = 2,238 \cdot 10^{-4}$ c, $I_{ytKL} = 2,238 \cdot 10^3$ H·c



a – зусилля на корпусі при пробії підвіски



б – прискорення водія

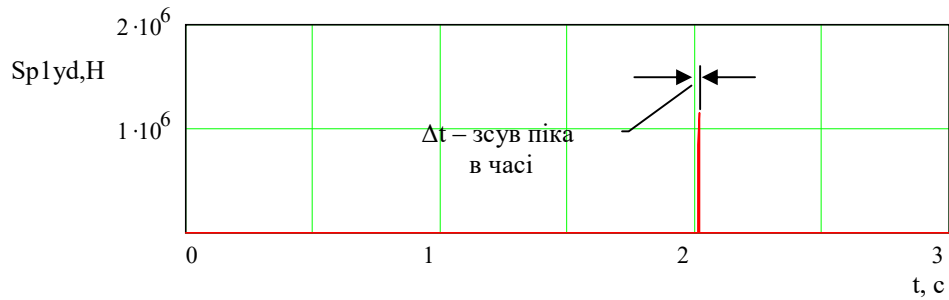


в – прискорення корпусу на місці водія

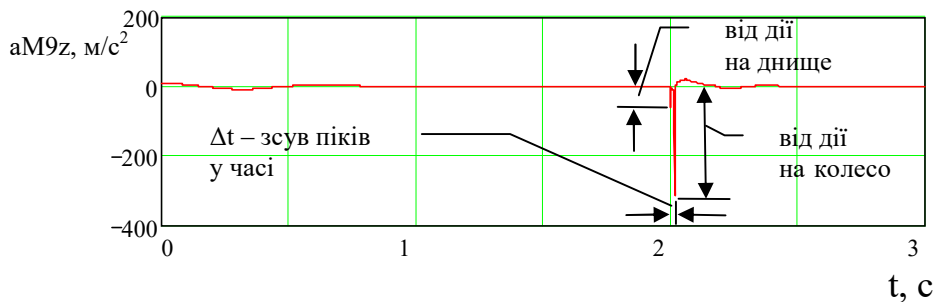
Рисунок 3 – Параметри робочого процесу дії надлишкового тиску газу тільки на днище.

Варіант 2: підриві під колесом на другій секунді.

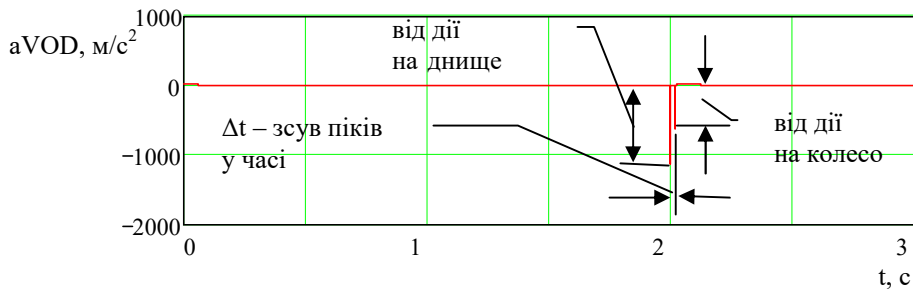
Параметри імпульсної дії: $\tau_{KP} = 2,171 \cdot 10^{-3}$ с, $I_{ytKP} = 442,139$ Н·с



а – зусилля на корпусі при пробі підвіски



б – прискорення водія



в – прискорення корпусу на місці водія

Рисунок 4 – Параметри робочого процесу дії надлишкового тиску газу на колесо і днище одночасно.

Варіант 3: підри्व під колесом на другій секунді. Параметри імпульсної дії на колесо:

$\tau_{KL} = 2,238 \cdot 10^{-4}$ с, $I_{ytKL} = 2,238 \cdot 10^3$ Н·с; на днище: $\tau_{KP} = 2,171 \cdot 10^{-3}$ с, $I_{ytKP} = 442,139$ Н·с

Максимальні значення параметрів робочого процесу під дією надлишкового тиску газу за варіантами 1, 2, 3 наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Максимальні значення параметрів робочого процесу під дією надлишкового тиску газу за варіантами 1, 2, 3

Параметри	Варіанти		
	1	2	3
Sp1yd, Н	$1,087 \cdot 10^6$	0	$1,143 \cdot 10^6$
aM9z, м/с ²	349,915	57,3	49,8 – пікове значення за ефектом безпосередньої дії на днище
			315,5 – пікове значення за ефектом пробією підвіски
aVOD, м/с ²	611,92	$1,13 \cdot 10^3$	$1,13 \cdot 10^3$ – пікове значення за ефектом безпосередньої дії на днище
			$0,605 \cdot 10^3$ – пікове значення за ефектом пробією підвіски

З рисунків 2 та 4 видно, що має місце зсув Δt піків параметрів. Причиною зсуву $\Delta t = 0,019$ с є трансформація силового потоку на шляху від колеса до корпусу машини при підриві, пов'язана з дією імпульсного силового фактора $I_{ytKL} = 2,238 \cdot 10^3$ Н·с, прикладеного на другій секунді, його тривалість $\tau_{KL} = 2,238 \cdot 10^{-4}$ с. Величина змін параметрів силового потоку залежить головним чином від величини приведених параметрів підвіски до колеса (маси, жорсткості, демпфірування) та імпульсного силового фактора I_{ytKL} . Імпульсний силовий фактор $I_{ytKP} = 442,139 \cdot 10^3$ Н·с, прикладений безпосередньо до корпусу машини (до днища) також на другій секунді, діє протягом $\tau_{KP} = 2,171 \cdot 10^{-3}$ с. Силкові фактори I_{ytKL} , I_{ytKP} суттєво різняться за величиною і часом дії. Силковий фактор I_{ytKL} , прикладений до колеса, більше силового фактора I_{ytKP} , прикладеного до корпусу, в 5,06 разу. За часом дії I_{ytKL} менше I_{ytKP} у 9,7 разу. Різниця параметрів імпульсних силових факторів спричинена, за інших рівних умов, різницею величин параметрів R_0 , R_{02} , $STPKL$, $STPKP$. Порівняння варіантів 1 та 2 за максимальними значеннями параметрів робочих процесів показує, що прискорення $aM9z$ оператора (водія), за умови врахування особливостей трансформації силового потоку на шляху від колеса до корпусу машини та припущення, що вся енергія вибуху прикладена тільки до колеса (варіант 1), суттєво, в 6,1 разу, перевищує прискорення за варіантом 2. У варіанті 2 зроблено припущення, що вся енергія вибуху прикладена тільки до днища машини. Щодо прискорення $aVOD$ на корпусі машини на місці оператора, то воно для варіанта 1 менше, ніж для варіанта 2 у 1,84 разу. У варіанті 3 спостерігаються сумарні прояви особливостей робочих процесів за варіантами 1, 2. Причиною цього є припущення, що енергія вибуху прикладається до корпусу машини двома шляхами: перший – через колесо і його підвіску; другий – безпосередньо (до чверті днища, відповідно до розрахункової схеми на рис. 1). Характерною для варіанта 3 є наявність на осцилограмах (рис. 4, б та 4, в) двох пікових значень прискорень, відповідно для $aM9z$ і $aVOD$, із зсувом у часі Δt . Практично це виглядає як сумарна дія прискорень, близьких до значень прискорень за варіантами 1 та 2. За рівнем прискорень частка, яку вносить пробій підвіски, для $aM9z$ у 6,33 разу більше частки від дії на днище. Для $aVOD$ навпаки – у 1,86 разу менше.

Висновки

1. Розроблена оригінальна математична модель дозволяє оцінити якісно і кількісно вплив конструктивних особливостей і параметрів транспортного засобу на динаміку робочого процесу за навантаженням при підриві на міні. До врахованих конструктивних особливостей віднесено різну відстань від вибухового пристрою до колеса і частини днища машини в процесі підриву.
2. Розрахунки, проведені чисельним методом за оригінальною програмою, підтвердили адекватність математичної моделі сучасним уявленням з теорії і практики робочих процесів щодо вимушеної реакції на дію надлишкового тиску газу при вибуху.

Перелік джерел посилання

1. V. Pisarev. Determining the parameters for connections among the elements of design of vehicles in terms of ergonomics and crew safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied mechanics*. 2019. 3/7(99). P. 72–80.
2. Пісарев В. П. Моделювання процесу підриву бойової колісної машини у випадку наїзду на міні. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. Харків, 2013. Вип. 1(21). С. 5–8.
3. Пісарев В. П. Оцінювання ступеня можливої ураженості екіпажу бойової колісної машини за місцем його розташування у разі підриву на міні. *Честь і закон*. 2013. № 1(44). С. 91–93.
4. Пісарев В. П. Навантаження ходової частини військової гусеничної машини у процесі підриву на міні. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2016. Вип. 2 (28). С. 5–9.
5. Пісарев В. П. Визначення раціональних параметрів підсистеми “оператор – робоче місце – машина”, що зазнає дії збурюючих силових факторів різної природи. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2019. Вип. 1 (33). С. 31–37.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2021 р.

УДК 629.4.027

В. П. Пісарєв

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ДИНАМИКУ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПО НАГРУЖЕННОСТИ ПРИ ПОДРЫВЕ НА МИНЕ

Приведены подходы математического моделирования и результаты расчетов по определению нагруженности элементов конструкции транспортного средства (на примере типичных конструктивных решений современных бронетранспортеров). Математическая модель учитывает особенности рабочего процесса нагружения при подрыве на mine под передним по ходу движения колесом. Особенность заключается в учете одновременного действия избыточного давления газа на колесо и днище корпуса машины. Учтено влияние основных параметров объекта исследования по геометрии, жесткости, демпфированию, массе и весу. Учтены также основные нелинейности упруго демпферных связей колес с корпусом машины и с опорной поверхностью. Расчеты сделаны численным методом Рунге – Кутты со сменным шагом. С помощью оригинальной программы проведены расчеты и получена комплексная количественная оценка особенностей рабочего процесса нагружения при подрыве.

К л ю ч е в ы е с л о в а: транспортное средство, подрыв на mine, особенности нагружения, математическая модель, комплексная оценка.

UDC 629.4.027

V. Pisarev

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE FEATURES AND PARAMETERS OF THE VEHICLE ON THE DYNAMICS OF THE WORKING PROCESS BY LOAD UNDER MINE DETONATION

Approaches of mathematical modeling and calculation results for the loading of vehicle structural elements are presented (using the example of typical design solutions of modern armored personnel carriers). The mathematical model takes into account the peculiarities of the working process of loading during detonation on a mine underneath the front wheel in the direction of movement. The peculiarity lies in taking into account the simultaneous action of excess gas pressure on the wheel and the bottom of the machine body. The influence of the main parameters of the research object in terms of geometry, stiffness, damping, mass and weight is taken into account. The main nonlinearities of elastic damping connections of structural elements (wheels with the machine body and with the supporting surface) are also taken into account. The calculations were made by the numerical Runge - Kutta method with a variable step. With the help of the original program, calculations were carried out and a comprehensive quantitative assessment of the features of the working process of loading during blasting was obtained. The complexity of the assessment consists in a quantitative assessment of the effect of an external force factor, both separately (applied only to the wheel or only to the bottom) and together (excess pressure acts both on the wheel and on the bottom).

It has been established that there is a shift in the peak values of the force on the vehicle body during suspension breakdown and accelerations on the vehicle body in the driver's seat and directly on the driver. The reason for the shift of 0.019 sec is the transformation of the force flow on the way from the wheel to the body of the machine during detonation. The magnitude of changes in the parameters of the power flow depends mainly on the value of the given parameters of the wheel suspension (mass, stiffness, damping) and the parameters of the impulse disturbing force factor applied to the wheel. At the same time, the disturbing force factors applied to the wheel and to the body of the machine during blasting differ significantly in magnitude and duration of action. The force factor applied to the wheel is 5.06 times greater than the force factor applied to the body, and the action time is 9.7 times less.

It has been established that, taking into account the simultaneous action of excess gas pressure on both the wheel and the bottom of the car body, the driver's acceleration rate from suspension breakdown is 6.33 times greater than the fraction from the gas action on the bottom.

K e y w o r d s: vehicle, mine detonation, loading features, mathematical model, complex assessment.

Пісарєв Валерій Петрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0003-3396-1492>