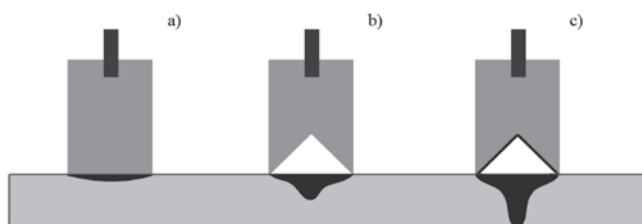


# Ładunki kumulacyjne i modelowanie numeryczne ich wybuchu

Andrzej WOJEWÓDKA, Janusz BEŁZOWSKI, Tomasz WITKOWSKI – Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2010, 64, 1, 25-32

Zjawisko kierunkowego zwiększenia efektów detonacji znane było już w XVIII w. Polega ono na koncentracji energii, która powoduje lokalne nasilenie działania wybuchu na otoczenie. Jako przykład może posłużyć efekt kumulacji osiowej przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Efekt oddziaływania ładunku płaskiego (a), wydrążonego (b) oraz wydrążonego z wkładką kumulacyjną (c)

Detonacja cylindrycznego ładunku materiału wybuchowego, który został przyłożony bezpośrednio do płyty wykonanej np. ze stali, powoduje jedynie powstanie niewielkiego krateru w płycie. Wykonanie wgłębienia w tym ładunku w kształcie stożka (tzw. wnęki kumulacyjnej) powoduje, iż w wyniku detonacji materiału wybuchowego następuje koncentracja energii produktów detonacji na niewielkiej powierzchni, w wyniku czego powstaje krater o głębokości zbliżonej do średnicy ładunku. Ładunki takie nazywało się ładunkami wnękowymi. Efekt ten zauważył pod koniec XVIII w. inżynier górniczy Franz von Bader [1]. Spostrzegł on, iż wzory, jakie były wytłoczone na ładunku materiału wybuchowego, w wyniku detonacji odbijają się na płytach wykonanych z metalu. Było to swoistego rodzaju grawerowanie. Pod koniec XIX w. von Förster badał grawerowanie wybuchowe i to on jest uważany za odkrywcę ukierunkowanego działania ładunków wnękowych. Efekt ten został powtórnie odkryty przez Charles'a E. Munroe'a. Detonował on na stalowych płytach bloki materiału wybuchowego z różnymi inicjalami np.: U.S.N. (United States Navy), które po detonacji odbijały się na płytach. W 1888 r. w pracy C. E. Munroe'a „Modern Explosives” zostały opisane badania nad zastosowaniem ukształtowanych ładunków materiału wybuchowego, w szczególności historyczne doświadczenie, polegające na zdetonowaniu ładunku żelatyny wybuchowej, po którym na skutek odpowiedniego wydrążenia ładunku otrzymano w skale napis MUNROE [2]. Podobne badania prowadzili w Niemczech E. Neumann oraz M. Neumann (1911), którzy odkryli, że efekt kierunkowego działania ładunku wnękowego można znacznie zwiększyć [1], jeśli wnęka kumulacyjna zostanie wyłożona warstwą ciała stałego, np. z metalu, szkła, ceramiki, o kształcie wgłębienia. Warstwę tą nazywa się wkładką kumulacyjną, natomiast ładunek wnękowy z wkładką nazywa się ładunkiem kumulacyjnym. Efekt kumulacyjny jest nazywany efektem Munroe'a (w Stanach Zjednoczonych) lub efektem Neumanna (w Niemczech). W badaniach nad zjawiskiem kumulacji uczestniczył także inż. Jerzy Bałaczyński, który opublikował pracę „Matematyczna analiza działania naboju wydrążonych” w „Przeglądzie artyleryjskim” nr 1/1924.

Podczas II wojny światowej efekt kumulacyjny został wykorzystany w wielu odmianach broni przeciwpancernej, gdzie jako przykłady można podać ręczne granatniki: w Niemczech o nazwie „Panzerfaust” oraz w USA „Bazooka”. W Niemczech opracowano wiele konstrukcji służących między innymi do niszczenia okrętów czy schronów. Największym przedstawicielem tej grupy była konstrukcja z serii SHL

(Schwere Hohlladung) o nazwie Beethoven [1]. W jej skład wchodziła wkładka hemisferyczna o średnicy 1800 mm, a ładunek materiału wybuchowego miał masę 5 ton.

Birkhoff [3] w USA i Ławrientiew [4] w ZSRR opracowali podstawy tzw. hydrodynamicznej teorii kumulacji. Teoria ta przyjmuje, iż materiał wkładki podczas formowania się strugi kumulacyjnej zachowuje się jak ciecz, a dokładniej ciecz nieściślna, ponieważ pomija się ściślność materiału wkładki. Założenie to nie jest spełnione, ponieważ w obszarze kolizji występują wysokie ciśnienia sięgające 100 GPa.

Efekt kumulacyjny można wzmocnić przez odpowiednie ukształtowanie frontu fali detonacyjnej [5]. Dzięki prowadzonym rozważaniom teoretycznym oraz badaniom doświadczalnym ustalono strukturę strumienia kumulacyjnego oraz mechanizm jego powstawania [6, 7, 8] oraz wnikania w przeszkodę (jednolitą [9], kilkuwarstwową [10]). Ciśnienie produktów detonacji stopniowo deformuje oraz napędza wkładkę. W wyniku wzrostu ciśnienia następuje rozplływ zgromadzonego przy osi materiału na dwie części, których masy i prędkości zależą od parametrów ładunku kumulacyjnego. Pierwsza z nich nosi nazwę zbitki, natomiast druga nazywana jest strumieniem kumulacyjnym:

- zbitka – zawiera większą część masy wkładki, powstaje z zewnętrznej części wkładki, porusza się stosunkowo wolno (jej prędkość nie przekracza zwykle 1 km/s),
- strumień kumulacyjny – jest to wydłużona, silnie nagrzana struga materiału wkładki, tworzy się z jej wewnętrznej części, czoło strumienia osiąga największą prędkość 7-10 km/s. Rozkład prędkości wzdłuż strumienia można traktować w przybliżeniu za liniowy; masowo stanowi 10-20% wkładki.



Rys. 2. Obraz zbitki (1) i strumienia kumulacyjnego (2)

W wyniku występowania efektów ścinania strumień i wkładka obracają się w przeciwnych kierunkach. W wyniku badań właściwości ładunków kumulacyjnych odkryto, że ze wzrostem kąta rozwarcia stożka maleje prędkość czoła strumienia kumulacyjnego. Dla dużych kątów rozwarcia (powyżej 140° – brak jednak ścisłej granicy) zamiast strumienia kumulacyjnego powstaje kilka wysokoenergetycznych odłamków. Przy odpowiednim doborze parametrów prawie cały materiał tworzy jednolite ciało o dużej prędkości rzędu 2-3 km/s – jest to tzw. pocisk formowany wybuchowo (EFP – Explosively Formed Projectile).

Prowadzono wiele badań nad wpływem różnych parametrów na efekt kumulacyjny, zarówno od strony ładunku kumulacyjnego, jak również materiału oporowego [1], które wykazały braki w hydrodynamicznej teorii przebicia. Możliwe jest uzyskanie ładunków kumulacyjnych generujących strumienie o prędkości 100 km/s, a przewiduje się możliwość uzyskania prędkości ok. 700 km/s [11]. Wzory obliczeniowe rozbudowywano o kolejne człony opisujące wpływ poszczególnych czynników. Opis tych metod analitycznych można znaleźć w pracy [1]. Rozwój techniczny, pojawienie się komputerów, rozwój

metod numerycznych, a zwłaszcza pionierska praca Richarda Couranta oraz Herbreta Robbinsa „What is Mathematics?: An elementary approach to ideas and method” opublikowana w 1941 r., która opisując metodę elementów skończonych sprawiła, że skomplikowane obliczenia stały się łatwiejsze. Rozwój tej metody będący zasługą nie tylko matematyków sprawiła, że aktualnie ukazuje się duża ilość prac naukowych, w których w mniejszym lub większym stopniu korzysta się z komputerowego modelowania. Obecnie oprócz metody elementów skończonych stosowane są też inne metody numerycznego modelowania.

Choć zjawisko kumulacji jest już znane od dawna, to pierwsza praca, która dotyczyła jego modelowania ukazała się dopiero w 1976 r. [12]. W miarę postępu technicznego komputery umożliwiały rozwiązywanie coraz to bardziej skomplikowanych modeli. Problem generowania strumienia z ładunku kumulacyjnego również można modelować przy pomocy odpowiednich kodów komputerowych. Zjawisko kumulacji należy do szybkozmiennych oddziaływań dynamicznych. Zachowanie się materiałów podczas symulacji opisują odpowiednie modele, a podstawowym dla metali w warunkach silnych obciążeń dynamicznych jest model ciała sprężysto/lepko plastycznego. Model matematyczno-fizyczny zjawiska oparty jest na równaniach ośrodków ciągłych (prawa zachowania, model konstytutywny Johnsona-Cooka czy też Steinberga-Guinana, równania stanu dla ciał stałych oraz model hydrodynamiczny dla produktów detonacji stałego materiału wybuchowego). Wśród metod, przy pomocy których możemy modelować dane zjawiska wymienić można:

- metoda Lagrange’a,
- metoda Eulera,
- metody Lagrange’owsko-Eulerowskie,
- metoda wygładzonej hydrodynamiki cząstek,
- metoda elementów skończonych,
- metoda punktów swobodnych.

### Metoda Lagrange’a

W metodzie zmiennymi niezależnymi są czas oraz identyfikatory elementów ośrodka. Siatka przestrzenna, jaką pokrywa się badane ciało (tworząc komórki), przemieszcza się oraz deformuje razem z nim [13 ÷ 16]. Przez granice przestrzenne komórek nie ma transportu masy. Zaletą tej metody jest łatwa aproksymacja warunków brzegowych. Natomiast podstawową wadą jest fakt, iż siatka numeryczna podczas modelowania zjawisk z dużymi deformacjami ulega znacznemu zniekształceniu, nawet do tzw. deformacji patologicznej, dla której dalszy rachunek nie ma sensu fizycznego. Jednym ze sposobów porażenia sobie z problemem znacznej deformacji siatki jest jej rekonstrukcja (co pewien czas) podczas analizy (tzw. meshing adaptacyjny) [17 ÷ 18], prowadząca do poprawy jej regularności. Rekonstrukcja taka jest skomplikowana i może prowadzić do utraty dokładności obliczeń.

### Metoda Eulera

Metoda polega na tworzeniu nieruchomej, niekoniecznie regularnej siatki przestrzennej pokrywającej obszar poddawany analizie [19 ÷ 21]. W tej metodzie badane ciało porusza się na tle nieruchomej siatki. Oprócz siatki wprowadza się linie aproksymujące granice rozważanego obszaru. Granice badanego ciała podczas przemieszczania tworzą nieregularne komórki, których kształt jest zmienny w czasie. Zaletą tej metody jest uzyskiwanie lepszych rezultatów w przypadku zjawisk, którym towarzyszy silna deformacja. Wadą natomiast są trudności przy obliczaniu strumieni energii, masy oraz pędu, a także potrzeba stosowania skomplikowanych algorytmów. Proces obliczeniowy zazwyczaj dzieli się na kilka kroków polegających na tym, iż najpierw liczy się dany strumień w sposób przybliżony, a następnie koryguje się w zależności od ilości kroków przybliżenia. Stopień złożoności obliczeń wzrasta.

### Metody Lagrange’owsko-Eulerowskie

To budowa algorytmów, w których celem jest możliwość wykorzystania obu rodzajów elementów [13 ÷ 15]. Łącząc te metody można uzyskać bardzo dużą liczbę algorytmów. W tej grupie metod wyróżnia się między innymi następujące grupy algorytmów:

- algorytmy, w których obszar poddany analizie pokrywany zostaje nieruchomą siatką eulerowską, natomiast ośrodek traktowany jest jako zbiór ruchomych cząstek, czyli siatka lagrange’a poruszająca się przez oczka siatki eulerowskiej. Do określenia parametrów pola służy siatka eulerowska, natomiast siatka lagrange’owska służy do określenia parametrów ośrodka. Obliczenia prowadzone są najpierw dla siatki ruchomej, a następnie parametry są przeliczane na siatkę nieruchomą. Jako przykłady takich metod można podać:
  - metoda cząstek w komórkach (PIC, ang. *Particle In Cell*) – metoda pozwala na modelowanie dowolnie dużych deformacji ośrodka oraz złożonych ruchów ośrodków wieloskładnikowych,
  - metoda dużych cząstek – zamiast zbioru dyskretnych cząstek (jak ma to miejsce w metodzie PIC), masę zawartą w eulerowskiej komórce rozpatruje się jako całość;
- algorytmy, w których wewnątrz ośrodka opisywane jest jak w metodzie eulerowskiej, natomiast granice ciał oraz swobodne powierzchnie ciał są opisywane jak w metodzie lagrange’owskiej. Zastosowanie tej metody prowadzi do znacznego skomplikowania algorytmów obliczeniowych, ale możliwe jest lepsze opisanie granic ośrodka, zachowanie się w komórkach, nawet przy znacznej deformacji ośrodka.

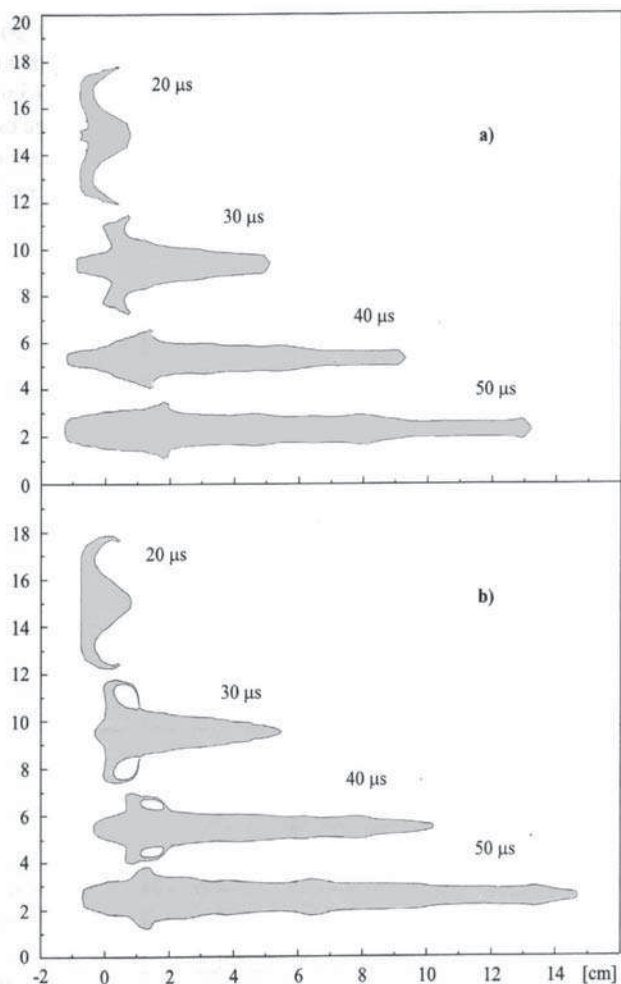
Metodą tą modelowano skonstruowane oraz poddane próbom poligonowym ładunki kumulacyjne o masie 420 kg (w tym 272 kg stanowił materiał wybuchowy, natomiast wkładka miedziana miała masę 85 kg) [18].

### Metoda wygładzonej hydrodynamiki cząstek SPH (ang. Smooth Particle Hydrodynamic)

Metoda ta początkowo była opracowana w celu symulowania dynamiki płynów w astrofizyce. Swęgle uczynił ją użyteczną do symulowania zjawisk wybuchu [19]. W metodzie tej ciało dzielone jest na podobszary, a następnie każdy z nich zastępuje się cząstką materialną, opisywaną m. in. za pomocą wektora położenia oraz masy. Cząstki oddziałują między sobą, a jego zasięg określa parametr wygładzenia, który decyduje o ich liczbie. Im większy jest parametr wygładzenia, tym więcej cząstek oddziałujących między sobą, co poprawia stabilność schematu, ale wydłuża czas obliczeń. Zmiany wielkości fizycznych danej cząstki uzyskuje się w wyniku zsumowania efektów oddziaływania na nią otaczających cząstek z wagami określonymi za pomocą pewnej funkcji (tzw. jądra, funkcja ta jest zależna m. in. od parametru wygładzenia) w punkcie położenia danej cząstki. Do zalet tej metody można zaliczyć łatwość symulacji ciał o skomplikowanych kształtach oraz dobrą stabilność metody. Do jej wad należą m. in. trudności z doбором funkcji (jądra) oraz parametru wygładzenia. Przy użyciu tej metody badano ładunki o różnych wymiarach [15, 20, 21]. Znana jest również metoda MSPH – Multi-Phase SPH – która poprawia stabilność obliczeniową i pozwala na lepsze uchwycenie procesu tworzenia się strumienia [22].

Autorzy pracy [13] przedstawili przykładowe wyniki procesu formowania strumienia kumulacyjnego przy użyciu ładunku kumulacyjnego z wkładką hemisferyczną, a następnie porównali z wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi w pracach [23, 24], co pozwoliło im na ocenienie stosowanej przez nich metody punktów swobodnych. Przyjęto następujące parametry geometryczne i materiałowe [23]:

- materiał wybuchowy (octol 75/25) o gęstości  $\rho_0 = 1,81 \text{ g/cm}^3$  i wymiarach: średnica ładunku  $S_L = 6,985 \text{ cm}$ , wysokość ładunku materiału wybuchowego  $H_L = 9,0 \text{ cm}$ ,
- wkładka miedziana o wymiarach: średnica wkładki  $S_w = 6,35 \text{ cm}$ , grubość wkładki  $G_w = 0,206 \text{ cm}$ .



**Rys. 3. Przebieg procesu generacji strumienia kumulacyjnego:**  
**a) kontury strumienia obliczone metoda punktów swobodnych,**  
**b) wyniki metodą Lagrange'a – PIC [15]**

Wyniki analizy numerycznej zaprezentowane są na rysunku 3.

Czas  $t = 0$  jest momentem inicjacji ładunku. Na rysunku tym zostały porównane wyniki otrzymane metodą punktów swobodnych (a) z wynikami metody Lagrange'a – PIC (b). Analiza numeryczna w pracy [22] została podzielona na dwa etapy:

Do czasu  $t = 15 \mu s$  obliczenia zostały wykonane za pomocą kodu numerycznego opartego na metodzie Lagrange'a, natomiast następną fazę modelowano we współrzędnych Eulera za pomocą metody PIC. Porównano też m. in. prędkość czoła strumienia kumulacyjnego oraz zależność masy zawartej w strumieniu od jego prędkości masowej. Wyniki uzyskane dla rozkładu prędkości masowej cząstek strumienia kumulacyjnego jako funkcji ich położenia względem przyjętej osi są obciążone mniejszymi fluktuacjami.

Dowiedziano, iż zaproponowany model fizyczny i zbudowany kod komputerowy zapewniają odpowiednią dokładność wyników modelowania. Ponadto problem modelowania ładunków kumulacyjnych został szeroko omówiony w pracy [15].

### Metoda elementów skończonych

Zbudowany model traktowany jest jako kontinuum materialne, które dzieli się na skończoną ilość elementów o skończonych wymiarach [13, 25]. Model pokrywany jest siatką elementów, do których należy pewna ilość węzłów, czyli punktów o konkretnych współrzędnych w przestrzeni o określonych stopniach swobody oraz oddziaływaniach fizycznych na otoczenie. Każdy element z matematycznego punktu widzenia jest macierzą wartości powiązań pomiędzy stopniami swobody węzłów należących do elementu. Metodą stosowaną do modelowania ładunków kumulacyjnych jest tzw. metoda ALE (ang. *Arbitrary Lagrangian Eulerian*) – sprzężenie metody Lagrange'a z metodą Eulera. Procedura ta składa się z dwóch następujących po sobie

kroków: kroku odwzorowawczego oraz kroku adwekcyjnego. Zaletą wykorzystania tej metody jest zapewnienie stałej topologii siatki MES, natomiast zakres problemów, jakie można modelować za pomocą procedury ALE, zależy od stopnia skomplikowania algorytmów odpowiedzialnych za wygładzenie siatki MES [26].

### Metoda punktów swobodnych

W metodzie tej zbudowany model pokrywany jest siatką punktów materialnych o odpowiednim zagęszczeniu. Właściwie dobrane w chwili początkowej punkty materialne poruszają się razem z ośrodkiem. Rozwiązanie numeryczne polega na wyznaczeniu kolejnych położenia tych punktów oraz wartości zależnych w tych punktach. Mogą one zmieniać dowolnie swoje położenie względem siebie. Ruch oraz parametry ośrodka w każdym punkcie określane są z równań problemu, w oparciu o parametry najbliższych punktów sąsiednich. Dzięki temu, można modelować dowolnie duże deformacje ośrodka [13, 15].

Stosując tę metodę, przy użyciu fizyczno-numerycznego modelu w postaci kodów komputerowych opracowanych przez zespół WAT pod kierownictwem prof. Karola Jacha [15], prowadzono badania ładunków kumulacyjnych używanych do perforacji odwiertów oraz optymalizowano ich konstrukcje [27, 28]. Modelowano parametry dotyczące ładunku kumulacyjnego, takie jak [29]:

- wkładka kumulacyjna – odpowiednia masa, gęstość, kształt, wymiary geometryczne, rodzaj materiału oraz jego struktura [30] była przez lata badana i optymalizowana. Wkładki stosowane do perforacji odwiertów powinny charakteryzować się nieciągłą strukturą strumienia kumulacyjnego, która uniemożliwia tworzenie się zwartej zbitki mogącej czopować wydrążony przez strumień kumulacyjny otwór, a tym samym utrudniając, a nawet blokując swobodny wypływ medium ze złoża. Z badań [29] wynika, że wkładki wykonane techniką prasowania proszków posiadają tę właściwość i nie czopują powstałego krateru,
- materiał wybuchowy – powinien posiadać wysoką prędkość detonacji, co ma bezpośrednie przełożenie na ciśnienie detonacji,
- obudowa.

Podczas projektowania ładunków kumulacyjnych używanych do tych celów powinny zostać uwzględnione dodatkowe czynniki, takie jak:

- temperatura oraz ciśnienie panujące w odwiercie – narzuca dodatkowe wymagania dotyczące odporności ładunku na wysoką temperaturę oraz wysokie ciśnienie,
- ograniczenia geometryczne – są związane zarówno ze średnicą odwiertu (wymiary gabarytowe ładunków wynoszą średnio od 30 do 80 mm), jak również żądaną gęstością perforacji,
- parametry skały złożowej – mające bezpośrednie przełożenie zarówno na głębokość perforacji, jak również średnicę otworu wylotowego i kształt tworzonego krateru. Przeprowadzona doświadczalna weryfikacja teoretycznego modelu [13, 15] procesu formowania się strumienia kumulacyjnego [31] stwierdza, że model nie przedstawia dokładnie procesu formowania się końcowej części zbitki. Wynika to z nieuwzględnienia w modelu teoretycznym efektów zbiegania się fali detonacyjnej do osi ładunku, występujących w otoczeniu wierzchołka wkładki.

### Podsumowanie

Modelowanie komputerowe jest zwykle tańsze, niż odpowiednie badania eksperymentalne, umożliwia szczegółowe śledzenie przebiegu zachodzących zjawisk, przez co ułatwia zrozumienie złożonej natury problemu. Pozwala na ograniczenie badań eksperymentalnych, które są kosztowne, czasochłonne i niebezpieczne. Teorię oraz symulację łączą przeprowadzone doświadczenia. Nie jest możliwe prowadzenie symulacji komputerowych bez odpowiedniej wiedzy teoretycznej, która powinna być potwierdzona badaniami doświadczalnymi.

## Literatura

- Walters W. P., Zukas J. A.: Fundamentals of shaped charges. A. Wiley-Interscience Publication, 1989.
- Nowak H., Smoleński D.: Ładunki kumulacyjne w wojsku, górnictwie, i przemyśle. MON, 1974, 14.
- Birkhoff G., MacDougall D., Pugh E., Taylor G.: Explosives with lined cavities. J. Appl. Phys., 1948, 19, 6, 563–582.
- Лаврентьев М.А.: Кумулятивный заряд и принципы его работы. УМН, 1957, 12, 4/76, 41–56.
- Cudziło S., Maranda A., Nowaczewski J., Trębiński R., Trzciniński W. A.: Wojskowe materiały wybuchowe. Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej, 2000, 334.
- Włodarczyk E.: Analiza parametrów strumienia i zbitki w procesie kumulacji. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 1992, 12(484), 13.
- Babul W., Ziemia S.: O wpływie wytrzymałości na rozciąganie ( $R_c$ ) materiału oporowego na całej długości działania strumienia kumulacyjnego na głębokość przebicia. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 1960, 9(98), 42.
- Muszyński J., Ziemia S.: O wpływie wytrzymałości na rozciąganie ( $R_c$ ) żeliwa na efekt jego przebicia ładunkami kumulacyjnymi. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 1960, 10(99), 40.
- Nowak H.: Wnikanie strumienia kumulacyjnego w jednolitą przeszkodę. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 1970, 1(209), 59.
- Nowak H.: Wnikanie strumienia kumulacyjnego w maszyną przeszkodę składającą się z kilku warstw różnych materiałów. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 1969, 1(197), 110.
- Nowak H.: Ładunki kumulacyjne służące do wytwarzania strumieni o stosunkowo dużej prędkości. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 1968, 3(187), 79.
- Chou P. Ch., Corleone J., Krapp R.R.: Criteria for jet formation from impinging shells and platter. J. Appl. Phys., 1976, 47, 7, 2975-2981.
- Praca zbiorowa pod red. Jacha K.: Komputerowe modelowanie oddziaływania ciał metodą punktów swobodnych. PWN, 2001.
- Lee W.H.: Computer simulation of shaped charge problems. World Scientific, 2006.
- Jach K.: Modelowanie komputerowe zjawisk kumulacyjnych. WAT, 1990, Warszawa.
- Thiel M., Levatin J.: Jet formation experiments and computations with a Lagrange code. J. Appl. Phys., 1980, 51, 12, 6107-6114.
- Molinari J.F.: Finite element simulation of shaped charge. Finite Elements in Analysis and Design, 2002, 38, 10, 921-936.
- Huerta M., Vigil M.G.: Design, analyses, and field test of a 0.7m conical shaped charge. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32, 1201–1213.
- Swegle J. W., Attaway S. W.: On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations. Computational Mechanics, 1995, 17, 3, 151-168.
- Liu M. B., Liu G. R., Zong Z., Lam K. Y.: Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology. Computers and Fluids, 2003, 32, 3, 305-322.
- Liu M. B., Liu G. R., Zong Z., Lam K. Y.: Meshfree particle simulation of the detonation process for high explosives in shaped charge unlined cavity configurations. Shock Waves, 2003, 12, 6, 509-520.
- Hongfu Q., Kunpeng W., Weiran G.: Numerical simulation of shaped charge jet using multi-phase SPH method. Transactions of Tianjin University, 2008, 14, 1, 471-575.
- Lee W. H., Kwak D.: Elastic – plastic flow using operator splitting and particle-in-cell method in a two-dimensional Eulerian hydrodynamic code. Report LA-10857, 1988, UC-32.
- Harrison J. T.: A two stage, hydrodynamic, numerical technique, HOIL and an analysis of the results of a hemispherical shaped charge liner collapse. 8<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics-Orlando, 1984.
- Chandrupatla T.R, Belgundu A. D.: Introduction to finite elements in engineering. Prentice Hall, 2002, 1.
- Małachowski J., Łazowski J.: Wybrane przykłady modelowania zagadnienia sprzężenia w środowisku ALE. Modelowanie inżynierskie, 2007, 3, 33, 107-112.
- Jach K., Trębiński R., Wilk Z., Zygmunt B.: Badania ładunków kumulacyjnych z wkładkami proszkowymi do perforacji odwiertów naftowych. IV Międzynarodowa konferencja uzbrojeniowa - Waplewo, 2002, 107-112.
- Wilk Z., Zakrzewski A., Griesgraber K., Frodyma A., Jach K., Świerczyński R.: Optymalizacja konstrukcji ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów z wykorzystaniem metod symulacji komputerowych. Nafta-gaz, 2006, 62, 12, 673-679.
- Wilk Z., Zygmunt B.: Zastosowanie ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów geologicznych. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 2007, 1, 245-258.
- Schiferl S. K.: Texture and textural evolution In explosively formed jest. J. Appl. Phys., 1989, 66, 6, 2637-2650.
- Cudziło S., Mroczkowski M., Świerczyński R., Jach K., Sarzyński A., Trębiński R.: Doświadczalna weryfikacja modelu procesu formowania się strumienia kumulacyjnego. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 2000, 12, 45-59.

Dr hab. inż. Andrzej WOJEWÓDKA, prof. Pol. Śl. jest absolwentem Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej (1974), na którym uzyskał stopień naukowy doktora (1988) z wyróżnieniem. Habilitacja w Państwowym Naukowo-Badawczym Instytucie Ochrony Pracy w Kijowie w 2004 r. Medal Edukacji Narodowej 2005 r. Zainteresowania naukowe: chemia i technologia materiałów wybuchowych. Autor 42 artykułów naukowych, 42 referatów i posterów, 13 patentów i zgłoszeń patentowych.

Mgr inż. Janusz BĘLZOWSKI jest absolwentem Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej (2005). Obecnie jest uczestnikiem studiów doktorskich i doktorantem na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej oraz studentem studiów podyplomowych z „Kryminalistyki” w Akademii Polonijnej w Częstochowie. Zainteresowania naukowe: chemia i technologia materiałów wybuchowych, synteza organiczna, kryminalistyka. Autor i współautor 1 artykułu naukowego, 3 referatów konferencyjnych, 2 posterów i 6 zgłoszeń patentowych.

Tomasz WITKOWSKI jest studentem Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej. Obecnie jest dyplomantem dr. hab. inż. Andrzeja Wojewódki, prof. Politechniki Śląskiej. Zainteresowania naukowe: chemia materiałów wybuchowych, modelowanie komputerowe.

## SŁONECZNA CHEMIA

Projekt SŁONECZNA CHEMIA – inicjatywa Rady Programowej miesięcznika CHEMIK i Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego ma służyć zmianie świadomości i sformułowaniu nowego sposobu myślenia o chemii w społeczeństwie oraz w nauce, technice i gospodarce. Celem projektu jest utrwalenie roli chemii jako najważniejszej i pierwszorzędnej w rozwiązywaniu współczesnych problemów – także w innych dziedzinach nauki i techniki.

Projekt SŁONECZNA CHEMIA jest dofinansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego  
**Projekt SŁONECZNA CHEMIA**  
 wpisuje się w inicjatywę IUPAC i ONZ  
 „2011 – Światowy Rok Chemii”.