



OCENA SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA ŁADUNKÓW KUMULACYJNYCH NA PODSTAWIE ROZWIĄZAŃ NUMERYCZNYCH

NUMERICAL ESTIMATION OF SHAPED CHARGES EFFICIENCY

Jan BAGROWSKI, Rafał BAZELA, Jacek BORKOWSKI, Paweł PODGÓRZAK
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka
Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszyński St., 05-220 Zielonka, Poland
Author's e-mail address: bagrowskij@witu.mil.pl; ORCID: 0000-0003-3097-9515

Karol JACH

Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46
Military University of Technology, 2 Sylwestra Kaliskiego St., 00-908 Warsaw, Poland

DOI 10.5604/01.3001.0013.3758

Streszczenie: W artykule przedstawiono oceny maksymalnych głębokości wnikania strumieni kumulacyjnych w stal pancerną w funkcji odległości od podstawy wkładki. Dane – chwilowe współrzędne położeń, mas oraz prędkości elementów strumieni były wynikiem obliczeń numerycznych działania wybranych konstrukcji ładunków kumulacyjnych. Pokazano, iż głębokość krateru jest funkcją dopuszczalnego wydłużenia elementów strumienia oraz ich minimalnej prędkości. Wyniki porównano z danymi doświadczalnymi.

Słowa kluczowe: fizyka wybuchu, kumulacja, metody numeryczne

1. Wstęp

W pracy zaprezentowano oceny skuteczności działania – maksymalnych głębokości przebiccia stali – wybranych, typowych ładunków kumulacyjnych z wkładkami stożkowymi w funkcji ich parametrów konstrukcyjnych (Bagrowski i in., 2018; Jach, 2018a; Jach, 2018b). Przyjęto schemat oceny podobny jak w pracy (Held, 1988), z tym, że zamiast zależności analitycznych opartych na danych z chwilowych rentgenogramów strumieni kumulacyjnych, posłużono się charakterystykami strumieni uzyskanymi z obliczeń numerycznych.

Abstract: The paper shows the estimations of maximal penetration depths of shaped charge jets in a steel armour as a function of stand-off distance to the liner base. The data – instantaneous coordinates of positions, masses, and velocities of jet elements was received as results of numerical calculations for selected examples of designs of shaped charges. It was shown that the crater's depth is a function of acceptable maximal extension of jet elements and their minimal velocity. The results were compared with experimental data.

Keywords: physics of explosion, liner collapse effect, numerical methods

1. Introduction

The paper evaluates an efficiency – maximal depths of steel penetration – of some typical shaped charges with conical liners as a function of their designing parameters (Bagrowski et al., 2018; Jach, 2018a; Jach, 2018b). The evaluating process was similar as accepted in (Held, 1988), but analytical dependencies based on data from collapsing jet X-ray instant pictures were replaced by jet characteristics received with numerical calculations. In the discussed case all parameters of a shaped

W naszym przypadku są sukcesywnie, co jedną mikrosekundę obliczane wszystkie wielkości danego strumienia kumulacyjnego. Mając charakterystyki strumienia w danej chwili oraz wykorzystując rozwiązania na wnikanie, oparte na modelu hydrodynamicznym (Walters i Zukas, 1989), obliczano głębokości kraterów w czasie, w zależności od długości efektywnej strumienia dla danej chwili oraz od położenia targetu względem ładunku kumulacyjnego odpowiadającego położeniu czoła strumienia dla tej chwili. Długość efektywna strumienia jest ograniczona przyjmowaną minimalną prędkością elementów strumienia. Obliczone charakterystyki maksymalnych głębokości wnikania oraz odpowiadających im czasów w funkcji dystansu przegrody od podstawy wkładki kumulacyjnej dla wybranych długości efektywnych strumieni, uzupełnione pomiarami uzyskiwanych głębokości kraterów co najmniej dla kilku dystansów, stanowią podstawową ocenę (charakterystykę) skuteczności i jakości działania danej głowicy kumulacyjnej (GK).

W rozdziale 2 przedstawiono opis charakterystyk strumieni kumulacyjnych uzyskiwanych z obliczeń numerycznych oraz elementy hydrodynamicznego modelu wnikania. W rozdziale 3 zaprezentowano wyniki obliczeń charakterystyk skuteczności działania trzech badanych numerycznie GK, różniących się wartościami kątów wierzchołkowych wkładek (42° , 51° i 60°). Ponadto dokonano takich ocen dla GK różniących się parametrami układu pobudzenia ładunków. Przedstawiono również porównanie obliczonych charakterystyk skuteczności działania dwóch GK, Malutkiej i PG-9 z wynikami eksperymentu. Podsumowanie i wnioski są w rozdziale 4.

2. Charakterystyki strumieni kumulacyjnych i ich wnikanie w przegrodę

2.1. Chwilowe charakterystyki strumienia kumulacyjnego

Strumień kumulacyjny składa się z indywidualnych elementów wkładki (iew)¹,

charge jet are calculated at each successive microsecond. Depths of craters in time function were calculated in dependence of jet effective length for the specific moment of time and target position against the shaped charge, being the position of jet tip at this time, by using jet characteristics for a specific instant and penetrating solutions based on a hydrodynamical model (Walters & Zukas, 1989). The effective extension of the jet is limited by accepted minimal velocity of jet elements. Characteristics of maximal penetration depths with their corresponding times as a function of the distance between the target and the shaped charge liner base calculated for some selected lengths of the jets, and completed by the measurements of craters depths for at least a few stand-offs, create the basic evaluation (characteristics) of efficiency and quality for a particular shaped charge (GK - głowica kumulacyjna).

Chapter 2 of the paper describes characteristics of collapsing jets, received with the numerical calculations, and some components of the hydrodynamical model of penetration. Chapter 3 presents the calculated results for the efficiency of three GK which were numerically investigated for three different apex angles of liners (42° , 51° and 60°). Moreover such evaluations were also carried out for GKs with different parameters of systems used to detonate the charges. Additionally a comparison of calculated and experimental efficiencies for two GKs from *Malutka* and *PG-9* is presented. The summary and conclusions are included in chapter 4.

2. Shaped Charge Jets Characteristics and Target Penetration

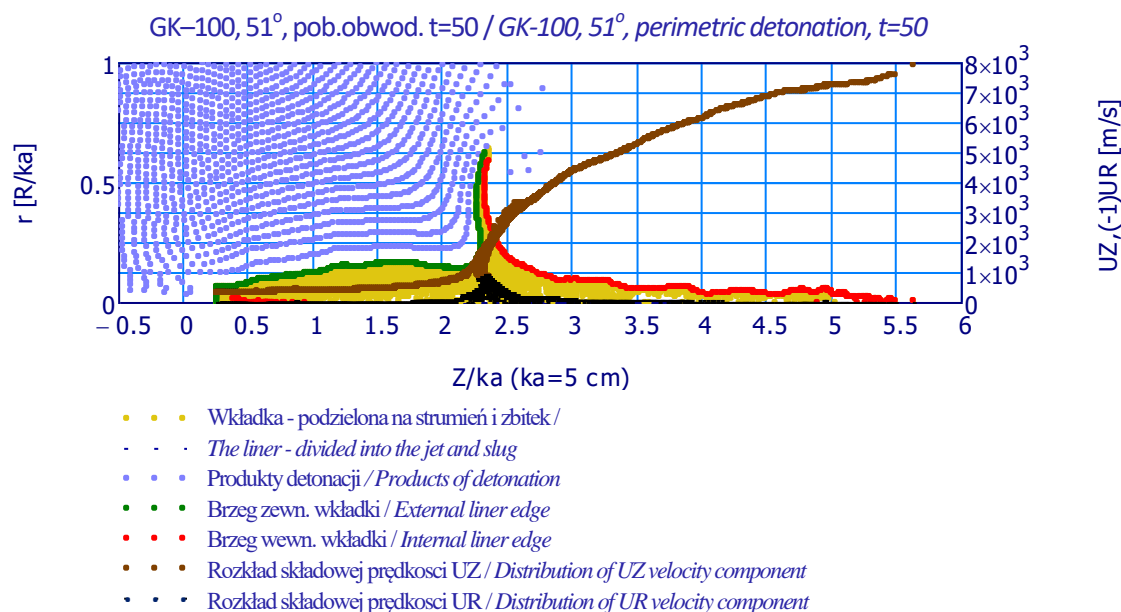
2.1. Instantaneous Characteristics of Shaped Charge Jet

The shaped charge jet consists of individual liner elements (ILE)² identified by

¹ Indywidualne elementy wkładki są tożsame z komórkami numerycznego podziału wkładki kumulacyjnej. W zastosowanej, numerycznej metodzie punktów swobodnych (Jach, 2018a, 2018b) wkładka, wzdłuż osi, jest dzielona na około 100 odcinków prostopadłe do tworzącej, które zostały nazwane elementami wkładki. Każdy

określonych początkowymi położeniami (zL , rL) i ich masami (mL) (Bagrowski i in., 2018). Dla celów oceny działania strumienia (głębokości wnikania) elementy te można scharakteryzować podając tylko wartości parametrów kinematycznych - położen ($Z(zL, t)$; $R(zL, t)$) i prędkości ($U(zL, t)=UZ(zL, t)$, $UR=0$) oraz ich masy (mL).

the original positions (zL , rL) and their masses (mL) (Bagrowski et al., 2018). In order to assess the effects of jet action (penetration depths) these elements may be characterised by giving only kinematic parameters - locations ($Z(zL, t)$; $R(zL, t)$) and velocities ($U(zL, t)=UZ(zL, t)$, $UR=0$) and their masses (mL).



Rys. 1. Charakterystyki kumulacji wkładki o kącie wierzchołkowym 51° i średnicy podstawy 100 mm w chwili 50μs. Współrzędne są unormowane do promienia podstawy wkładki (ka). Zaznaczono bieżące położenia elementów brzegowych wkładki – zewnętrzne tworzą obwiednię zbitka, wewnętrzne obwiednię strumienia. Widać, iż w podanej chwili trwa jeszcze zbieganie się elementów wkładki do osi ($UR \neq 0$), ale już w niewielkim obszarze. Czoło strumienia ma prędkość 8 km/s, tylne elementy około 2 km/s

Fig. 1. Collapse characteristics of a liner with apex angle 51° and base diameter 100 mm for the moment of 50μs. The coordinates are normalised against the liner base radius (ka). The current positions of the edge liner elements are marked – the external ones create the envelope of the slug, and the internal ones the envelope of the jet. It may be seen that for the given time some liner elements are still collapsing towards the axis ($UR \neq 0$) but in a relatively small area. The velocity of jet tip is 8.0 km/s, of rear elements ca. 2.0 km/s

Ponadto, grupując je w niewielkich, skończonych obszarach wzdłuż osi (z , $z + \Delta z$) tworzymy elementy strumienia, dla których możemy przypisać uśrednione prędkości,

Moreover by arranging them into small finite areas along the axis (z , $z + \Delta z$) the elements of the jet are created and designated by their mean velocities, the radii

taki element składa się z 72 komórek numerycznych, które, dla celów analizy tworzenia się strumienia kumulacyjnego, nazwano indywidualnymi elementami wkładki.

² Individual elements of the liner are equivalent to the cells of numerical division of the shaped charge liner. In the applied numerical method of free points (Jach, 2018a, 2018b) the liner is divided vertically to the contour on ca. 100 segments which are named as the liner elements. Every such element contains 72 numerical cells, which are named as the individual liner elements, to facilitate the analysis of shaped charge jet creation.

promienie raz ich długości, a także wartości współrzędnych Z. Masa danego, utworzonego elementu strumienia jest sumą wchodzących do niego mas indywidualnych elementów wkładki. Na rys. 1 pokazano przykładowy obraz kumulacji wkładki głowicy kumulacyjnej o kalibrze 100 mm w chwili 50 μ s od momentu pobudzenia ładunku.

Schemat tworzenia elementów strumienia jest następujący. Cały strumień kumulacyjny, włącznie ze zbitkiem, w danej chwili jest dzielony na N (> lub = 500) jednakowej długości odcinków wzdłuż osi symetrii ładunku. Każdy odcinek (element strumienia) jest numerowany (nz = 0,1,2, ..., N-1), licząc od czoła strumienia i może zawierać różną liczbę indywidualnych elementów wkładki w zależności od jego położenia wzdłuż osi. Puste elementy strumienia oznaczają miejsca, w których nastąpiło pęknięcie strumienia (gęstość = 0).

W dowolnie wybranej chwili $t = t_n$, na podstawie posiadanych danych numerycznych o indywidualnych elementach wkładki, które znalazły się w elemencie strumienia o numerze nz, możemy określić i przypisać temu elementowi strumienia następujące wielkości:

- $z_{\min}(nz)$ i $z_{\max}(nz)$ – skrajne położenia iew wzdłuż osi (w elemencie strumienia nz);
- $z_m(nz)$ – średnie położenie;
- $\Delta z_0(nz) = z_{\max}(nz) - z_{\max}(nz+1)$ – długość;
- $U(nz)$ – średnia prędkość;
- $R(nz)$ – średni promień;
- $\rho(nz) = 0$ dla elementów strumienia pustych, ρ_0 (gęstość początkowa wkładki) w pozostałych przypadkach;
- $m(nz) =$ suma mas iew wchodzących elementu strumienia.

Przykładowe charakterystyki strumieni kumulacyjnych, które zostały określone w powyższy sposób, przedstawiono na rys. 2. Strumienie te przedstawiają działanie głowic kumulacyjnych o kalibrze 100 mm. Głowice posiadały jednakowe wkładki (parametr geometryczny³ $mk = 0,077$), różniły się materiałami osłon bocznych ładunków. Pokazano rozkłady prędkości elementów strumieni oraz ich promieni w funkcji współrzędnej osiowej

and lengths, and the values of Z coordinates. The mass of a specific jet element is a sum of masses of individual liner elements it consists of. Fig. 1 shows an exemplary picture of liner collapse for a 100 mm calibre shaped charge head in the instant of 50 μ s after the charge initiation.

The elements of the jet are created in the following way. The whole shaped charge jet and the slug are divided for the specific moment of time into N (> or = 500) identical segments along the axis of charge symmetry. Each segment (element of the jet) can contain different number of individual liner elements depending on its location on the axis and is numbered (nz = 0,1,2, ...,N-1) counting from the jet tip. The empty elements of the jet are in the places where the breaking of the jet has occurred (density = 0).

For a randomly taken moment of time $t = t_n$ following parameters may be identified and attributed to this element of the jet on the basis of available numerical data about individual liner elements:

- $z_{\min}(nz)$ and $z_{\max}(nz)$ – extreme positions of ILE along axis (within nz jet element);
- $z_m(nz)$ – mean position;
- $\Delta z_0(nz) = z_{\max}(nz) - z_{\max}(nz+1)$ – length;
- $U(nz)$ – mean velocity;
- $R(nz)$ – mean radius;
- $\rho(nz) = 0$ for empty jet elements,
- ρ_0 (liner original density) for other cases;
- $m(nz) =$ the sum of ILE masses contributing into the jet element.

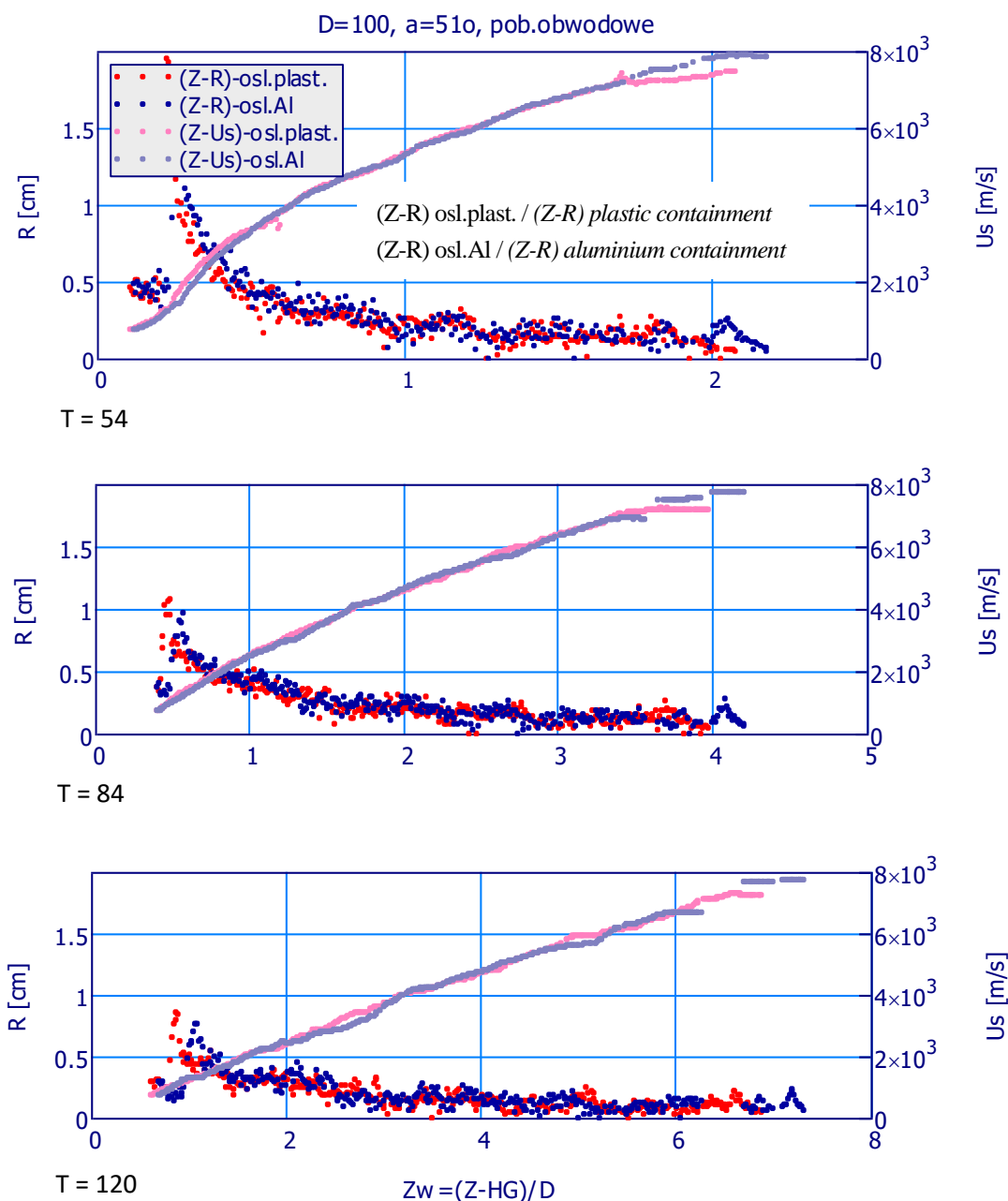
Exemplary characteristics of shaped charge jets which were identified in the above way are presented in Fig. 2. These jets illustrate the operation of 100 mm calibre shaped charge heads. The heads had identical liners (geometrical parameter⁴ $mk = 0.077$) but different lateral containments of charges. Distributions of velocities for the jet elements and their radii versus the axial coordinate are shown

³ $mk =$ masa wkładki/ $(\pi R^3 \rho_0)$, gdzie odpowiednio R – promień podstawy wkładki oraz ρ_0 – gęstość jej materiału.

⁴ $mk =$ mass of the liner/ $(\pi R^3 \rho_0)$, where respectively: R – the radius of liner base and ρ_0 – the density of its material.

dla trzech różnych czasów liczonych od momentu pobudzenia ładunku.

for three different times counted from the moment of charge detonation.



Rys. 2. Ilustracja charakterystyk dwóch strumieni kumulacyjnych – prędkości ich elementów oraz promieni w funkcji względnej współrzędnej osiowej – dla trzech czasów 54, 84 i 120 μs liczonych od pobudzenia ładunków. Współrzędna osiowa jest liczona od miejsca położenia podstawy wkładki ($HG=97 \text{ mm}$ – wysokość oraz $D=100 \text{ mm}$ – średnica podstawy wkładki).

W chwili $t = 84 \mu\text{s}$ (czoło w odległości około 4 kalibrów) widzimy już wyraźne spękanie części czołowej strumienia (osłona ładunku z Al)

Fig. 2. Illustration of characteristics for two collapsing jets – velocities and radii of their elements as a function of the relative axial coordinate – for three times 54, 84 and 120 μs counted from the initiation of charges. The axial coordinate is counted from the place where the liner base is located ($HG=97 \text{ mm}$ – height, and $D=100 \text{ mm}$ – diameter of liner base). For the time $t = 84 \mu\text{s}$ (the tip at the distance of ca. 4 calibres) the cracking of jet frontal part is already clearly visible (charge coating from Al)

W części czołowej, w obszarze prędkości od około 6 km/s, strumienie ulegają fragmentacji, która w charakterystyczny sposób (oddzielanie się elementów strumienia, wyrównywanie się prędkości) uwidacznia coraz wyraźniej w miarę upływu czasu, obejmując dalsze obszary strumienia o niższych prędkościach.

2.2. Wnikanie elementów strumienia kumulacyjnego w przegrodę

Trajektorie elementów chwilowego strumienia kumulacyjnego w płaszczyźnie: czas (t) - współrzędna osiowa (z), są określone na podstawie jego charakterystyk (dla danego czasu $t = t_n$), mianowicie:

$$(1) \quad z(t, nz, t_n) = z_{\max}(nz) + U(nz) \cdot (t - t_n)$$

Element strumienia o numerze nz dociera do zadanego miejsca w przebijanej płycie (dno krateru) - $z_p(nz, t_n)$ po czasie:

$$(2) \quad t_p(nz, t_n) = \frac{z_p(nz, t_n) - z_{\max}(nz)}{U(nz)} + t_n$$

Po tym czasie długość elementu strumienia ciąglego będzie wynosiła:

$$(3) \quad \Delta z(nz, t_n) = z(t_p(nz, t_n), nz, t_n) - z(t_p(nz, t_n), nz + 1, t_n)$$

lub

$$\Delta z(nz, t_n) = z_{\max}(nz) - z_{\max}(nz + 1) + (U(nz) - U(nz + 1)) \cdot (t_p(nz, t_n) - t_n)$$

czyli zmiana tej długości będzie określana wartością drugiego członu powyższego wyrażenia, ponieważ

$$z_{\max}(nz) - z_{\max}(nz + 1) = \Delta z_0(nz)$$

jest całkowitą długością elementu w chwili początkowej t_n .

W przypadku ogólnym obejmującym również strumień z pęknięciami czynna długość elementu strumienia będzie wynosić:

In the frontal part, at velocities starting from ca. 6 km/s, the jets are fragmented in a specific way (particulation of jet elements, equalisation of velocities) which becomes more visible along the time as further parts of the jet with lower velocities are involved.

2.2. Target Penetration by Collapsing Jet Elements

Momentary trajectories of elements of a collapsing jet in the plane: time (t) – axial coordinate (z) are determined on the basis of its characteristics (for the given time $t = t_n$) by:

Jet element with number nz reaches the expected place in the pierced plate (bottom of the crater) - $z_p(nz, t_n)$ after the time:

After that time the length of the continuous jet element equals to:

or

So the change of this length will be determined by the value of the second fragment of the above expression, because

is the complete length of the element at the original moment t_n .

For the general case which also includes the jet with the breakups the active length of the jet segment will equal to:

$$(4) \quad \Delta z_p(nz, t_n, \varepsilon) = \begin{cases} \Delta z_0(nz) & \text{if } \frac{\Delta z(nz, t_n) - \Delta z_0(nz)}{\Delta z_0(nz)} \geq \varepsilon \\ \Delta z(nz, t_n) & \text{otherwise} \end{cases}$$

czyli długość czynna elementu strumienia jest równa jego początkowej długości w przypadku, gdy względne wydłużenie elementu jest większe od przyjętej wartości ε . Warunek ten, w sposób przybliżony, modeluje fragmentowanie się strumienia kumulacyjnego. Wartość $\varepsilon = 1$ odpowiada materiałom kruchym, w przypadku miedzi może osiągać wartości wynoszące 8. Przy ocenie głębokości wnikania przyjęto wartość ε równą 5. W ten sposób unikamy wprowadzenia do obliczeń głębokości wnikania, wielkości, jaką jest czas pęknięcia strumienia (Held, 1988).

Elementarna głębokość oraz prędkość wnikania, według hydrodynamiki:

$$(5) \quad \Delta p(nz, t_n, \varepsilon) = z_p(nz + 1, t_n) - z_p(nz, t_n) = \begin{cases} \theta \cdot \sqrt{\frac{\rho_{wk}}{\rho_t}} \\ \theta \cdot \Delta z_p(nz, t_n, \varepsilon) \end{cases}$$

$$(6) \quad U_w(nz) = U(nz) \cdot (1 + \theta)^{-1}$$

gdzie: ρ_{wk} oraz ρ_t są gęstościami odpowiednio wkładki i targetu.

Ilustrację propagacji w płaszczyźnie (t, z) wybranych elementów strumienia oraz drążonego przez nie krateru przedstawiono na rys. 3. Pokazany, referencyjny strumień kumulacyjny odpowiada chwili $t_n = 60 \mu s$. Prędkości elementów podano w opisie rysunku. Przyjęto wartość $\varepsilon = e = 5$ oraz długość czynną strumienia określoną w obszarze prędkości od 7,383 (prędkość czoła) do $v_{min} = 3$ km/s (prędkość odcięcia). Widzimy, iż wraz ze zmniejszeniem prędkości odcięcia (v_{min}) uzyskujemy większą głębokość penetracji.

W obliczeniach głębokości wnikania strumień referencyjny (dla $t = t_n$) był aktualizowany posiadanymi danymi numerycznymi strumienia pośredniego odpowiadającego czasowi pomiędzy $t = (t_n, t_{max})$. Czas t_{max} odpowiadał przemieszczeniu czoła strumienia co najmniej 6 kalibrów licząc od miejsca po-

Then the active length of the jet element is equal to its original length in the case when the relative extension of the element is greater than the accepted value ε . This condition is needed to get an approximate model of collapsing jet fragmentation. The value $\varepsilon = 1$ corresponds to fragile materials and for the copper it may go to 8. For the evaluation of the penetration depth it was accepted ε is 5. In this way such parameter as the time of jet breaking is eliminated from the calculations of penetration depth (Held, 1988).

Elementary depth and rate of penetration according to hydrodynamics is:

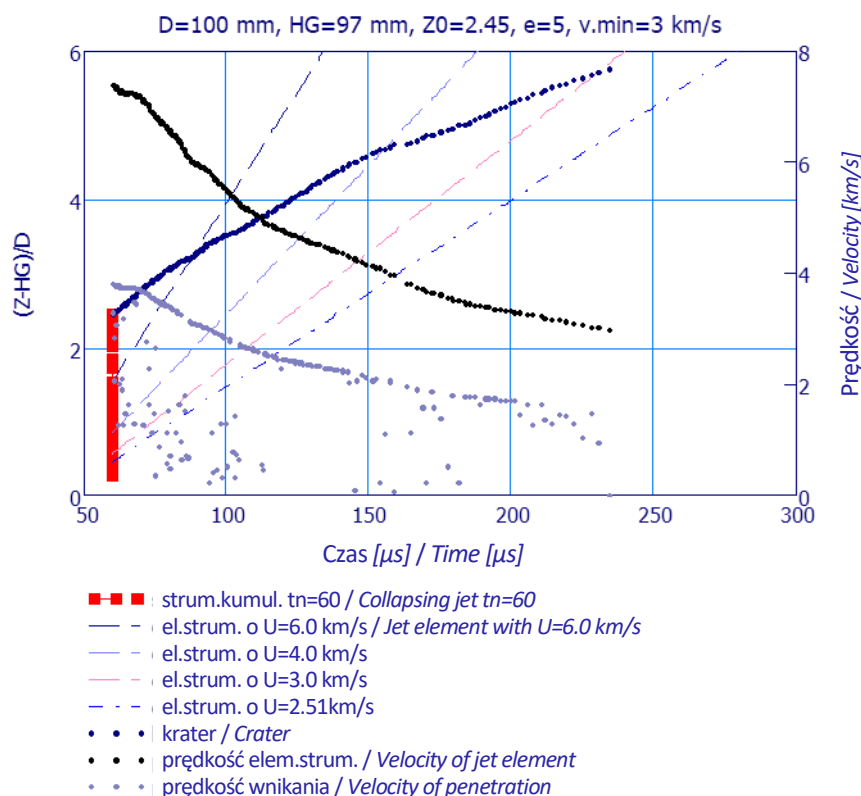
where: ρ_{wk} and ρ_t are the densities of the liner and target respectively.

Fig. 3 shows the propagation in the plane (t, z) for selected elements of the jet and the crater they produce. The indicated reference collapsing jet corresponds to time $t_n = 60 \mu s$. The velocities of elements are given in the picture's caption. The value $\varepsilon = e = 5$ was accepted and the effective length of the jet was identified for the interval of velocities between 7.383 (tip velocity) to $v_{min} = 3$ km/s (cutoff velocity). It can be noted that the reduction of the cutoff velocity (v_{min}) provides the greater depth of penetration.

In calculations of the penetration depth the reference jet (for $t = t_n$) was currently updated by the available numerical data of the intermediate jet corresponding to time $t = (t_n, t_{max})$. The time t_{max} relates to the displacement of the jet tip by at least 6 calibre distances counting from the original

czątkowego podstawy wkładki. W ten sposób, wykorzystując dane numeryczne strumieni kumulacyjnych, obliczano maksymalne głębokości kraterów oraz czasy penetracji. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w następnym paragrafie.

point of the liner base. In this way the numerical data of collapsing jets were used to calculate the maximal depths of craters and times of penetration. The results of calculations are presented in the following chapter.



Rys. 3. Ilustracja propagacji wybranych elementów strumienia kumulacyjnego ($t_n = 60 \mu s$) i powstającego krateru w płycie ze stali umieszczonej w odległości $Z_0 = 2,45$ kalibra od podstawy wkładki (położenie czoła rozpatrywanego strumienia). Czoło strumienia ma prędkość 7,383 km/s. Zamieszczono ponadto rozkłady prędkości elementów strumienia oraz prędkości wnikania wzdłuż krateru

Fig. 3. Illustration of propagation for selected elements of collapsing jet ($t_n = 60 \mu s$) and the crater produced in the steel plate which is placed in distance of $Z_0 = 2.45$ calibre from the liner base (position of the discussed jet tip). The jet tip has the velocity of 7.383 km/s. Moreover the distributions of velocities for the jet elements and the penetration along the crater are presented as well

3. Wyniki obliczeń głębokości i czasów wnikania strumieni kumulacyjnych w przegrodę ze stali i ich analiza

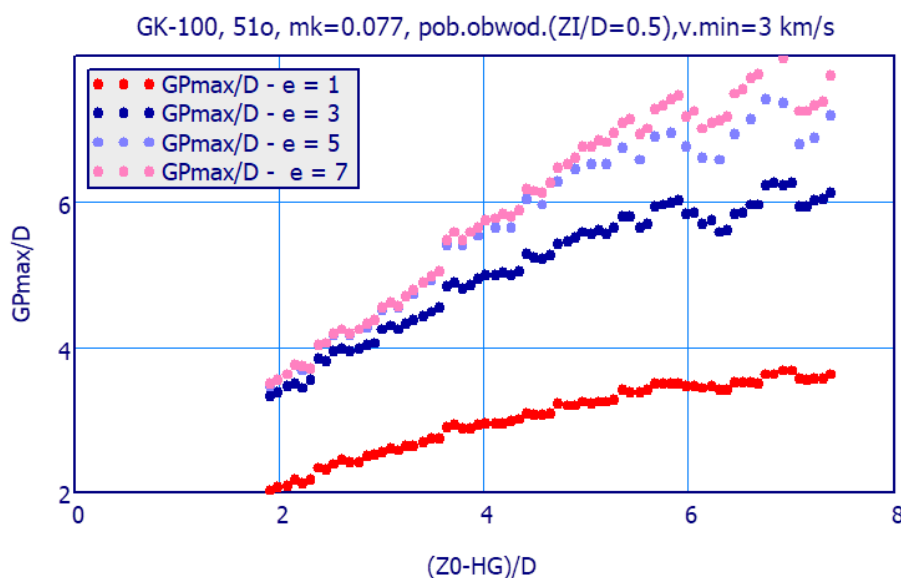
Posługując się danymi numerycznymi strumieni kumulacyjnych obliczano maksymalne głębokości kraterów oraz odpowiadające im czasy wnikania dla różnych położen przegrody względem początkowego położenia podstawy wkładki (ZP [kaliber] = $(Z_0 - HG)/D$, D średnica podstawy wkładki).

3. Steel Target Jet Penetration Depth and Time Calculations and Analysis

Maximal depths of craters and their corresponding times of penetration for different stand-offs of the target against original position of the liner base (ZP [calibre] = $(Z_0 - HG)/D$, D diameter of liner base) were calculated by employing the numerical data of the collapsing jets. The mini-

W obliczeniach tych jako parametr brano minimalną prędkość elementów strumienia (v_{min}), które jeszcze mogą brać udział w przebicciu przegrody. Prędkość tą nazwiemy prędkością odcięcia, elementy strumienia kumulacyjnego o mniejszych wartościach prędkości są eliminowane z procesu wnikania. Tak wydzieloną część strumienia kumulacyjnego, od położenia jego czoła do położenia elementu o prędkości v_{min} , nazwiemy długością czynną (dla danej chwili). W praktyce powyższe dwie charakterystyki – maksymalne głębokości uzyskiwanych kraterów i odpowiadające maksymalne czasy wnikania – określają skuteczność działania danej głowicy kumulacyjnej.

mal velocity of jet elements (v_{min}) which still could penetrate the target was taken as a parameter in these calculations. This velocity is named as the cut-off velocity as the elements of the collapsing jet possessing the lower velocities are eliminated from the process of penetration. A segment of the collapsing jet identified in such way, from position of its tip to position of element with v_{min} velocity, is named as the active length (at specific time). In practice the above two characteristics – the maximal depths of produced craters and corresponding maximal times of penetration – describe the efficiency of a shaped charge head.



Rys. 4. Wpływ wartości przyjętego maksymalnego wydłużenia elementów strumienia kumulacyjnego na maksymalną głębokość kraterów. Odległość przegrody i głębokość kraterów unormowano do średnicy podstawy wkładki (kalibra). Przyjęto, że wnikanie kończy element strumienia o $v_{min} = 3$ km/s, (prędkość czoła 7,8 km/s). Parametr $e = 1$ odpowiada przypadkowi całkowitego spękania strumienia w chwili jego dojścia do powierzchni przegrody (głębokości kraterów $=\rho_{wk}/\rho_t)^{(1/2)} \times$ całkowita chwilowa długość strumienia)

Fig. 4. Influence of the accepted maximal elongation of collapsing jet elements into the maximal depth of craters. The stand-off value and depths of craters are normalised against the diameter of the liner base (calibre). It was accepted that the penetration is ended by the jet element with $v_{min} = 3$ km/s, (tip velocity is 7.8 km/s). Parameter $e = 1$ corresponds to the case in which there is a complete breakup of the jet when it reaches the surface of the target (depths of craters $=\rho_{wk}/\rho_t)^{(1/2)} \times$ total instantaneous length of the jet)

Wzrost czasów wnikania implikuje rozwój dwóch procesów – pękanie oraz proces boczno-rozpraszania (Chanteret, 1993; Walters i Zukas 1989) strumienia kumulacyjnego – niekorzystnych, ograniczających wnikanie ele-

The increase of the penetration times is implicated by two disadvantageous processes – the breaking and the lateral scattering (Chanteret, 1993; Walters & Zukas 1989) of the collapsing jet – limiting the propagation

mentów strumieni o prędkościach poniżej 3 km/s i tym samym zmniejszających skuteczność. W konsekwencji rosną wymagania na dokładność wykonania elementów konstrukcyjnych GK oraz na własności materiału wkładki.

Istotnym parametrem, który był przyjmowany w ocenach, jest wartość maksymalnego względnego wydłużenia elementu strumienia kumulacyjnego ε (4). Wpływ tego parametru na maksymalne, względne głębokości kraterów (GP [kaliber] = G_{pmax}/D) przedstawiono na rys. 4 (na przykładzie GK-100, wkładka o kącie wierzchołkowym 51°). W pozostałych obliczeniach przyjęto jego wartość wynoszącą 5.

Oceny skuteczności działania badanych GK zostały przedstawione na poniższych rysunkach: rys. 5 – GK o kalibrze 83,2 z wkładką kumulacyjną o kącie wierzchołkowym 42° i parametrze geometrycznym $m_k = 0,118$; rys. 6, 7 i 8 – GK o kalibrze 100 z wkładką kumulacyjną o kącie wierzchołkowym 51° i parametrze geometrycznym $m_k = 0,077$ oraz na rys. 9 – GK o kalibrze 100 z wkładką kumulacyjną o kącie wierzchołkowym 60° i parametrze geometrycznym $m_k = 0,078$. W każdym przypadku przedstawiono przebiegi maksymalnych głębokości kraterów (GP) dla czterech wybranych minimalnych prędkości elementów strumieni: $v_{min} = 2,7; 3; 4$ i 5 km/s, które w danym przypadku wyznaczają ich czynne długości tych strumieni. Pokazano również przebiegi maksymalnych czasów wnikania (TM), odpowiadających $v_{min} = 3,0$ km/s. Widać, iż wraz ze zwiększaniem odległości położenia przegrody prawie do 6 kalibrów, w przypadku wszystkich badanych GK, następuje prawie liniowy wzrost tych czasów oraz zwiększanie głębokości kraterów. Obserwowane uskoki na przebiegach głębokości kraterów odpowiadają pojawianiu się pęknięć strumienia kumulacyjnego. Ustalając wartość czasu wnikania (np. z pomiarów) możemy wyznaczyć dystans, na jakim należy umieścić przegrodę, aby uzyskać określoną głębokość przebiccia. W podpisach rysunków taką ocenę podano dla wartości czasu wnikania, wynoszącej $450 \mu s$. Porównując wyniki tych ocen widzimy, iż najkorzystniejszym wariantem jest GK-100 z wkładką o kącie wierzchołkowym 60° .

Wyniki obliczeń, dotyczące GK100- 51° ,

of jet elements with velocities below 3 km/s and by the same reducing the efficiency. In consequence, requirements grow for accuracy of workmanship of designing components of shaped charge heads and for the properties of liner materials.

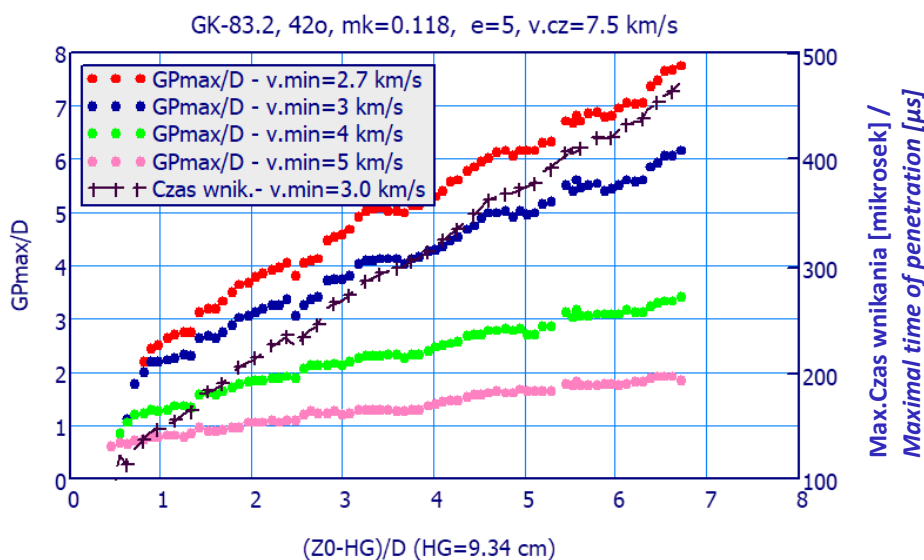
An essential parameter considered at evaluations is the value for a relative elongation ε (4) of the collapsing jet element. The influence of this parameter into the maximal, relative depths of craters (GP [calibre] = G_{pmax}/D) is shown in Fig. 4 (on the instance of GK-100, liner with the apex angle 51°). In the remaining calculations its value was taken as equal to 5.

The assessments of efficiencies for investigated shaped charge heads were presented in the following figures: Fig. 5 – 83.2 mm calibre head with the shaped liner having the apex angle 42° and geometrical parameter $m_k = 0.118$; Fig. 6, 7 and 8 – 100 mm calibre head with the shaped liner having the apex angle 51° and geometrical parameter $m_k = 0.077$, and Fig. 9 – 100 mm calibre head with the shaped liner having the apex angle 60° and geometrical parameter $m_k = 0.078$. In each case the courses of craters maximal depths (GP) are presented for four selected minimal velocities of jets elements: $v_{min} = 2.7; 3.0; 4.0$ and 5.0 km/s which indicate the active lengths of these jets for a given case. Moreover the plots of maximal penetration times (TM) corresponding to $v_{min} = 3.0$ km/s are also shown. It is visible that by the increase of the stand-off distance up to almost 6 calibre values there is quasilinear growth of these times and the depths of craters for each investigated head. Sharp fragments observed on the plots of crater depths correspond to breakups of the collapsing jet. When the time of penetration is established (e.g. in measurements) then the stand-off value may be determined for target to get a specific penetration depth. In the captions of the figures such assessment is given for the penetration time of $450 \mu s$. Comparing the results of these assessments we can see that the most beneficial option is provided by GK-100 with the liner having the apex angle of 60° .

Results of calculations for GK100- 51° ,

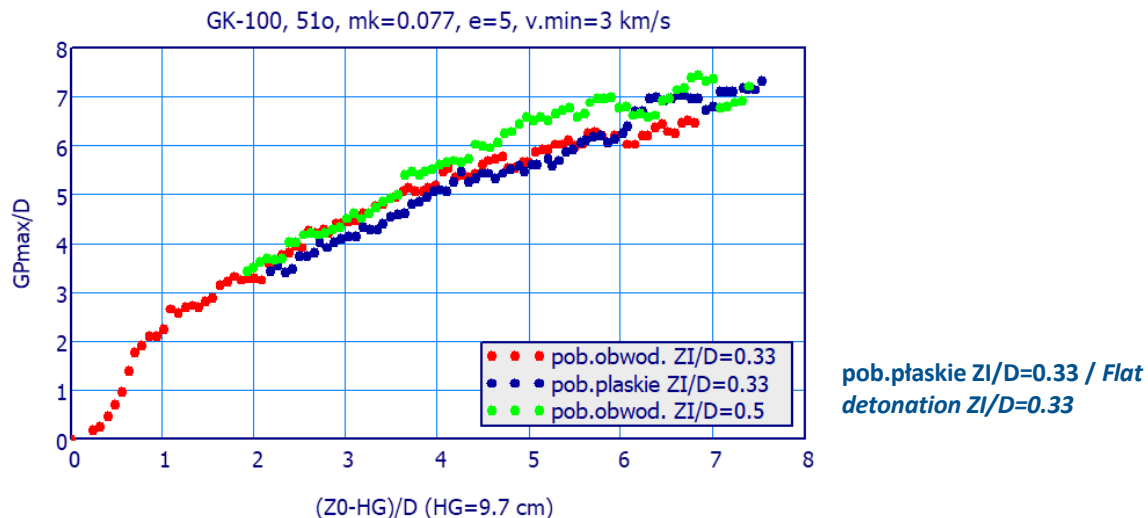
przedstawione na rys. 6, 7 i 8, pozwalają na porównanie skuteczności działania dla różnych układów pobudzenia ładunków. Na rys. 6 porównano uzyskiwane głębokości kraterów ($v_{\min} = 3$ km/s) dla GK, w których ładunki były pobudzane obwodowo, ale różniły się położeniem płaszczyzny pobudzenia ZI ($ZI/D = 0,33$ oraz $0,5$) względem wierzchołka wkładki lub były pobudzane płasko. Porównywalną skuteczność mają GK z ładunkami pobudzanymi płasko lub obwodowo dla $ZI/D = 0,33$ (przy dystansie 6 przebiecie 6 kalibrów), natomiast większą w przypadku pobudzenia obwodowego dla $ZI/D = 0,5$, wynoszącą 7 kalibrów. Czasy wnikania silnie zależą od prędkości v_{\min} , przykładowa ocena (rys.7) pokazuje wzrost około $150 \mu\text{s}$ (ponad 30%) przy różnicy v_{\min} wynoszącej 300 m/s. Tej różnicy prędkości końcowych elementów strumienia odpowiada przyrost głębokości wnikania około 1 kalibra (17%).

shown in Fig. 6, 7 and 8 compare the efficiencies at different systems for charges initiation. In Fig. 6 the received depths of craters ($v_{\min} = 3.0$ km/s) are compared for the heads (GK) with the charges detonated in perimeters, but for different planes of initiation ZI ($ZI/D = 0.33$ and 0.5) against the apex of the liner, or detonated at a flat surface. The charges which are detonated flatly or in perimeter show similar efficiency for $ZI/D = 0.33$ (at stand-off of 6 the penetration of 6 calibres), whereas the higher efficiency of 7 calibres provides the perimetric detonation for $ZI/D = 0.5$. The times of penetration depend strongly on velocity v_{\min} , and an exemplary assessment (Fig. 7) shows ca. $150 \mu\text{s}$ increase (above 30%) at 300 m/s difference of v_{\min} . Such difference of rear elements of the jet is responsible for the growth of the penetration depth by ca. 1 calibre (17%).



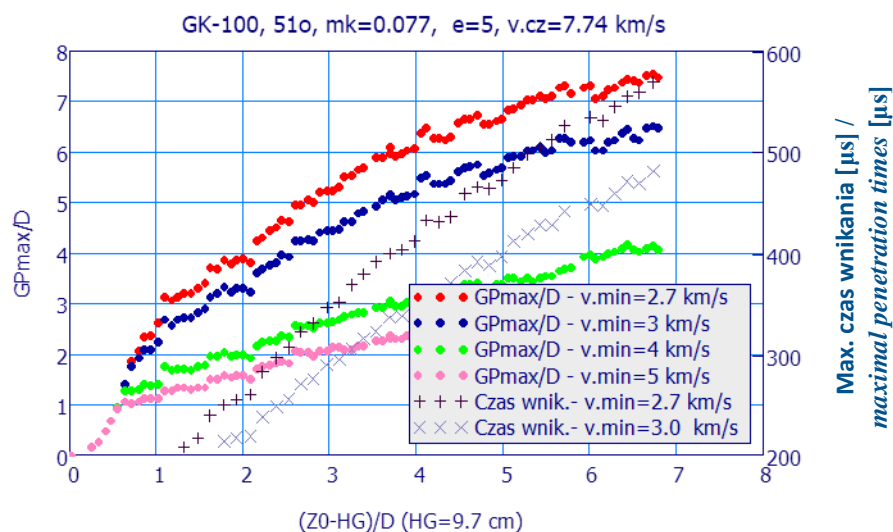
Rys. 5. Względne maksymalne głębokości kraterów w funkcji położenia przegrody względem podstawy wkładki przy działaniu GK-83.2 z wkładką o kącie wierzchołkowym 42° (płaskie pobudzenie ładunku) dla wybranych prędkości v_{\min} . Czas wnikania przeskalowano jak dla głowic o kalibrze 100 mm ($100/83.2 \cdot t_{83.2}$, $t_{83.2}$ – czas wnikania dla GK-83.2). Dla wartości czasu wnikania $450 \mu\text{s}$ mamy maksymalną głębokość krateru, wynoszącą 6.0 kalibrów (położenie przegrody 6.5 kalibrów)

Fig. 5. Relative maximal depths of craters as a function of target position against the liner base at operation of GK-83.2 with 42° apex angle liner (flat initiation of the charge) for selected velocities v_{\min} . Time of penetration is calibrated for 100 mm calibre heads ($100/83.2 \cdot t_{83.2}$, $t_{83.2}$ – penetration time for GK-83.2). For penetration time of $450 \mu\text{s}$ there is the maximal crater depth equal to 6.0 calibres (target stand-off 6.5 calibres)



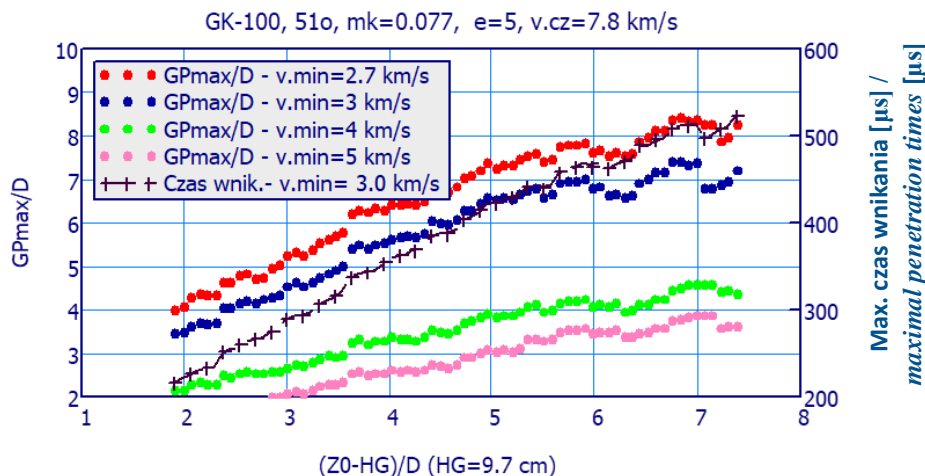
Rys. 6. Porównanie skuteczności działania GK-100 z wkładkami o kącie wierzchołkowym 51° w zależności od układu pobudzenia ładunków. ZI/D – położenie płaszczyzny pobudzenia względem wierzchołka wkładki (wzdłuż osi symetrii). Prędkości czoła strumieni różnią się między sobą niewiele i wynoszą: 7,74; 7,71 oraz 7,80 km/s odpowiednio dla ZI/D jak na rysunku

Fig. 6. Comparison of efficiencies for GK-100 with 51° apex angle liners depending on the system for initiation of charges. ZI/D – location of the initiating plane against the apex of the liner (along the axis of symmetry). The velocities of jet tips differ insignificantly and are: 7.74; 7.71 and 7.80 km/s respectively for ZI/D as in the picture



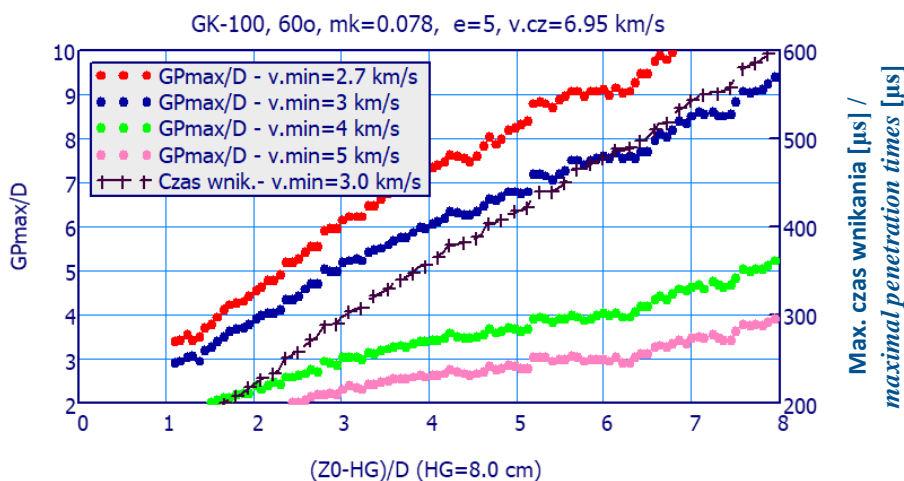
Rys. 7. Względne maksymalne głębokości kraterów w funkcji położenia przegrody względem podstawy wkładki przy działaniu GK-100 z wkładką o kącie wierzchołkowym 51° (pobudzenie obwodowe $ZI/D = 0,33$) dla wybranych prędkości v_{min} . Przebiegi maksymalnych czasów wnikańia odpowiadają strumieniom kumulacyjnym o długościach czynnych ograniczonych prędkościami odcięcia $v_{min} = 2,7$ i $3,0$ km/s. Dla wartości czasu wnikańia $450 \mu s$ mamy maksymalną głębokość krateru, wynoszącą 6,3 kalibrów (położenie przegrody 6 kalibrów)

Fig. 7. Relative maximal depths of craters as a function of target position against the liner base at operation of GK-100 with 51° apex angle liner (perimeter initiation $ZI/D = 0,33$) for selected velocities v_{min} . The course of maximal penetration times corresponds to collapsing jets with active lengths limited by the cut-off velocities $v_{min} = 2.7$ and 3.0 km/s. For penetration time of $450 \mu s$ there is the maximal crater depth equal to 6.3 calibres (target stand-off 6.0 calibres)



Rys. 8. Względne maksymalne głębokości kraterów w funkcji położenia przegrody względem podstawy wkładki przy działaniu GK-100 z wkładką o kącie wierzchołkowym 51° (pobudzenie obwodowe $ZI/D = 0.5$) dla wybranych prędkości v_{min} . Przebieg maksymalnych czasów wnikania odpowiada strumieniom kumulacyjnym o długościach czynnych ograniczonych prędkości odcięcia $v_{min} = 3,0$ km/s. Dla wartości czasu wnikania 450 μ s mamy maksymalną głębokość krateru 7,0 kalibrów (położenie przegrody 5,7 kalibrów)

Fig. 8. Relative maximal depths of craters as a function of target position against the liner base at operation of GK-100 with 51° apex angle liner (perimeter initiation $ZI/D = 0.50$) for selected velocities v_{min} . The course of maximal penetration times corresponds to collapsing jets with active lengths limited by the cut-off velocity $v_{min} = 3.0$ km/s. For penetration time of 450 μ s there is the maximal crater depth equal to 7.0 calibres (target stand-off 5.7 calibres)

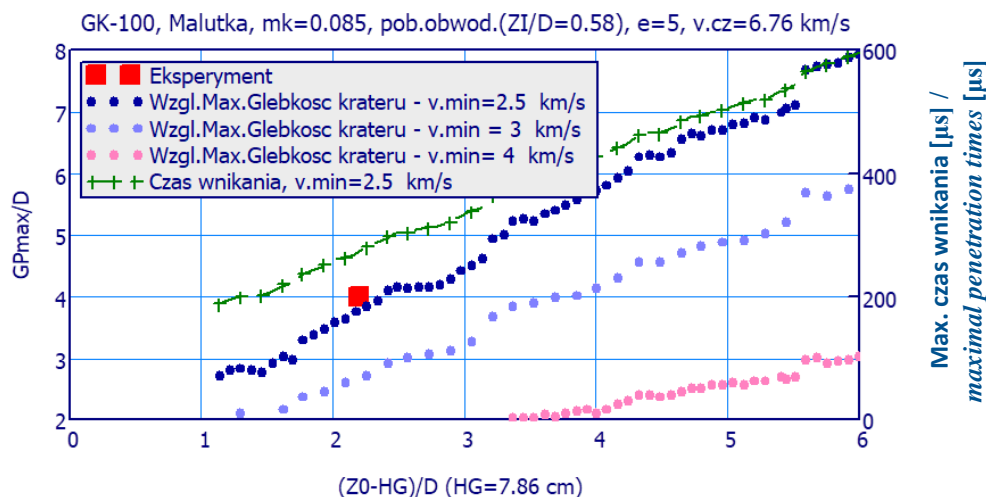


Rys. 9. Względne maksymalne głębokości kraterów w funkcji położenia przegrody względem podstawy wkładki przy działaniu GK-100 z wkładką o kącie wierzchołkowym 60° (pobudzenie obwodowe $ZI/D = 0,35$) dla wybranych prędkości v_{min} . Przebieg maksymalnych czasów wnikania odpowiada strumieniom kumulacyjnym o długościach czynnych ograniczonych prędkości odcięcia $v_{min} = 3,0$ km/s. Dla wartości czasu wnikania 450 μ s mamy maksymalną głębokość krateru 7,2 kalibrów (położenie przegrody 5,5 kalibrów)

Fig. 9. Relative maximal depths of craters as a function of target position against the liner base at operation of GK-100 with 60° apex angle liner (perimeter initiation $ZI/D = 0.35$) for selected velocities v_{min} . The course of maximal penetration times corresponds to collapsing jets with active lengths limited by the cut-off velocity $v_{min} = 3.0$ km/s. For penetration time of 450 μ s there is the maximal crater depth equal to 7.2 calibres (target stand-off 5.5 calibres)

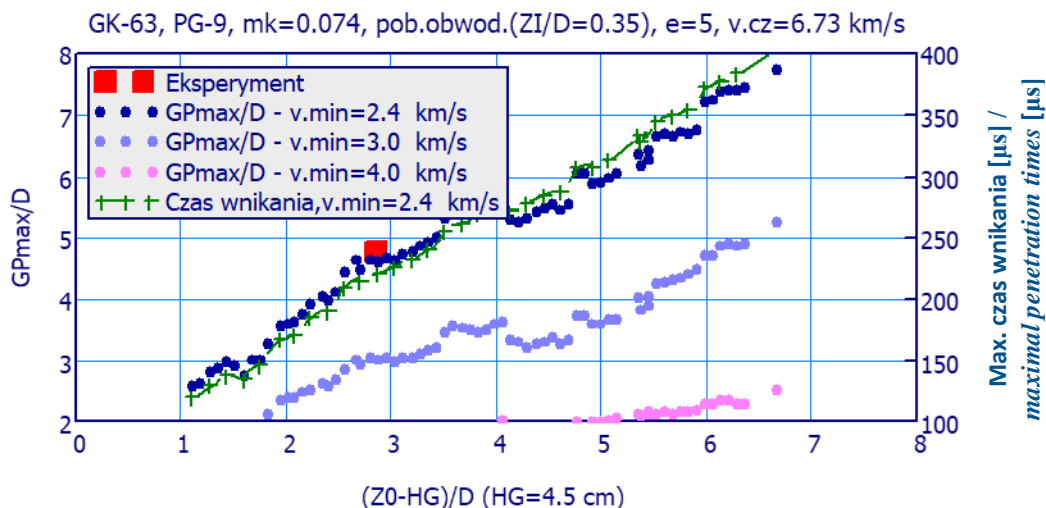
Przedstawiony sposób oceny skuteczności działania GK może być wykorzystany w praktyce przy opracowywaniu nowych konstrukcji ładunków kumulacyjnych. Doświadczalnie określając GP dla kilku wybranych wartości ZP (jednocześnie można łatwo wyznaczyć maksymalne czasy wnikania -TM) wyznaczamy doświadczalną charakterystykę skuteczności działania opracowywanej głowicy. Nanosząc takie dane doświadczalne na wykresy (ZP, GP) oraz (ZP, TM), wykonane wg opisanej powyżej procedury, określamy dla danego ZP czynną długość strumienia kumulacyjnego, tzn. minimalną prędkość jego elementów, które mogły jeszcze drażyć krater i w ten sposób ocenić stan strumienia (ciągły, spękany, rozproszenie boczne) i efekty jego działania. Na rys. 10 i 11 porównano dane eksperymentalne z obliczonymi danymi dwóch głowic kumulacyjnych, Malutka i PG-9. Prędkości minimalne: $v_{\min} = 2,5$ i $2,4$ km/s, czasy wnikania: $TM = 270$ i $230 \mu\text{s}$ ($10/6.3 \times 230 = 365 \mu\text{s}$ – czas zeskalowany dla GK-100) – odpowiednio dla pierwszej i drugiej głowicy. W pierwszym przypadku GP jest w obszarze ciągłego strumienia, nie ma zagrożenia dla uzyskania wymaganego przebiccia. W drugim przypadku, rwie się strumień i dłuższy czas wnikania może już prowadzić do rozproszenia strumienia.

Presented assessments of efficiency for the shaped charge heads (GK) may be used to develop new designs of shaped charges. By experimental identification of GP for a few selected values ZP (at the same time the maximal times of penetration TM may be also easily determined) the experimental characteristics of the efficiency may be established for a developed head. Entering such experimental data on the plots of (ZP, GP) and (ZP, TM), prepared according to above procedure, the active length of collapsing jet is determined, i.e. the minimal velocity of its elements which could still produce the crater, to assess in such way the state of the jet (continuous, cracked, lateral breakup) and the effects of its action. Experimental and calculated data is compared in Fig. 10 and 11 for two heads *Malutka* and *PG-9*. Minimal velocities: $v_{\min} = 2.5$ and 2.4 km/s, times of penetration: $TM = 270$ and $230 \mu\text{s}$ ($10/6.3 \times 230 = 365 \mu\text{s}$ – time calibrated for GK-100) – respectively for the first and second head. In the first case the GP is within the area of a continuous jet and the demanded penetration is not endangered. In the second case the jet particulates and the longer time of penetration can make the jet scatter.



Rys. 10. Porównanie obliczonych maksymalnych głębokości kraterów w funkcji położenia przegrody względem podstawy wkładki przy działaniu GK-100-Malutka dla wybranych prędkości v_{\min} z wynikiem eksperymentu

Fig. 10. Comparison of calculated and experimental maximal depths of craters as function of target stand-off against the liner base at the operation of GK-100-Malutka for selected velocities v_{\min}



Rys. 11. Porównanie obliczonych maksymalnych głębokości kraterów w funkcji położenia przegrody względem podstawy wkładki przy działaniu GK-63-PG-9 dla wybranych prędkości v_{min} z wynikiem eksperymentu

Fig. 11. Comparison of calculated and experimental maximal depths of craters as function of target stand-off against the liner base at the operation of GK-63-PG-9 for selected velocities v_{min}

4. Podsumowanie i wnioski

W pracy, wykorzystując obliczenia numeryczne parametrów strumieni kumulacyjnych, przedstawiono oceny charakterystyk skuteczności działania trzech GK, różniących się wartościami kątów wierzchołkowych wkładek (42° , 51° i 60°). Ponadto dokonano takich ocen dla GK różniących się parametrami układu pobudzenia ładunków. Przedstawiono również porównanie obliczonych charakterystyk skuteczności działania dwóch GK, Malutkiej i PG-9 z wynikami eksperymentu.

W wyniku stwierdzono, iż:

1. Maksymalne głębokości kraterów oraz odpowiadające im czasy wnikania, dla zadanej długości czynnej strumienia kumulacyjnego, są funkcją dystansu przegrody względem podstawy wkładki. Uzyskanie głębokości rzędu 6 do 8 kalibrów wiąże się z koniecznością oddalenia przegrody od 5,5 do 7 kalibrów i w związku z tym ze wzrostem czasów wnikania do wartości co najmniej 450 – 500 μs . Wynika stąd potrzeba odpowiedniej staranności wykonania elementów GK oraz odpowiedniego (o dużym wydłużeniu) materiału na wkładki;
2. Obliczone charakterystyki skuteczności

4. Summary and Conclusions

In the paper the efficiencies of three shaped charge heads (GK) with different liner apex angles (42° , 51° and 60°) are presented on the base of numerical calculations of parameters for collapsing jets. Moreover the assessments of the GK with different parameters of systems used for detonation of charges are included. Comparison of calculated and experimental characteristics of efficiency for two GKs *Malutka* and *PG-9* is also presented.

In effect it was stated that:

1. Maximal depths of craters and their respective times of penetration for the accepted active length of collapsing jet depend on the stand-off distance between the target and the liner base. In order to get the depths of 6 to 8 calibres the target has to be placed at the distances of 5.5 to 7 calibres and in consequence the times of penetration have to grow for at least 450 – 500 μs . Hence, there is a need for the suitable quality of workmanship at fabrication of components of GK and suitable material for the liners (with high elongation).
2. The characteristics of efficiencies calculated for the GK, completed by the

działania GK, uzupełnione pomiarami głębokości kraterów i odpowiadających im czasów wnikania co najmniej dla kilku dystansów przegrody od wkładki, stanowią podstawową ocenę skuteczności i jakości działania danej głowicy kumulacyjnej. Jest to niezwykle potrzebna informacja w przypadku opracowywania nowych GK.

measurements of craters depths and corresponding times of penetration for at least a few values of the stand-off between the target and liner, are the basic assessment of efficiency and quality for a specific shaped charge head. It is a valid piece of information in the case when new GKs are developed.

Literatura / Literature

- Bagrowski, J., Borkowski, J., Jach, K., Podgórzak, P. (2018). *Diagnostyka numeryczna powstawania i struktury strumienia kumulacyjnego z wkładki napędzonej produktami detonacji*, Referat wygłoszony na XI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej, Jachranka.
- Bagrowski, J., Borkowski, J., Podgórzak, P., Prasula, P. (2017). *Badania działania ładunków kumulacyjnych w funkcji wybranych materiałów i parametrów geometrycznych wkładek dla zastosowań w opracowaniach konstrukcji pocisków* (Sprawozdanie Nr B234/932/00). Warszawa: WITU.
- Chanteret, P. Y. (1993). Consideration about the analytical modelling of shaped charges. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 18, 337-344.
- Held, M. (1988). Penetration cutoff velocities of shaped charge jets. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 13, 111-119.
- Jach, K. (2018a). *Przeprowadzenie obliczeń numerycznych głowic kumulacyjnych dla określenia wpływu gęstości i geometrii wkładki na ich działanie oraz dla oceny możliwości skalowania geometrycznego* (Sprawozdanie Nr 45/2018/B234/931/00). Warszawa: WITU.
- Jach, K. (2018b). *Przeprowadzenie obliczeń numerycznych głowic kumulacyjnych dla określenia wpływu kształtu i prędkości detonacji oraz osłon ładunku na charakterystyki ich działania* (Sprawozdanie Nr 24/2018/ B234/931/00). Warszawa: WITU.
- Walters, W. P. & Zukas, J. A. (1989). *Fundamentals of Shaped Charges*, New York: A Wiley-Interscience Publication.
- Walters, W. P. & Summer, R. L. (1993). A review of jet breakup time models. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 18, 241-246.

