

УДК 623.428.2

В.П. ГРЕКОВ, А.А. П'ЯНКОВ, С.В. ОРЛОВ, інженери (Харків. ун-т Повітряних Сил ім. І. Кожедуба)

СТІЙКІСТЬ ПЕРЕСУВНИХ ПУСКОВИХ УСТАНОВОК ІЗ ПЕРЕКИДАННЯ В РАЗІ ВЗАЄМОДІЇ ІЗ ПОВІТРЯНОЮ УДАРНОЮ ХВИЛЕЮ

Пропонуються аналітичні методи визначення динамічної стійкості пересувних пускових установок і транспортних засобів під час наземних вибухів фугасних бойових частин. Стаття містить деякі результати досліджень динамічної їхньої стійкості у разі взаємодії із повітряною ударною хвилею. Пропонується математичний апарат, що дозволяє оцінювати динамічну стійкість пересувних пускових установок під час наземних вибухів фугасних бойових частин.

Предлагаются аналитические методы определения динамической стойкости передвижных пусковых установок и транспортных средств во время наземных взрывов фугасных боевых частей. Статья содержит некоторые результаты исследований динамической стойкости передвижных установок при взаимодействии с воздушной ударной волной. Предлагается математический аппарат, который позволяет оценивать динамическую стойкость передвижных пусковых установок во время наземных взрывов фугасных боевых частей.

The analytical methods of determination of dynamic firmness of movable starting options and transport vehicles are offered during the surface explosions of high-capacity battle parts. The article contains some results of researches of dynamic firmness of movable options at co-operating with an air shock wave. A mathematical vehicle which allows to estimate dynamic firmness of movable starting options during the surface explosions of high-capacity battle parts is offered.

Огляд останніх досліджень і публікацій із цієї проблеми згідно робіт [1-5] показує, що постановка й рішення задач, що дозволяють оцінювати динамічну стійкість пересувних пускових установок (ППУ) під час наземних вибухів фугасних бойових частин відсутні.

Мета статті – постановка й рішення завдання визначення динамічної стійкості ППУ під час наземного вибуху фугасної бойової частини.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням наукових результатів, які отримано. Головним вражаючим чинником у разі вибуху бойової фугасної частини є повітряна ударна хвиля (ПУХ).

Схема взаємодії ПУХ з пересувною ППУ для визначення її динамічної поперечної стійкості наведено на рисунку.

Дія відкрито розташованої пускової установки з ПУХ має дві основні фази. В першій фазі ПУХ впливає на фронтальну поверхню агрегату й потім накриває його.

Тривалість цієї фази визначається інтервалом часу від моменту зіткнення ПУХ із фронтальною

поверхнею ППУ до моменту повного покриття ПУХ всього агрегату. Значення часу лежить в межах:

$$\frac{b}{D_f} \leq t_1 \leq 2 \cdot \frac{b}{D_f} \quad (1)$$

де b – ширина агрегату, м; $D_f = 340 \cdot \sqrt{1 + \Delta P_f}$ – швидкість розповсюдження фронту ПУХ, м/с; ΔP_f – надлишковий тиск у фронті ударної хвилі, Па.

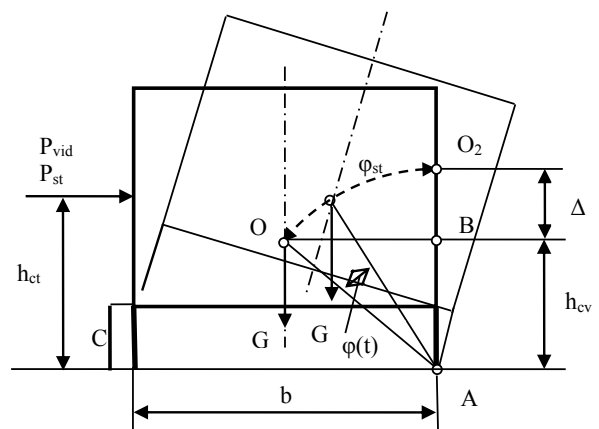


Рисунок. Автоматизоване робоче місце розрахунку уніфікованої командно-штабної машини МП32М1

© В.П. ГРЕКОВ, А.А.П'ЯНКОВ, С.В.ОРЛОВ, 2015

Швидкість розповсюдження фронту ПУХ більше швидкості звуку, а величина b рухомих агрегатів складає декілька метрів, тому перша фаза триває близько 0,01 с.

Характерним для першої фази є те, що в момент удару ПУХ по поверхні агрегату унаслідок різкого гальмування повітряних мас відбувається їхнє додаткове ущільнення й підвищення тиску. У цим разі на фронтальній поверхні агрегату виникає тиск віддзеркалення ΔP_{vid} , яке зберігається до закінчення фази обтікання й може бути визначено з виразу

$$\Delta P_{\text{vid}} = 2 \cdot \Delta P_f + \frac{6 \cdot \Delta P_f^2}{\Delta P_f + 7}. \quad (2)$$

У виразі (2) перший член враховує динамічність додатку навантаження до агрегату (раптовість додатку навантаження), а другий – підвищення тиску повітря за рахунок зупинки його частинок, які наткнулися на перешкоду.

В цій фазі, можливо, початок руху агрегату – зрушення або перекидання.

В другій фазі відбувається квазістаціонарне обтікання агрегату ПУХ. Друга фаза слідує безпосередньо за першою й її тривалістю, визначається часом фази стиснення. Ця фаза характерна тим, що результуюче навантаження на ППУ визначатиметься тиском повітряного потоку за фронтом ПУХ, тобто тиском швидкісного натиску квазістаціонарного обтікання ΔP_{st} , яке визначається по формулі

$$\Delta P_{\text{st}} = \frac{2.5 \cdot \Delta P_f^2}{\Delta P_f + 7}. \quad (2)$$

Таким чином, стійкість ППУ необхідно розглядати для двох послідовних фаз. У цим разі значення кінематичних параметрів руху ППУ (кут повороту, кутова швидкість і прискорення) в кінці першої фази повинно розглядатися як початкові для другої фази.

Оцінка стійкості ППУ проти перекидання протягом першої фази може бути визначено виходячи з таких міркувань. У разі взаємодії ПУХ з ППУ агрегат може почати перекидатися під дією моменту аеродинамічних сил, рівнодіючу яких прикладено в центрі вітрового тиску, щодо відповідного ребра перекидання. ППУ, перекидаючись, набуває кінетичної енергії W_k . У разі перекидання агрегату висота його центру тяжіння росте, що призводить до збільшення потенційної енергії ППУ W_p . Зростання потенційної енергії відбувається за рахунок зменшення його кінетичної енергії. Після

досягнення положення нестійкої рівноваги центр тяжіння агрегату підіймається на висоту Δ , а приріст потенційної енергії в порівнянні з початковим положенням агрегату складе

$$W_p = G \cdot \Delta, \quad (4)$$

де G – сила ваги ППУ, Н.

Умова відсутності перекидання ППУ від удару ПУХ в першій фазі прийме вигляд

$$W_k \leq W_p, \quad (5)$$

Для визначення W_k скористаємося законом збереження імпульсу для обертового руху

$$\Delta P_{\text{vid}} \cdot F_x \cdot h_{\text{ct}} \cdot t_1 = I_{\text{in}} \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \quad (6)$$

де ΔP_{vid} – надмірний тиск у відбитій ПУХ, Па; F – площа взаємодії ППУ з ПУХ, м²; h_{ct} – ордината центру тиску; t_1 – час натикання ПУХ на ППУ; I_{in} – масовий момент інерції ППУ щодо ребра обертання, Н·м²; $\frac{d\varphi}{dt}$ – кутова швидкість перекидання ППУ, 1/с.

З рівняння (5) знаходимо

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Delta P_{\text{vid}} \cdot F \cdot h_{\text{ct}} \cdot t_1}{I_{\text{in}}}. \quad (7)$$

Кінетична енергія ППУ в разі обертового руху

$$W_k = \frac{I_{\text{in}} \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2}{2}. \quad (8)$$

З метою оцінки стійкості ППУ в першій фазі необхідно порівняти повідомлену агрегату кінетичну енергію з його потенційною енергією в положенні нестійкої рівноваги. Якщо кінетичної енергії не достатньо, то перекидання ППУ в першій фазі не відбудеться. Далі необхідно розглянути рух ППУ в другій фазі. Кутова швидкість обертання агрегату $\frac{d\varphi}{dt}$ в кінці першої фази є початковою для обертання ППУ в другій фазі.

З метою оцінки стійкості ППУ в другій фазі розглянемо проміжне положення агрегату в процесі перекидання. Диференціальне рівняння обертання ППУ щодо ребра перекидання

$$I_{\text{in}} \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + M_G + M_C = M_{\Delta P_{\text{vid}}}, \quad (9)$$

де – M_G – момент сили ваги щодо ребра перекидання;

$$M_G = G \cdot \left(\frac{b}{2} - h_G \cdot \varphi \right), \quad (10)$$

h_G – висота центра маси; де $M_{\Delta P_{vid}}$ – момент, який створювано стаціонарною течією ПУХ щодо ребра перекидання;

$$M_{\Delta P_{vid}} = P_{st} \cdot h_{ct}, \quad (11)$$

C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору; h_{ct} – висота центру тиску;

$$M_C = C \cdot b^2 \cdot \varphi \quad (12)$$

M_C – момент, який створювано вітровим кріпленням із пружністю C щодо ребра перекидання, де C – пружність вітровим кріпленням.

З обліком (10 – 12) диференціальне рівняння обертання ППУ прийме вид

$$I_{in} \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{G \cdot b}{2} - (G \cdot h_G \cdot \varphi) + C \cdot b^2 \cdot \varphi = P_{st} \cdot h_{ct}. \quad (13)$$

$$bd = \frac{C \cdot b^2 - G \cdot h_G}{I_{in}}, \quad (14)$$

$$kd = \frac{P_{st} \cdot h_{ct} - \frac{G \cdot b}{2}}{I_{in}}. \quad (15)$$

Позначимо:

З обліком (14 – 15) диференціальне рівняння (13) прийме вид

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + bd \cdot \varphi = kd. \quad (16)$$

Вигляд рішення диференціального рівняння (16) залежить від знаку коло коефіцієнта bd . Якщо коефіцієнт $bd < 0$, що має місце в разі $C = 0$, то в (16) перед bd міняється знак на протилежний і його рішення буде мати вигляд

$$\varphi(t) = C1 \cdot e^{\sqrt{bd} \cdot t} + C2 \cdot e^{-\sqrt{bd} \cdot t} + D. \quad (17)$$

З умови $\varphi = 0$:

$$D = -\frac{kd}{bd}. \quad (18)$$

Постійні інтеграції диференціального рівняння знаходяться, виходячи з початкових умов у разі $t = 0$, $\varphi(t = 0)$

$$\frac{d}{dt} \varphi(t = 0) = \frac{d}{dt} fo. \quad (19)$$

Враховуючи короткочасність першої фази, приймаємо $\varphi(0) = 0$, знаходимо

$$C1 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{kd}{bd} + \frac{d}{dt} fo \right); \quad C1 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{kd}{bd} - \frac{d}{dt} fo \right).$$

Рішення (17) приймуть вигляд

$$\varphi(t) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{kd}{bd} + \frac{d}{dt} fo \right) \cdot e^{\sqrt{bd} \cdot t} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{kd}{bd} - \frac{d}{dt} fo \right) \cdot e^{-\sqrt{bd} \cdot t} + \frac{-kd}{bd}, \quad (20)$$

$$\varphi(t) = \frac{\sqrt{bd}}{2} \cdot \left(\frac{kd}{bd} + \frac{d}{dt} fo \right) \cdot e^{\sqrt{bd} \cdot t} - \frac{\sqrt{bd}}{2} \cdot \left(\frac{kd}{bd} - \frac{d}{dt} fo \right) \cdot e^{-\sqrt{bd} \cdot t} \quad (21)$$

Характер руху ППУ залежить від величини $\frac{kd}{bd}$.

У разі $k < 0$ й $\left| \frac{kd}{bd} \right| \geq \frac{d}{dt} fo$ значення $\frac{d\varphi}{dt}$ змінювати-

меться з часом від $\frac{d}{dt} fo$ до $\frac{d\varphi}{dt} < 0$.

Значення $\varphi(t)$ спочатку зростатиме, а потім зупиниться й стане зменшуватися до 0. Фізично це означає те, що агрегат встав на опори протилежні ребру перекидання. В цей момент $\frac{d\varphi}{dt}$ стрибком повертається в $\frac{d\varphi}{dt} = 0$.

Якщо коефіцієнт $kd > 0$, то в разі t , яке прагне до нескінченності $\varphi(t)$ й $\frac{d\varphi}{dt}$ також прагне до нескінченності.

У цим випадку необхідно обчислити $\varphi(t)$ й $\frac{d\varphi}{dt}$ для моменту часу, який відповідає кінцю фази, й якщо у цей момент $\varphi < \varphi_s st$, визначити чи досить запасеної до кінця другої фази кінетичної енергії з метою підйому центру тяжіння агрегату в положення нестійкої рівноваги.

Якщо коефіцієнт $bd > 0$, що має місце за наявності вітрового кріплення (велике C), рішення рівняння (14) ухвалить вигляд

$$\varphi(t) = C1 \cdot \cos(\sqrt{bd} \cdot t) + C2 \cdot \sin(\sqrt{bd} \cdot t) + D. \quad (22)$$

З умови $\varphi = 0$, маємо $D = \frac{kd}{bd}$.

Постійні інтеграції з урахуванням початкових умов у разі $\varphi(t = 0) = 0$ і $\frac{d}{dt} \varphi(t = 0) = \frac{d}{dt} fo$ визначають $C1 = \frac{-kd}{bd}$ і $C2 = \frac{d}{dt} fo$.

Рішення рівняння (17) приймуть вид

$$\varphi(t) = -\left(\frac{kd}{bd} \right) \cdot \cos(\sqrt{bd} \cdot t) + \left(\frac{d}{dt} fo \right) \cdot \sin(\sqrt{bd} \cdot t) + \frac{kd}{bd}, \quad (23)$$

$$\frac{d}{dt} \varphi = \left(\frac{kd}{bd} \right) \cdot \sin(\sqrt{bd} \cdot t) + \left(\frac{d}{dt} f_0 \right) \cdot \cos(\sqrt{bd} \cdot t). \quad (24)$$

У разі збільшенні жорсткості вітрового кріплення С рішення рівняння $\varphi(t) = 0$ і $\frac{d\varphi}{dt} = 0$.

Таким чином стійкість ППУ можна забезпечити установкою вітрового кріплення.

Висновок

Запропоновано аналітичний метод, який дозволяє визначити динамічну стійкість пересувних пускових установок і транспортних засобів під час наземних вибухів фугасних бойових частин.

Математичний апарат дозволяє оцінювати динамічну стійкість пересувних агрегатів під час їхнього проектування.

Список літератури

1. *Маликов В.Г. и др.* Наземное оборудование ракет. – М.: МО СССР, 1971. – 304 с.
2. *Краткий автомобильный справочник.* – М.: Транспорт, 1982. – 462 с.
3. *Конофеев Н.Т.* Транспортировка ракет. – М.: МО СССР, 1978. – 150 с.
4. *Попов Н.Н.* Расчет конструкций на динамические и специальные нагрузки. – М.: Высшая школа, 1992. – 320 с.
5. *Запрягаев М.М. та ін.* Армейские автомобили. – М.: МО СРСР, 1970. – 480 с.