

O SZACOWANIU AKTYWNEJ MASY ŁADUNKU MATERIAŁU WYBUCHOWEGO DO NAPĘDZANIA PŁASKIEGO LINERA

RADOSŁAW TRĘBIŃSKI, WALDEMAR TRZCIŃSKI
i EDWARD WŁODARCZYK (WARSZAWA)

W pracy przedstawiono nową metodę oszacowania wielkości aktywnej masy ładunku materiału wybuchowego przy miotaniu płaskiego linera. Metoda ta daje lepszą zgodność obliczonej prędkości linera z eksperymentalną niż metoda opisana w monografii [1]. W pracy zaproponowano metodykę doboru wielkości ładunku MW oraz drogi napędzania dla uzyskania pożądanej prędkości linera.

1. WSTĘP

W pracy [2] zaproponowano metodę szacowania wartości ciśnienia w wieloskładnikowych próbkach obciążonych udarem linera. Metoda ta pozwala określić prędkość linera potrzebną dla generacji w próbce fali uderzeniowej o określonej amplitudzie ciśnienia. Umożliwia to sterowanie parametrami procesu, przy których realizowana jest w płaskim układzie wybuchowym synteza supertwardych materiałów takich, jak diament i gęstoupakowane odmiany azotku boru.

Prędkość linera oszacowana za pomocą metody opisanej w pracy [2] jest punktem wyjścia do projektowania układu wybuchowego przeznaczonego do realizacji wymienionej syntezy. Dla doboru parametrów samego układu potrzebna jest z kolei znajomość zależności pomiędzy wielkościami charakteryzującymi liner (materiał, masa, rozmiary), ładunek (rodzaj materiału wybuchowego (MW), (masa, rozmiary) i układ (odległość linera od próbki), a prędkością uzyskiwaną przez liner. Najbardziej wiarygodną metodą określania tej zależności jest eksperymentalny pomiar prędkości linera [3]. Jednakże ze względów ekonomicznych wskazane jest stosowanie tej metody w fazie skalowania układu. Natomiast w fazie projektowania celowe jest wykorzystanie teoretycznych lub półempirycznych metod oszacowania prędkości linera.

Szeroko stosowanym sposobem określania prędkości linera jest półempiryczna metoda zaproponowana przez Gurnaya w 1943 roku. Zgodnie z tą metodą prędkość linera określa następujący wzór:

$$(1.1) \quad u_L = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{3}{1 + 5 \frac{m_w}{m} + 4 \left(\frac{m_w}{m}\right)^2}},$$

gdzie m_w/m oznacza stosunek masy MW do masy linera, E jest energią MW odniesioną do jednostki masy (tzw. energia Gurnaya). Wartości energii Gurnaya dla różnych MW , a także sposób wykorzystania wzoru (1.1) dla projektowania układu wybuchowego podano w pracy [4].

Wzór (1.1) określa maksymalną prędkość linera. Dla określenia drogi, na której ta prędkość jest osiągnięta, autorzy pracy [4] proponują wykorzystanie numerycznego rozwiązania jednowymiarowego problemu miotania linera produktami detonacji.

Odmienne podejście zaproponowano w monografii [1]. Opierając się na pewnych upraszczających założeniach (wykładnik izentropy produktów detonacji $k=3$, pomijalny skok entropii na fali uderzeniowej generowanej odbiciem fali detonacyjnej od linera) autorzy pracy [1] wyprowadzili następujące równania opisujące ruch linera:

$$(1.2) \quad u_L(t) = D \frac{1+\eta}{\eta} \frac{Dt(1+2\eta) - \eta l}{\eta t \sqrt{1+2\eta \left(1 - \frac{l}{Dt}\right)}}, \quad t \geq \frac{l}{D},$$

oraz

$$(1.3) \quad x(t) = Dt \left[1 + \frac{1 - \sqrt{1+2\eta \left(1 - \frac{l}{Dt}\right)}}{\eta} \right] - l,$$

$$\eta = \frac{16m_w}{27m},$$

gdzie D oznacza prędkość detonacji, l długość ładunku i x drogę napędzania linera.

Rozwiązanie problemu napędzania linera w kierunku przeciwnym do kierunku propagacji fali detonacyjnej (napędzanie przeciwbieżne) podano w pracy [5]. Rozwiązanie to jest poprawne dla dowolnej wartości wykładnika izentropy produktów detonacji.

Wpływ procesów falowych przebiegających w linerze i produktach detonacji na napędzanie linera badano na drodze numerycznej w pracach [6–11]. Natomiast w pracach [12, 13 i 14] przedstawiono przybliżone rozwiązania problemu współ- i przeciwbieżnego napędzania odkształcalnego linera. Wyniki analiz przeprowadzonych w pracach [6–14] wykazały, że zjawiska falowe mają istotny wpływ na napędzanie linera w pierwszej fazie procesu. W dalszej fazie procesu, gdy prędkość linera przewyższa 0,8 prędkości maksymalnej, uzyskuje się rozwiązania pozostające w dobrej zgodności z otrzymanymi

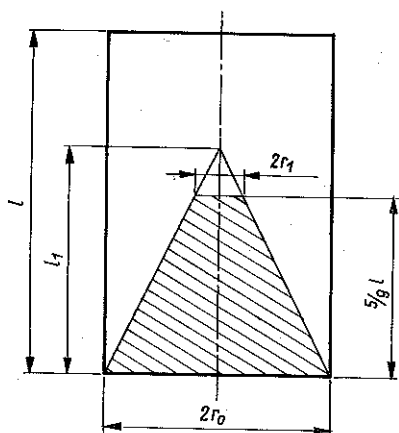
przy założeniu nieodkształcalności linera. W wymienionych pracach zakłada się jednowymiarowość ruchu produktów detonacji MW . Jest to założenie dość wyidealizowane, gdyż nawet w przypadku ładunku z otoczką występuje boczny rozlot produktów detonacji. Autorzy pracy [1] proponują uwzględnienie jego wpływu na proces napędzania linera przez wprowadzenie tzw. aktywnej masy ładunku m_A , którą zastępuje się we wzorach (1.2) i (1.3) rzeczywistą masę ładunku m_w . Jako aktywną masę ładunku przyjmuje się w pracy [1] część masy ładunku nie objętą działaniem bocznej fali odciążenia.

Jak pokazały badania eksperymentalne opublikowane w pracy [15], wykorzystanie wzoru na masę aktywną podanego w monografii [1] prowadzi do zaniżonych wartości prędkości linera. W niniejszej pracy zaproponowano odmienny niż w pracy [1] sposób określenia aktywnej masy ładunku. Wzory na aktywną masę i długość ładunku wyprowadzono w drugim rozdziale pracy. Pokazano, że wzory te dają znacznie lepszą zgodność z doświadczeniem niż wzory podane w pracy [1]. W rozdziale trzecim opisano metodykę doboru wielkości ładunku MW oraz drogi napędzania dla uzyskania pożądanej prędkości linera. Podsumowania wyników pracy dokonano w rozdziale czwartym.

2. OKREŚLENIE AKTYWNEJ MASY I DŁUGOŚCI ŁADUNKU

Zgodnie z teorią hydrodynamiczną przy jednowymiarowym rozlocie produktów detonacji, traktowanych jako gaz politropowy o wykładniku izentropii $k = 3$, w kierunku propagacji fali detonacyjnej porusza się $5/9$ masy produktów. Oszacujmy jaka część tej masy nie objęta jest działaniem bocznej fali odciążenia.

Zgodnie z wynikami analizy prędkości propagacji frontu fali rozrzedzenia, zamieszczonymi w pracy [5], w rozpatrywanym przypadku można



Rys. 1

przyjąć, że prędkość dźwięku na froncie fali rozrzedzenia wynosi $D/2$. Wówczas odległość od końca ładunku do miejsca na osi ładunku, gdzie dochodzi fala rozrzedzenia wynosi $l_1 = 2r_0$ (rys. 1) Symbol r_0 oznacza promień ładunku. Wielkość masy poruszającej się w kierunku propagacji fali detonacyjnej i nie objętej działaniem bocznych fal rozrzedzenia wyraża się w sposób następujący:

$$(2.1) \quad m_1 = \frac{1}{3} \pi \rho_0 \left[r_0^2 l_1 - r_1^2 \left(l_1 - \frac{5}{9} l \right) \right].$$

Podstawiając $l_1 = 2r_0$ oraz

$$r_1 = r_0 \left(1 - \frac{5}{18} \frac{l}{r_0} \right),$$

otrzymujemy

$$(2.2) \quad m_1 = \frac{5}{9} \pi \rho_0 r_0^2 l \left[1 - \frac{5}{18} \frac{l}{r_0} + \frac{25}{972} \left(\frac{l}{r_0} \right)^2 \right].$$

Ze względu na to, że w przypadku jednowymiarowego rozlotu całkowita masa ładunku stanowi $9/5$ masy produktów detonacji poruszających się w kierunku propagacji fali detonacyjnej, przyjmujemy przez analogię, że aktywna masa ładunku równa jest $9/5 m_1$:

$$(2.3) \quad m_A = \frac{9}{5} m_1 = \pi \rho_0 r_0^2 l \left[1 - \frac{5}{18} \frac{l}{r_0} + \frac{25}{972} \left(\frac{l}{r_0} \right)^2 \right].$$

Uwzględniając, że całkowita masa ładunku wyraża się wzorem

$$(2.4) \quad m_w = \pi \rho_0 r_0^2 l,$$

otrzymujemy

$$(2.5) \quad m_A = m_w \left[1 - \frac{5}{18} \frac{l}{r_0} + \frac{25}{972} \left(\frac{l}{r_0} \right)^2 \right].$$

w przypadku gdy $l_1 \leq \frac{5}{9} l$ ($l \geq \frac{18}{5} r_0$), mamy

$$(2.6) \quad m_1 = \frac{1}{3} \pi \rho_0 r_0^2 l_1 = \frac{2}{3} m_w \frac{r_0}{l},$$

i masa aktywna określona jest wzorem

$$(2.7) \quad m_A = \frac{6}{5} m_w \frac{r_0}{l}.$$

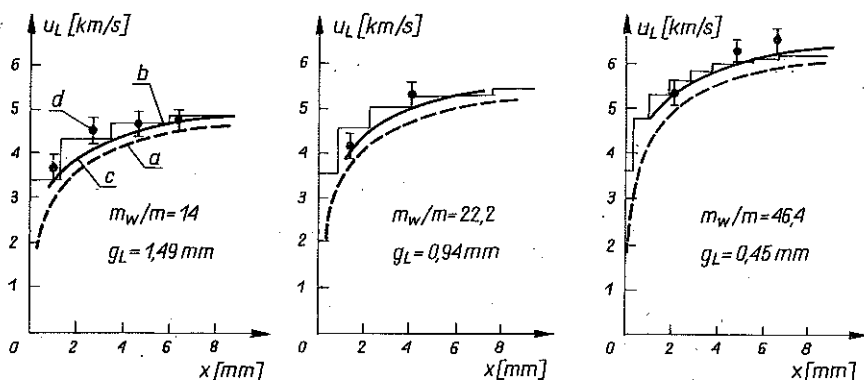
Aktywną długość ładunku określamy w sposób następujący:

$$(2.8) \quad l_A = l \frac{m_A}{m_w},$$

zatem

$$(2.9) \quad l_A = \begin{cases} l \left[1 - \frac{5}{18} \frac{l}{r_0} + \frac{25}{972} \left(\frac{l}{r_0} \right)^2 \right] & \text{dla } l < \frac{18}{5} r_0 = 3,6r_0, \\ \frac{6}{5} r_0 & \text{dla } l \geq \frac{18}{5} r_0 = 3,6r_0. \end{cases}$$

Wykorzystując wyprowadzone wzory obliczono aktywną masę i długość ładunku dla warunków eksperymentu opisanego w pracy [15]. Wstawiając m_A i l_A na miejsce m_w i l we wzorach (1.2) i (1.3), określono prędkości linera jako funkcję przebytej drogi x .



Rys. 2

Na rys. 2 przedstawiono wykresy funkcji $u_L(x)$ otrzymane przy wykorzystaniu wzorów podanych w monografii [1] (krzywa *a*), wzorów podanych w niniejszej pracy (krzywa *c*), oraz według metody opisanej w pracy [12] (krzywa *b*). Na wykresach naniesiono również punkty eksperymentalne oznaczone literą *d*, które wzięto z pracy [15]. Jak wynika z przedstawionych wykresów, zaproponowany w niniejszej pracy sposób określania aktywnej masy i długości ładunku daje znacznie lepszą zgodność wyników obliczeń i eksperymentu od sposobu opisanego w monografii [1]. Godnym uwagi jest fakt, że przy prędkości linera większej od 0,8 wartości maksymalnej proponowana metoda daje wyniki nie gorsze od znacznie bardziej skomplikowanej obliczeniowo metody opisanej w pracy [12].

3. METODYKA DOBORU MASY ŁADUNKU I DROGI NAPĘDZANIA LINERA

Projektując układ wybuchowy, w którym realizowana jest synteza super-twardych materiałów, dobiera się prędkość linera w ten sposób, aby po jego zderzeniu z próbką uzyskać w niej wartości ciśnienia i temperatury

zapewniające wysoką wydajność przemiany. Czas trwania obciążenia reguluje się przez odpowiedni dobór grubości linera. Z kolei promień linera dobiera się w ten sposób, aby był on co najmniej o jedną grubość próbki większy od jej promienia. Pozwala to wyeliminować wpływ bocznego obciążenia na ruch fali uderzeniowej w próbce oraz wpływ na proces zderzenia deformacji brzegów linera. Przy danych wymiarach linera pozostaje do określenia droga jego napędzania oraz masa ładunku MW . Czynniki te zapewniają odpowiednią prędkość linera w momencie uderzenia w próbkę.

Przejdziemy obecnie do opisu sposobu doboru tych wielkości.

Przedstawmy zależności określające prędkość i drogę napędzania linera w następującej postaci:

$$(3.1) \quad u_L = \alpha D f_1(\eta),$$

$$(3.2) \quad x = l f_2(\alpha, \eta) f_4\left(\frac{l}{r_0}\right),$$

$$(3.3) \quad \eta = \frac{16 \varrho_w r_0}{27 \varrho_L \varrho_L} f_3\left(\frac{l}{r_0}\right),$$

gdzie

$$f_1(\eta) = \eta^{-1} (1 + \eta - \sqrt{1 + 2\eta}),$$

$$f_2(\alpha, \eta) = t \left[1 + \frac{1 - \sqrt{1 + 2\eta} (1 - t^{-1})}{\eta} \right] - 1,$$

$$f_3\left(\frac{l}{r_0}\right) = \begin{cases} \frac{l}{r_0} \left[1 - \frac{5}{18} \frac{l}{r_0} + \frac{25}{972} \left(\frac{l}{r_0}\right)^2 \right] & \text{dla } \frac{l}{r_0} < 3,6, \\ 1,2 & \text{dla } \frac{l}{r_0} \geq 3,6, \end{cases}$$

$$f_4\left(\frac{l}{r_0}\right) = \frac{r_0}{l} f_3\left(\frac{l}{r_0}\right).$$

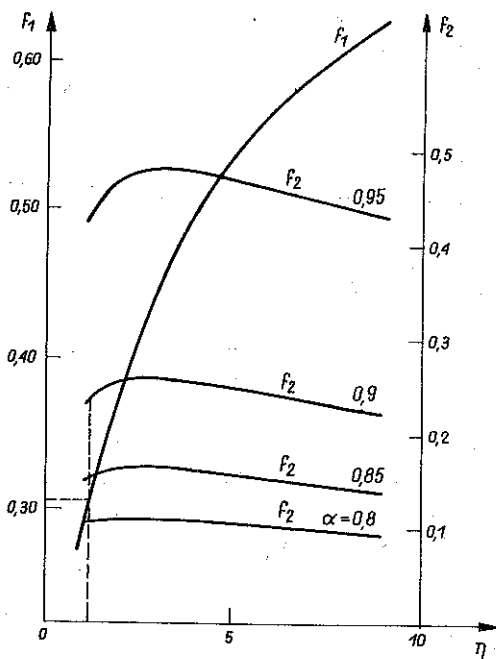
Symbol α oznacza stosunek prędkości linera do prędkości maksymalnej $u_{\max} = D f_1(\eta)$, ϱ_w — gęstość MW , ϱ_L — gęstość materiału linera oraz ϱ_L — grubość linera. Wielkość t określa się ze wzoru

$$(3.4) \quad \bar{t} = \frac{\eta}{1 + 2\eta} \left(1 + \frac{A}{\sqrt{A^2 - 1 - 2\eta}} \right),$$

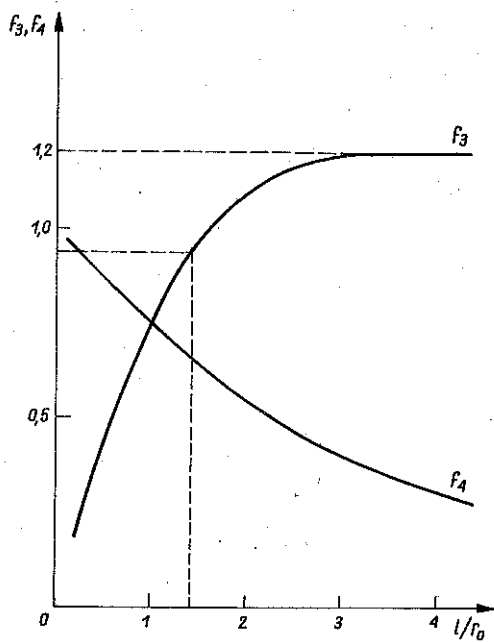
gdzie

$$A = (1 + \eta)(1 - \alpha) + \alpha \sqrt{1 + 2\eta}.$$

Na rys. 3 przedstawiono wykresy funkcji $f_1(\eta)$ i $f_2(\alpha, \eta)$ dla $\alpha = 0,8$; $0,85$; $0,9$; $0,95$ na rys. 4 zaś wykresy funkcji $f_3(l/r_0)$ i $f_4(l/r_0)$. Wykresami tymi



Rys. 3



Rys. 4

można się posłużyć przy doborze masy ładunku i drogi napędzania linera. Sposób postępowania jest przy tym następujący.

Korzystając z danych wartości u_L i D oraz obierając pewną wartość współczynnika α , obliczamy wartość funkcji $f_1(\eta)$, która zgodnie ze wzorem (3.1) wynosi

$$(3.5) \quad f_1(\eta) = \frac{u_L}{\alpha D}.$$

Następnie korzystając z wykresów funkcji $f_1(\eta)$ i $f_2(\alpha, \eta)$, określamy η oraz odpowiadającą mu wartość f_2 . Znając η obliczamy wartość funkcji $f_3(l/r_0)$:

$$(3.6) \quad f_3\left(\frac{l}{r_0}\right) = \frac{27q_L g_L}{16q_w r_0} \eta.$$

Opierając się na wykresie $f_3(l/r_0)$ określamy l/r_0 oraz odpowiadającą mu wartość $f_4(l/r_0)$. Korzystając z wartości l/r_0 obliczamy l , a następnie z (3.2) wartość x . Masę ładunku znajdujemy ze wzoru (2.4).

Dla ilustracji opisanego powyżej sposobu postępowania posłużymy się następującym przykładem. Przyjmujemy następujące dane wyjściowe: $u_L = 2300$ m/s, $q_L = 8930$ kg/m³, $r_0 = 35$ mm, $q_L = 3$ mm, $D = 8260$ m/s, $q_w = 1669$ kg/m³ oraz $\alpha = 0,9$. Korzystając ze wzoru (3.5) obliczamy $f_1(\eta) = 0,309$. Na podstawie wykresów funkcji $f_1(\eta)$ i $f_2(\alpha, \eta)$ określamy $\eta = 1,2$ oraz $f_2 = 0,238$. Następnie zgodnie ze wzorem (3.6) obliczamy $f_3(l/r_0) = 0,934$. Z wykresów przedstawionych na rys. 4 odczytujemy $(l/r_0) = 1,4$ ($l = 49$ mm) i $f_4(l/r_0) = 0,66$. Korzystając ze wzorów (3.2) i (2.4) obliczamy $x = 7,7$ mm i $m_w = 0,313$ kg.

Istotne znaczenie w opisaney wyżej metodzie ma dobór współczynnika α . Wybór wartości α mniejszej od 0,9 jest niecelowy, gdyż prowadzi do nieefektywnego wykorzystania energii wybuchu. Z drugiej strony wybór α większego od 0,95 prowadzi do znacznego wydłużenia drogi napędzania linera. Przyjmując w rozpatrzonym wyżej przykładzie $\alpha = 0,95$ otrzymalibyśmy $m_w = 0,271$ kg i $x = 14,7$ mm, przyjmując zaś $\alpha = 0,98$ otrzymalibyśmy $m_w = 0,250$ kg i $x = 22$ mm. Jak stąd wynika, zwiększenie α z 0,95 do 0,98 pozwala zmniejszyć masę ładunku o 8%, wymaga jednakże wydłużenia drogi napędzania linera o 50%. Nadmierne wydłużenie drogi napędzania linera prowadzi może do wystąpienia niepożądanych zjawisk takich, jak przenikanie produktów detonacji do przestrzeni pomiędzy linerem i próbką oraz deformacji linera na skutek działania bocznego odciążenia. Z tego względu wskazany jest wybór α z przedziału (0,9; 0,95).

Na marginesie rozpatzonego przykładu chcielibyśmy zwrócić uwagę na problem, który pojawia się przy doborze parametrów układu wybuchowego. Otóż założmy, że przyjmujemy grubość linera $g_l = 4$ mm. Wówczas mamy $f_3 = 1,245$. Jest to wartość przekraczająca maksymalną wartość funkcji $f_3(l/r_0)$.

Oznacza to, że w rozpatrywanym układzie nie jest możliwe osiągnięcie prędkości linera o grubości 4 mm równej 2300 m/s. Aby osiągnąć taką prędkość należałoby zwiększyć promień linera i ładunku. Załóżmy teraz, że zmniejszymy nieco grubość linera do wartości 3,85 mm. Wówczas $f_3 = 1,99$ i $l = 105$ mm. A zatem zwiększając grubość linera w porównaniu z założoną w przykładzie o 28%, jesteśmy zmuszeni zwiększyć masę ładunku ponad dwukrotnie, aby zachować żadaną prędkość linera. Wynika stąd, że przy projektowaniu układu wybuchowego należy unikać sytuacji, w której $f_3 (l/r_0) > 1,1$, gdyż powyżej tej wartości gwałtownie spada efektywność procesu napędzania linera.

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiliśmy nową metodę oszacowania aktywnej masy ładunku *MW* przeznaczonego do napędzania płaskiego linera. Metoda ta daje znacznie lepszą zgodność obliczonej prędkości linera z eksperymentalną niż sposób opisany w monografii [1]. W pracy zaproponowano również metodę doboru ładunku *MW* i drogi napędzania linera.

Stosowanie tej metody ma dwa ograniczenia. Po pierwsze, może być ona stosowana jedynie w odniesieniu do *MW*, których efektywny wykładnik izentropy produktów detonacji jest bliski liczbie 3. Po drugie odnosi się ona do układów, w których prędkość linera w momencie uderzenia w próbkę osiąga co najmniej 0,8 wartości maksymalnej. W odniesieniu do układów, w których realizowana jest synteza supertwardych materiałów, stwierdzamy, że nie są to istotne ograniczenia. Wynika to z faktu, iż z reguły stosuje się w nich silne *MW* o dużej gęstości. Dla materiałów tych wykładnik izentropy $k \approx 3$ [16]. Z kolei (ze względów ekonomicznych) celowe jest takie zaprojektowanie układu, aby prędkość linera zbliżona była do maksymalnej.

Zaproponowaną metodykę można stosować również w celu oszacowania od góry masy ładunku i drogi napędzania linera w przypadku stosowania *MW*, dla których $k < 3$.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. Ф. А. БАУМ, Л. П. ОРЛЕНКО, К. П. СТАНЮКОВИЧ, В. П. ЧЕЛЫШЕВ, Б. И. ШЕХТЕР, *физика взрыва*, Москва 1975.
2. R. TRĘBIŃSKI, W. TRZCIŃSKI, E. WŁODARCZYK, Pressure estimate at the shock wave front produced in multicomponent specimen, *J. Techn. Phys.* 27, 3, 1986.
3. Г. И. КАНЕЛЬ, А. М. МОЛОДЕЦ, А. А. ВОРОБЬЕВ, *О метании пластин взрывом*, ФГВ, №3, 1974.

4. P. S. De CARLI, M. A. MEYERS, *Design of uniaxial strain shock recovery experiments in shock waves and high-strain-rate phenomena in metals*, Plenum Press, New York-London, 1981.
5. E. WŁODARCZYK, A. WISNIEWSKI, *The influence of the diaphragm of a cumulation charge on the propagation of the lateral expansion wave of gaseous detonation products*, J. Tech. Phys., **23**, 2, 1982.
6. B. O. LAMBOUR, J. E. HARLEY, Proc. 4-th Symposium on Detonation, Washington 1965.
7. A. VIDART, P. BEATRIX a.o., Proc. 4-th Symposium on Detonation, Washington 1965.
8. H. KNOEFFEL, *Pulsed high magnetic fields*, North Holland Publishing Company, Amsterdam-London, 1970.
9. J. TYL, E. WŁODARCZYK, *O napędzaniu płaskich płytek (linerów) w próżni za pomocą produktów wybuchu*, Biul. WAT, **24**, 7, 1980.
10. J. TYL, E. WŁODARCZYK, *Analiza procesu napędzania płytek (linerów) w próżni za pomocą materiałów wybuchowych*, Rozp. Inż., **29**, 3, 1981.
11. R. ŚWIERCZYŃSKI, J. TYL, E. WŁODARCZYK, *Single-stage, layered setup for driving the plane-symmetry liners*, J. Techn. Phys. **26**, 2, 1985.
12. В. С. ТРОФИМОВ, *Элементарный метод оценки параметров заряда ВВ для плоского метания металлической пластины*, ФГВ, №1, 1976.
13. E. WŁODARCZYK, *Hamowanie rozlotu produktów detonacji przez warstwę ośrodka sprężystego*, Rozp. Inż., **32**, 1, 1984.
14. E. WŁODARCZYK, *Slowing down the expansion of detonation products by a nonelastic layer*, J. Techn. Phys., **24**, 3, 1983.
15. H. DERENTOWICZ, W. DYBEK, J. WRÓBEL, Z. ZIOŁKOWSKI, J. ZYGMUNT, *Wytwarzanie silnych fal uderzeniowych w deuterze w wybuchowym generatorze Voitenki*, Biul. WAT, **33**, 5, 1984.
16. E. WŁODARCZYK, *Plane expansion of real detonation products, Closed form solutions*, J. Techn. Phys., **25**, 3-4, 1984.

РЕЗЮМЕ

ОБ ОЦЕНКЕ АКТИВНОЙ МАССЫ ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ДЛЯ РАЗГОНА ПЛОСКОГО ЛАЙНЕРА

В работе представлен новый метод оценки величины активной массы заряда взрывчатого вещества (ВВ) при метании плоского лайнера. Этот метод дает более лучшее совпадение рассчитанной скорости лайнера с экспериментальной скоростью, чем метод описанный в монографии [1]. В работе предложен метод подбора величины заряда ВВ, а также пути разгона для получения требуемой скорости лайнера.

SUMMARY

ESTIMATION OF THE ACTIVE MASS OF EXPLOSIVES IN PLANE
LINER DRIVING

The paper presents a new method of estimation of the active mass of explosives used for plane liner driving. This method leads to results which are in better agreement with the experimental data than that described in the book [1]. The method of selection of proper mass of explosives and of the driving path necessary to obtain the required speed of the liner is given in the paper.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

Praca została złożona w Redakcji w dniu 14 lutego 1986 r.
