

ANTONI KALUKIEWICZ*

WYSOKOCIŚNIENIOWE URABIANIE WĘGLA

COAL MINING WITH THE USE OF HIGH-PRESSURE JET TECHNIQUES

W artykule przedstawiono modele teoretyczne opisujące efektywność hydrourabiania na tle dotychczasowych doświadczeń z tym procesem.

Autor przedstawił własne badania przeprowadzone w podziemnej kopalni węgla kamiennego. Do hydrourabiania zastosowano instalację własnej konstrukcji umożliwiającą wytworzenie strumieni o średnicach 0,8–1,2 mm, przy ciśnieniach 110–200 MPa. Uzyskane w trakcie badań wyniki pozwalają określić zagęszczenie siatki nacięć w celu wykruszania się urobku.

Określono także energochłonność procesu i skład ziarnowy urobku. Wyniki badań pozwoliły zweryfikować zaproponowany bezwymiarowy model hydrourabiania wysokociśnieniowego.

Słowa kluczowe: hydrourabianie, strumienie wody, urabianie, wysokie ciśnienie

The paper provides an overview of theoretical models describing the efficiency of high-pressure water jet techniques, exploring the applications of this process to date.

The idea of employing water as a rock cutting tool is a very old one. Observation of natural processes clearly showed the destructive actions of water jets, starting from processes in the micro-scale to full scale features such as the Grand Canyon in Colorado. Documented materials describing practical applications of high-pressure water jets date back to the 19th century. The method was employed to excavate clastic gold deposits in California, USA in 1853–1886 (Fig. 1).

High-pressure water jets found their way to Europe, too- in 1900 this method was introduced in Prussia and Russia. In qualitative terms the idea of employing water jets to rock cutting is not new, yet certain quantitative aspects — such as energy requirements and kinematics of water jets, particularly high-pressure water jets, place it among novel and unconventional mining techniques.

The hydraulic rock cutting operation (using water jets mostly) involve the concentrated action of water jet with supersonic speed upon the surface to be machined. Hence considerable power densities delivered locally cause the micro-fragments of the material being crushed to be torn from its body mass.

Several descriptions/models of high-pressure jet generation and its range of applications are available in literature on the subject since it is extremely difficult to cover all phenomena existing in the

* WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI, AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, 30-059 KRAKÓW, AL. MICKIEWICZA 30

water jet (water-air friction, turbulence, generation of shock waves). That is why information on water jet is obtained chiefly by way of empirical tests.

The paper reviews several mathematical models developed experimentally in various research centres. One of the institutions that continued the research on hydraulic rock cutting was the Skoczyński's Mining Institute in Russia.

Extensive experimental programs allowed for formulating most crucial relationships between jet parameters and cutting efficiency [after Kuzmich (Nikonov, Szawłowski, Hynkin 1967; Nikonov, Kuzmich, Goldin 1986; Nikonow 1962), Eq (1)–(3). According to later works by I.A. Kuzmich, G.P. Nikonov, J.A. Goldin, the depth of the cut in hard rocks is given by the formula (4).

E. Pasche developed an empirical formula (5) determining the cut depth (Pasche 1981).

S.C. Crow took into account cavitation processes (Crow 1973, 1974) and provided yet another formula defining the cut depth (6). G. Rehbindler (1977, 1980) used the theory of cavitation as the starting point and derived the formula (8).

J. Vasek and L. Hlavac (Hlavac 1992; Vašek et al. 1991; Vijay, Brierley 1980) from HOU CSAV in Ostrava derived an analytical formula (9) to find the cut depth on the basis of existing models and fundamental equations of hydromechanics. All these developed models require that the operating conditions of the jet and properties of the material to be cut be precisely known beforehand, which seem to preclude their practical use as each application of a model would require extensive testing or a large number of parameters would have to be found.

Laboratory tests on rock- model specimens revealed that small-diameter high-pressure water jets proved to be very effective tools. The further step involved testing the new technology in real-life conditions in underground coal mines.

For that purpose a high-pressure cutting unit was designed and engineered in the AGH University of Science and Technology (see Fig. 2). It generates water jet of sufficiently high pressure (up to 200 MPa) and allows for jet manoeuvring to ensure effective coal cutting.

In order to ensure a sufficiently large speed of nozzle displacement with respect to the rock, the assumption is made that it would move in a rotating motion and the turning radius be continuously controlled. Vertical and horizontal movements of a hydro-monitor with continuous speed control produce a network of cuts on the coal surface, as seen in Fig. 4.

The size fractions of mined material obtained by way of hydraulic cutting were much more satisfactory than when conventional mining machines are used (grade 0–10 mm — 7%, in excess of 100 mm — 36%), while the unit energy of the process remained on a low level $E_{jw} = 1.24$ kWh/Mg.

During the tests there was no water in the excavations, so the mined material was only slightly wet. Dust levels inside the excavation were similar to those in the main gate and ventilation ducts where no mining operations are carried out.

In terms of water jet applicability, the major parameter is the required density of cuts to be made on the rock surface in order to crush the rock portions between the adjacent cuts.

Extensive tests in laboratory conditions and in situ were run in the mine M-300. As a part of this study, the problem of rock crushing between the cuts was thoroughly investigated (Kalukiewicz 1984). The crushing factor $w = h_w/h$ is shown graphically (h — depth of cut made by a water jet, h_w — depth of rock crushing in between the cuts in relation to the distance between the adjacent cuts x).

It is readily apparent that the crushing factor remains on a high level, nearing unity for $x = 40$ – 40 mm, then it rapidly falls down to zero, which means that rock is not crushed at all.

It appears that coal mining with high-pressure jets only is possible and viable in terms of energy requirements. However, when any seam disruptions should appear, other tools, such as machining tools, have to be employed as well. Recent research work is focused on combined mining techniques utilising high-pressure jets as well as machine tools (i.e. high-pressure water jet assisted rock cutting)

As it was mentioned in the introductory section, there are several major determinants of the high-pressure jet assisted cutting process and its mathematical description uses many difficult and mostly empirical coefficients. That is why a dimensionless model of the water assisted cutting process is suggested. The major advantage of the model is that it allows for selecting the operating parameters of cutter/cutting machines, hence it can be employed at the stage of cutter or cutter controller design.

The model includes several formulas relating independent parameters, such as: pressure, time of penetration and velocity of jet displacement when it moves transversely to the operating line, displacement velocity and nozzle standoff distance to dependent variables: cut depth and unit energy.

The cut depth g as the function of time t is expressed as (11) for rock penetrated by an immobile jet (t_m — time constant, i.e. the time after which the maximal depth h_{max} is achieved by the jet of specified parameters, to be determined experimentally). The unit energy in time is given by (12). When rock is cut by a jet moving along the rock surface and the distance between the nozzle and rock surface remains the same, the depth of penetration will decrease with an increase in relative velocity of the nozzle motion along the rock mass. When the relative velocity is very small, the depth of penetration is maximal and in a certain range it remains independent of relative velocity variations.

Accordingly, the depth of penetration h_w given by (14) reaches its maximal value when v_w tends to zero; when h_w tends to zero, v_w will tend to infinity. Unit energy as a function of nozzle displacement velocity is given by (15). In practical applications it is most useful to express the cut depth in the function of pressure as in that way cutting efficiency can be assessed in relation to jet pressure (16) and that pressure, apart from water delivery, determines energy requirements for the process and imposes some new requirements as to cutter design. These expressions and the relationships between the unit energy and pressure presents (17), where p is a parameter defined as pressure at which after the time t a hole is made in the rock to the depth h_{max} .

When the jet moves with a constant velocity v_w , the functional relationships between these quantities will be given as (19) — cut depth and (20) — specific energy variations in the function of pressure.

When the nozzles moves away from the rock surface, the cut depth is reduced. For the distance l , much less than the effective jet length l_j it is given by (21) where l stands for the total, effective jet length or the maximal cut depth for zero jet split.

Analytical formulas expressing the relative cut depth and the relative unit energy of cutting are graphed as curves in Fig. 9, 10, 11. Averaged values obtained by way of measurements being a part of numerous studies (Kalukiewicz 1984, 1986, 1993; Klich, Kalukiewicz 1990) are also indicated on relevant graphs. These values are indicated as points in the coordinate systems to verify the previously derived formulas.

Hydraulic rock cutting as a mining technique has several advantages:

- no sparking,
- low dust levels,
- water jet is not subject to wearing.

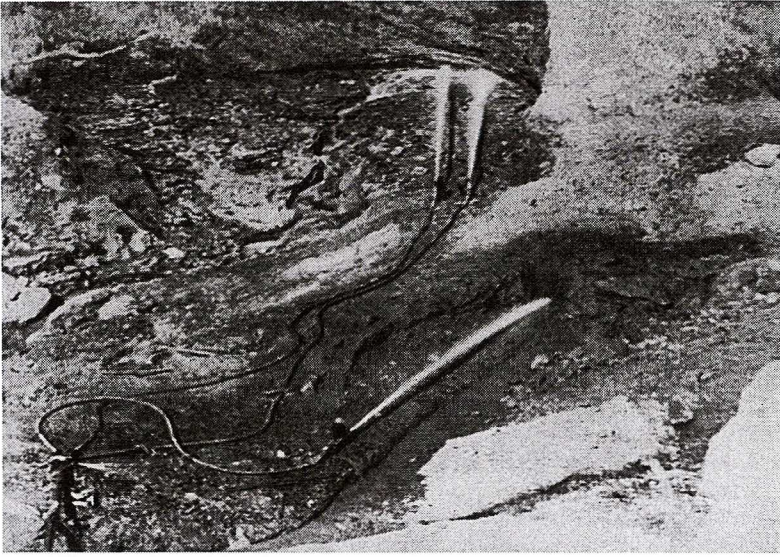
However, high pressure water jet rock cutting requires very advanced equipment. Presently in mining practice high pressure water jet are combined with traditional machining tools (Summers, Barker 1978; Nikonov et al. 1967). In purely technical terms, however, a cutting machine utilising high-pressure jets only can be well designed.

Key words: jet-assisted cutting, water jets, rock cutting, high pressure

1. Wprowadzenie

Pomysł zastosowania wody jako narzędzia urabiającego jest bardzo stary. Wynikał on z bezpośredniej obserwacji przyrody, gdzie widać destrukcyjne działanie strumieni wody w różnej skali — od zjawisk mikroskopijnych poczynając, a na kanionie rzeki Kolorado kończąc.

Praktyczne, udokumentowane materiały dotyczące zastosowań hydrourabiania pochodzą z połowy XIX w. Metodą tą urabiano w latach 1853–1886 okruczowe złoża złotonośne w Kalifornii.



Rys. 1. Hydrourabianie złoża złotonośnego 1853–1886, Sierra Nevada, Kalifornia, USA (widoczne strumienie wody oraz górniczy operujący ręcznie strumieniami) (Stanford University Libraries)

Fig. 1. High-pressure jets used to excavate clastic gold deposits 1853–1886, Sierra Nevada, California USA, we see water jets and miners operating these jets manually (Courtesy Stanford Universities Library)

Hydrourabianie stosowano w sytuacjach, gdy możliwe było wykorzystanie ciśnienia hydrostatycznego wynikającego ze znacznej różnicy poziomów. Wodę pobierano ze źródeł lub rzek położonych znacznie wyżej od miejsca urabiania i doprowadzano ją do wyrobisk za pomocą tekstylnych przewodów elastycznych uszczelnionych od środka masą kauczukową. Pierwsze dysze wykonane były z drewna. W ciągu kilkudziesięciu lat następował rozwój oprzyrządowania. Szczególnie rozwojowi podlegały hydromonitory.

Od roku 1900 hydrourabianie zaczęto stosować także w Europie — w Prusach, oraz w Rosji. Choć z punktu widzenia oceny w kategoriach jakościowych, istota urabiania przy wykorzystaniu energii strumienia płynu do niszczenia struktury skały nie jest pomysłem nowym, jednak w świetle kryteriów ilościowych określających parametry energetyczne i kinematyczne wykorzystywanych strumieni, należy tę technikę, a w szczególności jej obszar obejmujący wykorzystanie tzw. strumieni wysokociśnieniowych, zaliczyć do nowych i niekonwencjonalnych metod urabiania.

Przyspieszenie przebiegu procesu zniszczenia skały, które było podstawowym warunkiem uzyskania metody na tyle wydajnej, by celowe było jej przemysłowe wykorzystanie, wymagało środków technicznych pozwalających na uzyskanie strumieni o odpowiednich parametrach energetycznych, kinematycznych, a także geometrycznych.

Na przestrzeni dziesięcioleci hydrourabianie niskociśnieniowe stosowano w kopalniach odkrywkowych, a także podziemnych. Konieczność wprowadzenia do wy-

robiska podziemnego bardzo dużej ilości wody powodowała szereg niekorzystnych zjawisk. Zainicjowało to prace naukowe i badawcze nad hydrourabianiem wysokociśnieniowym.

2. Matematyczne modelowanie procesów cięcia materiałów zwięzłych za pomocą strumieni wysokociśnieniowych

Obróbka wysokociśnieniowym strumieniem cieczy (przeważnie jest to woda) polega na oddziaływaniu zogniskowanego w dyszy strumienia wodnego o naddźwiękowej prędkości na obrabiany materiał, a więc na doprowadzaniu miejscowo dużej gęstości mocy, powodującej odrywanie mikrocząsteczek materiału od jego podstawowej masy. W procesie tym energia kinetyczna strumienia wody jest przekształcana w energię potencjalną deformacji (pracę mechaniczną usuwania materiału) bezpośrednio w strefie obróbki, bez stosowania jakichkolwiek pośrednich przetworników, tj. naddźwiękowy strumień cieczy jest wykorzystywany jako narzędzie obróbkowe z dużą liczbą krawędzi skrawających. Teoria w zakresie obróbki (cięcia) wysokociśnieniowym strumieniem wody nie jest kompletna, zwłaszcza dla większych liczb Macha.

W literaturze można się spotkać z dużą różnorodnością przy opisywaniu procesu tworzenia strumienia wysokociśnieniowego i wykorzystania go do obróbki, co spowodowane jest różnorodnością zjawisk powstających w strumieniu (np. tarcie wody o powietrze, turbulencja, powstawanie fali uderzeniowej). Większość informacji o strumieniu uzyskano na drodze badań empirycznych.

Do skutecznego urabiania strugą wody konieczne jest przekroczenie określonego granicznego ciśnienia p_{gr} . Jak wykazały badania, ciśnienie to ma raczej związek z wytrzymałością skały na rozciąganie i jego wartość wynosi około $5 R_r$.

Ponieważ wytrzymałość na ściskanie jest w skałach na ogół 8 do 40 razy większa niż na rozciąganie, ciśnienie graniczne jest znacznie mniejsze od wytrzymałości skały na ściskanie. Przy urabianiu strugą wody urabianie nie może być zatem skutkiem wywołania wystarczająco dużych naprężeń ściskających. Rozważania teoretyczne, przy założeniu działania strugi wody w szczelinach, prowadzą również do wniosku, że niszczenie spójności skały następuje wskutek wywołania naprężeń rozciągających. Tak określone graniczne ciśnienie wynosi od 2,5 do 6,2 R_r , co daje dostateczną zgodność z doświadczeniami.

Intensywność urabiania skały zależna jest od jej właściwości wytrzymałościowych, hydrodynamicznych parametrów strumienia cieczy, charakteru kontaktu strumienia z urabianym materiałem, czasu działania strumienia oraz innych wielkości.

Spośród wielkości wejściowych procesu urabiania strumieniem wody najistotniejszy wpływ na jego przebieg i uzyskiwane wyniki wywierają: ciśnienie wody przed dyszą p_0 , średnica dyszy d , odległość wylotu dyszy od powierzchni przedmiotu L i prędkość przesuwu dyszy lub urabianego materiału v_p . Podstawowym kryterium urabiania skał wysokociśnieniowym strumieniem cieczy jest głębokość szczeliny g , powstałej przy

jednym przejściu strumienia przemieszczającego się względem powierzchni urabianej skały z określoną prędkością.

Poniżej przedstawiono niektóre z modeli matematycznych uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych w różnych ośrodkach.

Badania nad urabianiem strumieniami były prowadzone między innymi w Instytucie Górniczym im. Skoczyńskiego (Rosja). Na podstawie prowadzonych prac eksperymentalnych otrzymano szereg zależności pomiędzy parametrami strumienia a parametrami urabiania [wg Kuzmicha (Nikonov et al. 1967; Nikonov 1962)]:

$$h(p_0) = c \cdot (p_0 - p_{kr}) \quad (1)$$

$$h(v_p) = g_0 \cdot e^{-\alpha v_p} \quad (2)$$

$$h(d) = B \cdot d^n \quad (3)$$

gdzie:

- p_{kr} — ciśnienie krytyczne, przy którym rozpoczyna się urabianie skały [MPa],
- h_0 — głębokość urabiania nieruchomą strugą [mm],
- B, c, α, n — współczynniki empiryczne.

Według I. A. Kuzmicha, G. P. Nikonowa i J. A. Goldina głębokość cięcia w twardych skałach określa następująca zależność (Nikonov et al. 1986):

$$h = 0,11 \cdot d_0 \cdot \left(\frac{p_0}{\sigma_\alpha} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{v_0}{v_p} \right)^{0,5} \quad (4)$$

gdzie:

- h — głębokość cięcia [mm],
- d_0 — średnica dyszy [mm],
- p_0 — ciśnienie cieczy na wylocie z dyszy [MPa],
- σ_α — wytrzymałość skały pod ciśnieniem [MPa],
- v_0 — prędkość początkowa cieczy na wylocie z dyszy [m/s],
- v_p — prędkość przemieszczania się strumienia względem skały [cm/s].

E. Pasche przedstawił następujący wzór empiryczny na głębokość cięcia skały (Pasche 19981):

$$h = 0,03356 \cdot (39,8 - L) \cdot 10^{-0,55 - 1,485 \cdot d_0 - 16,375 \cdot v_p} \cdot p_0^{0,28 + 0,7 \cdot d_0 + 5,3 \cdot v_p} \quad (5)$$

gdzie:

- d_0 — średnica dyszy [mm],
- p_a — ciśnienie cieczy na wylocie z dyszy [MPa],

v_p — prędkość przemieszczania się strumienia względem skały [cm/s],
 L — odległość dyszy od skały [mm].

Z kolei S.C. Crow w swych rozważaniach (Crow 1973, 1974), uwzględniając występowanie zjawiska kawitacji, głębokość powstającej szczeliny określił wzorem:

$$h = 2 \cdot \mu_w \cdot \frac{d_0 \cdot p_0}{\tau_0} \int_0^{\varphi_0} \frac{L^{\mu_w \cdot (\varphi - \varphi_0)} \cdot \sin \varphi}{1 + \left(\frac{v_p}{c}\right) \cdot \sin \varphi} d\varphi \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

gdzie:

d_0 — średnica dyszy [mm],
 p_0 — ciśnienie cieczy na wylocie z dyszy [MPa],
 v_p — prędkość przemieszczania się strumienia względem skały [mm/s],
 μ — współczynnik tarcia między cieczą a skałą,
 τ — naprężenie, przy którym dochodzi do poślizgu ziarna skały [MPa],
 φ — kąt między styczną do powierzchni skały w osi cięcia a osią strumienia, mierzony przeciwnie do kierunku ruchu danego prędkością v_p [rad],
 φ_0 — kąt padania w znaczeniu definicji j [rad],
 c — prędkość cięcia [mm/s], opisana wzorem:

$$c = k \cdot \tau_0 \cdot \mu_r^{-1} \cdot a^{-1} \quad (7)$$

gdzie:

k — przepuszczalność skały,
 μ_r — współczynnik wewnętrznego tarcia skały,
 a — średnica typowego ziarna skały.

Natomiast G. Rehbinder, który również wyszedł z teorii kawitacji, związek ten przedstawia następująco (Rehbinder 1977, 1980, 1987):

$$h = 100 \cdot d_0 \cdot \ln \left(1 + \frac{\beta \cdot k}{\eta \cdot a \cdot D} \cdot p_0 \cdot t \right) \quad [\text{m}] \quad (8)$$

gdzie:

k — przepuszczalność skały [m²],
 d_0 — średnica dyszy [mm],
 a — średnica typowego ziarna skały [m],
 η — dynamiczna lepkość cieczy [Ns/m²],
 t — czas [s],
 D — szerokość cięcia [m],
 β — stała empiryczna.

J. Vasek (1991, 1994) i L. Hlavač (1992) z HOU ČSAV Ostrava wyznaczyli analityczny model głębokości cięcia h z analizy istniejących modeli oraz elementarnych równań hydrodynamiki. Według nich:

$$h = \frac{\sqrt{2\rho} \cdot \pi \cdot d \cdot (1 - \alpha^2) \cdot [\mu \cdot p_0 \cdot (1 - \delta \cdot p_0)]^{1,5} \cdot e^{-2,5\xi \cdot L}}{4\rho_p A' \left[v_p + \frac{A' d e^{-0,5\xi \cdot L}}{1000} \right]^{p/p_p} \left[\alpha^2 e^{-2\xi \cdot L} \mu \cdot p_0 \cdot (1 - \delta \cdot p_0) + \frac{10^6 \rho}{\rho_p} (R_c \cos \Theta + R_s \sin \Theta) \right]} \quad (9)$$

gdzie:

$$A' = 1 + \alpha^{0,5} \quad (10)$$

przy czym:

- α — współczynnik zależny od parametrów strugi,
- μ — współczynnik strat w dyszy,
- δ — ściśliwość cieczy [MPa^{-1}],
- ξ — współczynnik charakteryzujący hamowanie strumienia w powietrzu,
- L — odległość dyszy od powierzchni próbki [m],
- Θ — kąt, pod jakim pada strumień [rad],
- p_0 — ciśnienie zasilania [Pa],
- ρ — gęstość wody [kg/m^3],
- R_c — doraźna wytrzymałość skały na jednoosiowe ściskanie [MPa],
- R_s — doraźna wytrzymałość skały na ścinanie [MPa].

Jak widać z przedstawionych powyżej związków fizycznych, uzyskane modele wymagają bardzo szczegółowego rozpoznania warunków pracy strumienia i materiału ciętego, co utrudnia praktyczne ich wykorzystanie.

Na obecnym etapie rozwoju technik strumieniowych, wobec olbrzymiej ilości danych badawczych i znanych wyników zastosowań przemysłowych, obserwuje się tendencję do opisu zjawisk za pomocą wzorów empirycznych, które w miarę ich „rozwoju” i uszczegółowienia urastają do formuł zawierających po kilkadziesiąt parametrów i współczynników związanych z urządzeniem strumieniowym i materiałem ciętym. Aby praktycznie zastosować taki model należy każdorazowo wykonać szerokie badania lub zebrać liczne wymagane wartości współczynników.

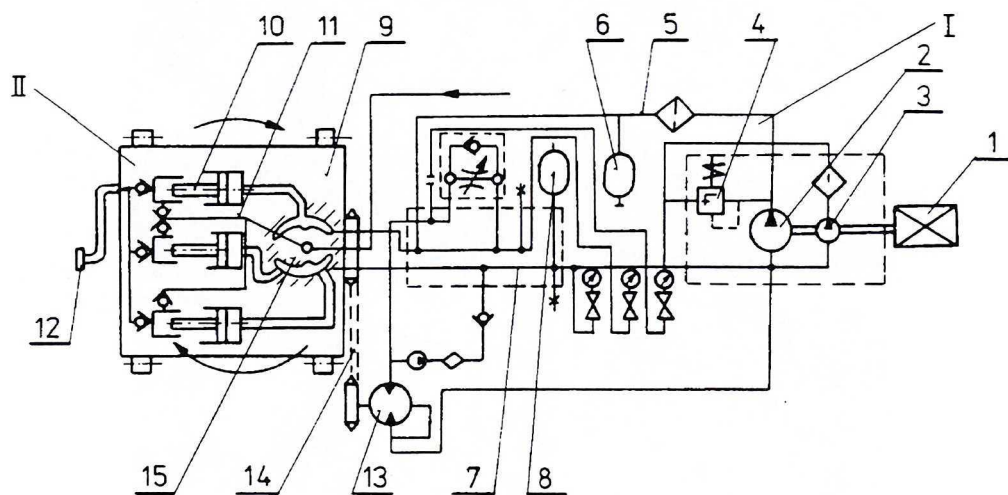
Niezależnie od tego należy mieć świadomość, że każdy z tych współczynników jest obarczony błędem. Dotyczy to szczególnie współczynników związanych z materiałem ciętym czy urabianym. Skały są, jak wiadomo, materiałem najczęściej niejednorodnym. Tak więc może tu zachodzić efekt sumowania się błędów pomiarowych i tych, które wynikają z różnic w strukturze i własnościach próbki skały, dla której badacz wyznaczał wartości współczynników modelu i skały, a która ma być urabiana przez projektowane urządzenie.

Należy więc każdorazowo konfrontować warunki eksperymentu i późniejszego zastosowania, a brak dostatecznych informacji o jednych lub drugich warunkach prze-

kreśla możliwość wykorzystania modelu jako narzędzia projektowania, co oczywiście nie dyskwalifikuje jego znaczenia od strony funkcji poznawczej. Trzeba się zatem liczyć z tym, że przy projektowaniu głowic maszyn urabiających działających w oparciu o wykorzystanie wysokociśnieniowych strumieni wodnych, często będzie zachodziła konieczność przeprowadzenia eksperymentu celem zmniejszenia ryzyka związanego z podjęciem decyzji projektowej dotyczącej doboru parametrów maszyny i oceny jej parametrów użytkowych.

3. Praktyczne wykorzystanie strumieni wysokociśnieniowych do urabiania węgla

W trakcie badań laboratoryjnych na próbkach modelujących skały stwierdzono efektywność działania małośrednicowych wysokociśnieniowych strumieni wody. Oczy-



Rys. 2. Schemat stanowiska do wytwarzania strumienia wody o ciśnieniu do 200 MPa [4]

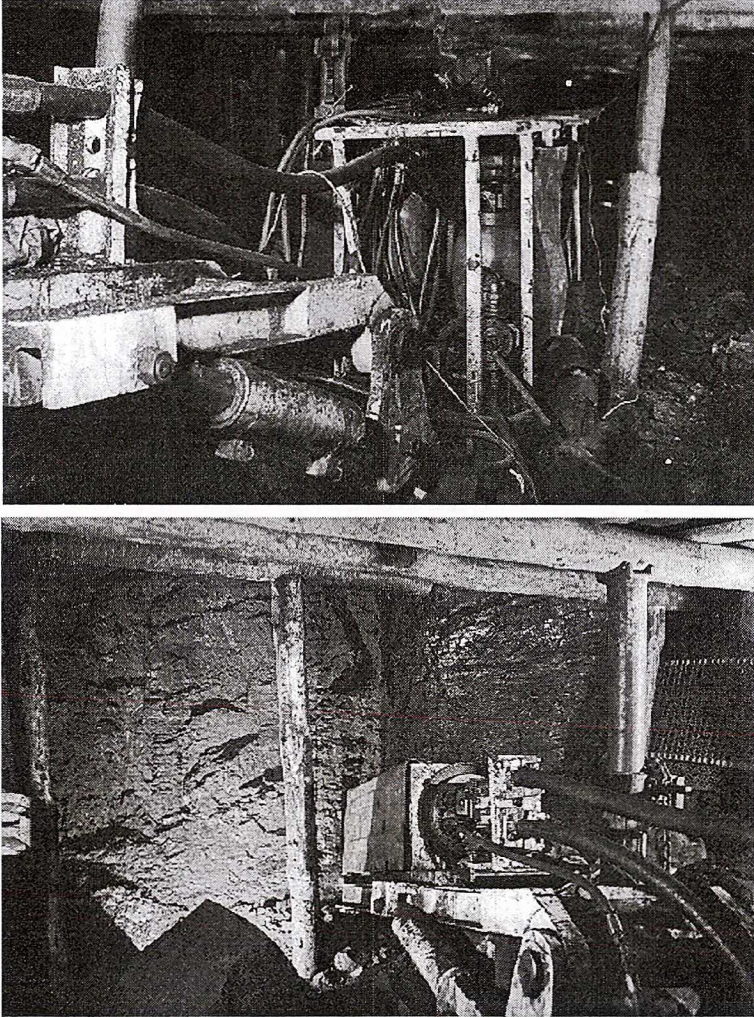
- I — Agregat zasilający, II — hydromonitor, 1 — silnik elektryczny 90 kW,
 2 — pompa Rexroth $Q = 238$ l/min, $p = 20$ MPa, 3 — pompa pomocnicza, 4 — zawór przelewowy,
 5 — przewód tłoczny, 6 — akumulator, 7 — przewód ssący, 8 — akumulator pełniący rolę zbiornika oleju,
 9 — obudowa hydromonitora obrotowego, 10 — tłok multiplikatora o przełożeniu 1/10,
 11 — niskociśnieniowy przewód wodny, 12 — dysza, 13 — silnik obracający hydromonitorem,
 14 — przekładnia łańcuchowa obrotu hydromonitora, 15 — rozrząd olejowy zasilania multiplikatorów

Fig. 2. Schematic diagram of a jet generator (up to the pressure 200 Mpa) [4]

- I — power supply unit, II — hydromonitor, 1 — electric motor 90 kW,
 2 — Rexroth pump $Q = 238$ l/min, $p = 20$ Mpa, 3 — auxiliary pump, 4 — overflow valve, 5 — pressure conduit;
 6 — accumulator, 7 — suction line, 8 — accumulator used as an oil reservoir, 9 — rotary hydromonitor casing, 10 — piston of a hydraulic intensifier with the transmission ratio 1/10, 11 — low-pressure water conduit, 12 — nozzle, 13 — motor controlling the hydromonitor; 14 — chain transmission for the hydromonitor; 15 — oil distributor for intensifiers

wistym dalszym etapie prac było wypróbowanie tej nowej technologii w warunkach naturalnych podziemnej kopalni węgla kamiennego.

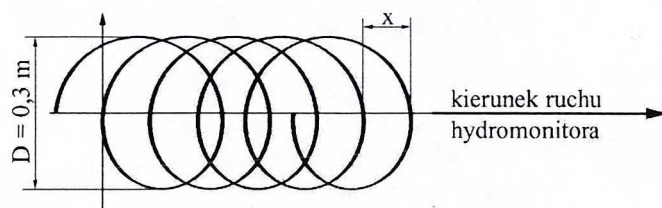
Aby zbadać możliwość urabiania węgla w podziemnej kopalni skonstruowane zostało i zbudowane w AGH w Krakowie urządzenie do hydraulicznego urabiania. Umożliwia ono wytworzenie strumienia o odpowiednio wysokim ciśnieniu do 200 MPa oraz manewrowanie tym strumieniem w przestrzeni tak, by można było zrealizować proces urabiania węgla.



Rys. 3. Urządzenie do wysokociśnieniowego hydrourabiania węgla w wyrobisku kopalni M-300 w Zabrzu (poziom 320 m) w trakcie badań

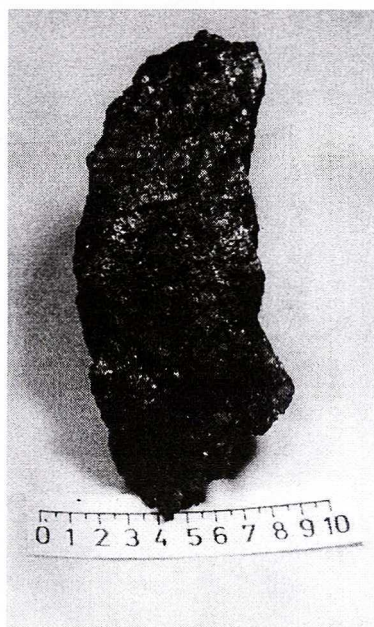
Fig 3. High-pressure cutting machine in the mine M-300 in Zabrze (level 320m) in the course of investigations

Aby uzyskać możliwie dużą prędkość przemieszczania dyszy względem skały założono, że będzie ona poruszała się ruchem obrotowym z regulowanym bezstopniowo od 0 do 150 mm promieniem wirowania. Jednoczesne przemieszczanie w pionie lub w poziomie hydromonitora, również z regulowaną bezstopniowo prędkością, umożliwia uzyskanie na powierzchni węgla siatki nacięć jak na rysunku 4.



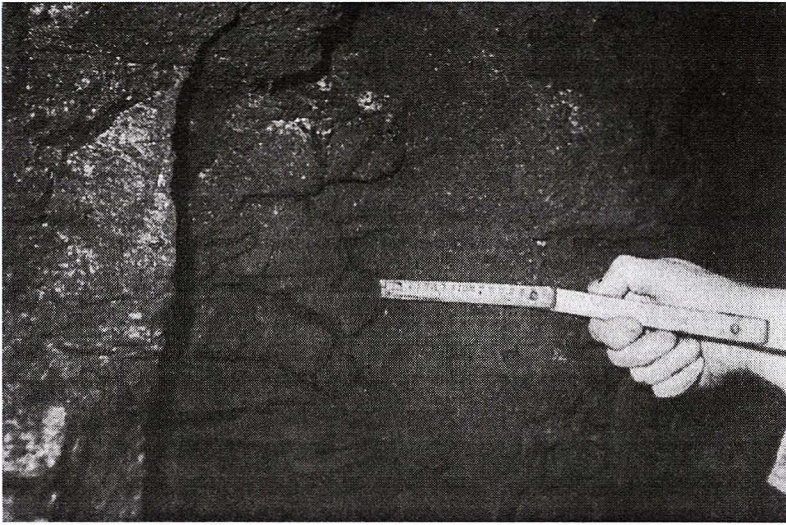
Rys. 4. Trajektoria ruchu dyszy po powierzchni skały realizowana przez urządzenie do wysokociśnieniowego urabiania węgla (AGH)

Fig. 4. Nozzle trajectory on the rock surface generated by the high-pressure cutting machine (AGH-UST)



Rys. 5. Przykładowa bryła urobku węgla o wskaźniku urabialności $f = 1,23$, która wykruszyła się pomiędzy nacięć wykonanych wysokociśnieniowym strumieniem wody

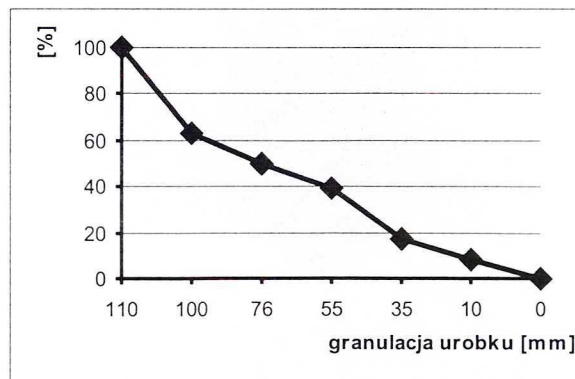
Fig. 5. A block of mined coal with the cuttability factor $f = 1,23$, crushed in between the cuts made with high-pressure water jets



Ry. 6. Wrąg wykonany w caliznie, na dnie widać łukowe nacięcia. Calizna nie wykruszyła się na pełną głębokość nacięć wykonanych hydromonitorem $p = 200$ MPa, $d = 1$ mm.

Fig. 6. A kerf, on the bottom are arc-shaped incisions. The rock mass did not crush down to the whole depth of the cut made with the use of a hydromonitor $p = 200$ MPa, $d = 1$ mm

Jednym z głównych celów tych badań było określenie możliwości nie tylko cięcia, ale urabiania, czyli wykruszania się węgla pomiędzy nacięć wykonanych wysokociśnieniowym strumieniem wody. Celem badań było również określenie energochłonności procesu. W trakcie badań wydrążono za pomocą urządzenia 15 mb chodnika o wymiarach poprzecznych $h = 1,7$ m, $s = 3,2$ m.



Rys. 7. Krzywa składu ziarnowego urobku otrzymanego z wysokociśnieniowego hydrourabiania (kopalnia M-300, Zabrze)

Fig. 7. Grain size distribution of the mined material obtained with the use of high-pressure water jet techniques in the mine M-300, Zabrze

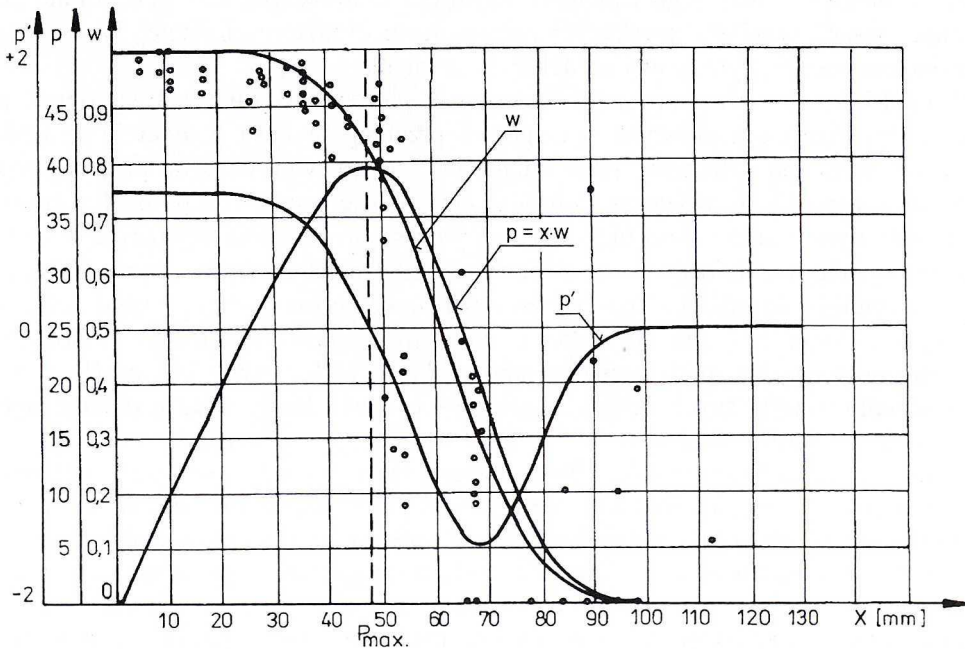
W trakcie hydrourabiania uzyskano bardzo dobry sortyment urobku w stosunku do urobku otrzymywanego w tradycyjnych kombajnach węglowych (7% klasy od 0–10 mm, 36% powyżej 100 mm), przy bardzo niskich energiach jednostkowych urabiania $E_{j_w} = 1,24 \text{ kWh/Mg}$.

W wyrobisku w trakcie badań nie było wody, urobek był tylko lekko zwilżony. Zapylenie w wyrobisku było na poziomie zapylenia występującego w chodniku podstawowym, wentylacyjnym, gdzie nie prowadzono urabiania.

Z punktu widzenia przydatności strumieni do urabiania skał bardzo istotne jest określenie koniecznej gęstości siatki nacięć calizny, umożliwiającej wykruszanie skały pozostającej między sąsiednimi nacięciami.

W ramach szerokich badań laboratoryjnych i dołowych prowadzonych w kopalni M-300 przebadano również szczegółowo (Kalukiewicz 1984) zagadnienie wykruszania się skały pomiędzy nacięciami. Uzyskane wyniki ilustruje wykres na rysunku 8. Na wykresie przedstawiono zależność tzw. wskaźnika wykruszania $w = h_w/h$ gdzie: h — głębokości nacięcia węgla przez strumień, h_w — głębokości wykruszenia bryły urobku pomiędzy nacięciami od odległości wzajemnej sąsiedzkich nacięć x .

Jak widać, wskaźnik wykruszania utrzymuje się na wysokim poziomie bliskim jedności do wartości $x = 40\text{--}50 \text{ mm}$, następnie jego wartość szybko maleje do zera, co znaczy, że nie następuje wykruszanie.



Rys. 8. Zależność wskaźnika wykruszenia w od odległości kolejnych nacięć x

Fig. 8. Crushing factor in the function w of distance between cuts x

Na tym samym rysunku naniesiono także wartość $p = x \cdot w$ oraz pierwszą pochodną tej wielkości względem x . Na osiach rzędnych znajdują się odpowiednie skale tych zależności. Jak widać, dla wartości $x = 47$ mm uzyskano (dla badanego węgla) najkorzystniejsze i najwydajniejsze wykruszanie się skały. Stwierdzono, że urabianie węgla wyłącznie przez strumień wysokociśnieniowy jest możliwe i energetycznie korzystne. Jednak w przypadku wystąpienia zaburzeń w postaci np. przerostów pokładu, konieczne może być zastosowanie dodatkowych narzędzi, np. skrawających. Tak więc w pracach nad hydraulicznym urabianiem skał obserwuje się w ostatnich latach tendencje do wprowadzania i badania efektywności kombinowanych metod urabiania typu: strumień-narzędzie skrawające.

Z licznych badań wiadomo, że tylko skały o bardzo niejednorodnej budowie, mające wyraźny kłiważ, uwarstwienie czy inne płaszczyzny osłabionej spójności wykruszają się dość łatwo z przestrzeni pomiędzy nacięciami. Takie badania prowadzono dla węgla w szerokim zakresie parametrów strumienia, uzyskując podobne wyniki.

4. Bezwymiarowy model hydrourabiania

Proces hydrourabiania, jak to przedstawiono na wstępie artykułu, jest zależny od wielu zmiennych i przy jego matematycznym opisie używa się licznych, trudno dostępnych współczynników uzyskanych najczęściej na drodze empirycznej. Wobec tego zaproponowano bezwymiarowy model hydrourabiania.

Model bezwymiarowy stosuje się w sytuacji, gdy zjawisko nie daje się opisać za pomocą równań różniczkowych opisujących przebieg procesu w oparciu o model fizyczny, wiadomo natomiast, jakie wielkości fizyczne wpływają na przebieg tego procesu. Ustanawia się wówczas na drodze empirycznej zależności pomiędzy zmiennymi zależnymi i zmiennymi niezależnymi procesu, a następnie w oparciu o aparat analizy wymiarowej tworzy się ze zmiennych fizycznych liczby bezwymiarowe, po czym formułuje się model w postaci związku funkcyjnego pomiędzy tymi liczbami bezwymiarowymi, tzw. niezmiennikami zależnymi i niezależnymi. Jeżeli założymy, że zmienne mogą być przedstawione jako funkcje ciągłe, wtedy jest możliwe wyprowadzenie wiarygodnych ogólnych zależności, nawet kiedy wiedza o fizycznych procesach jest bardzo ograniczona.

Podstawowa praktyczna zaleta bezwymiarowego modelu to możliwość wnioskowania o efektywności (głębokości cięcia), wydajności cięcia lub urabiania, energii jednostkowej w całym zakresie podstawowych parametrów urządzenia które mamy do dyspozycji na podstawie eksperymentu z modelem projektowanego urządzenia w warunkach zbliżonych do warunków stosowania, bez konieczności każdorazowego wykonywania szerokich badań. Wystarczy znajomość głębokości cięcia przy jednej prędkości przemieszczania dyszy i jednej wartości ciśnienia cieczy, by móc wnioskować o przewidywanej głębokości cięcia przy innej prędkości czy ciśnieniu zasilania. Tak więc model bezwymiarowy posiada bardzo istotną zaletę praktyczną, umożliwia bo-

wiem dobór parametrów roboczych urządzeń tnących strumieniami, a więc może służyć do ich projektowania, jak też projektowania sterowników dla tych urządzeń.

Model tworzą zależności wiążące takie parametry niezależne, jak ciśnienie, czas penetracji — a w przypadku strumienia przemieszczającego się poprzecznie do kierunku działania, prędkość przemieszczania, odległość dyszy od calizny — ze zmiennymi zależnymi, jak głębokość cięcia i energia jednostkowa urabiania. Ścisłej mówiąc, wiąże ze sobą względne wartości tych parametrów odniesione do wartości stałych uzyskanych z pomiaru dla określonej konstrukcji i parametrów dyszy w danej skale (Mellor 1972; Vašek, Hlavač 1994).

Głębokość cięcia h , jako funkcja czasu t , przy penetracji przez nieruchomy strumień wyraża się zależnością:

$$h_t = h_{\max} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_m}\right) \right] \quad (11)$$

gdzie t_m to stała czasowa (czas osiągnięcia maksymalnej głębokości g_{\max} przez strumień przy danych parametrach w danej skale), którą należy wyznaczyć eksperymentalnie.

Zależność energii jednostkowej w czasie jest dana równaniem:

$$E_j = \frac{\rho \cdot v^3 \cdot t_m}{2 \cdot k_l^2 \cdot h_{\max}} \cdot \exp\left(\frac{t}{t_m}\right) \quad (12)$$

więc:

$$\frac{E_j}{E_0} \exp\left(\frac{t}{t_m}\right) \quad (13)$$

gdzie:

- e_0 — energia jednostkowa ($E_0 = E_j$, gdy $t = 0$) wykonania otworu o głębokości h_{\max} w danej skale w czasie t_m ,
- v — prędkość strumienia w jego osi,
- k_l — stała określająca stosunek średnicy otworu do średnicy strumienia,
- ρ — gęstość strumienia.

W przypadku cięcia przez strumień przemieszczający się wzdłuż powierzchni calizny przy stałej odległości dyszy od powierzchni urobionej głębokość penetracji strumienia będzie się zmniejszać w miarę wzrostu prędkości względnej v_w dyszy wzdłuż calizny. Przy bardzo małej prędkości względnej otrzymamy maksymalną głębokość penetracji, w pewnym zakresie niezależną od zmian prędkości względnej.

Tak więc zależność głębokości penetracji h_w osiąga wartość maksymalną, gdy v_w dąży do zera, natomiast h_w *zdeżdża* do zera, gdy v_w dąży do nieskończoności:

$$h_w = h_{w0} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{v_{w1}}{v_w}\right) \right] \quad (14)$$

gdzie:

- h_w — penetracja przy prędkości względnej v_w ,
- h_{w0} — głębokość penetracji gdy $v_w \rightarrow 0$,
- v_{w1} — stałą proporcjonalną (ma wymiar prędkości).

Energię jednostkową jako funkcję prędkości przemieszczania dyszy wyraża wzór:

$$E_j = \frac{E_{j1}}{v_w \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{v_{w1}}{v_w}\right) \right]} \quad (15)$$

Zauważyć należy, że $E_{j1} \rightarrow E_j$, gdy $v_w \rightarrow \infty$.

Istotne praktyczne znaczenie ma określenie głębokości nacinania w funkcji ciśnienia, gdyż daje możliwość oszacowania wydajności w zależności od ciśnienia, którego wartość obok wydatku wody wpływa na energochłonność procesu, a ponadto stwarza określone wymagania jeśli chodzi o rozwiązania konstrukcyjne układu maszyny. Zależności te oraz zależności wiążące energię jednostkową urabiania z wartościami ciśnienia przyjmują postać, jak w poniższych wzorach.

Głębokość penetracji strumieniem stacjonarnym:

$$h_t = h_{\max} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{p_0}{p_1}\right) \right]^2 \quad (16)$$

gdzie p_1 oznacza parametr odpowiadający wartości ciśnienia przy którym w czasie t_m uzyskuje się w danej skale otwór o głębokości h_{\max} oraz zmiany energii (jednostkowej) wraz ze zmianą ciśnienia p_0 dla stałego czasu działania strumienia:

$$E_j = \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \frac{C_v^3 \cdot t}{k_1^2 \cdot h_{\max}} \cdot p_1^{3/2} \frac{\exp\left(-\frac{p_0}{p_1}\right)^2}{\left(-\frac{p_0}{p_1}\right)^{1/2}} \quad (17)$$

gdzie:

- C_v — współczynnik prędkości,
- k_1 — stała określająca stosunek średnicy otworu do średnicy strumienia,

lub zapisując inaczej:

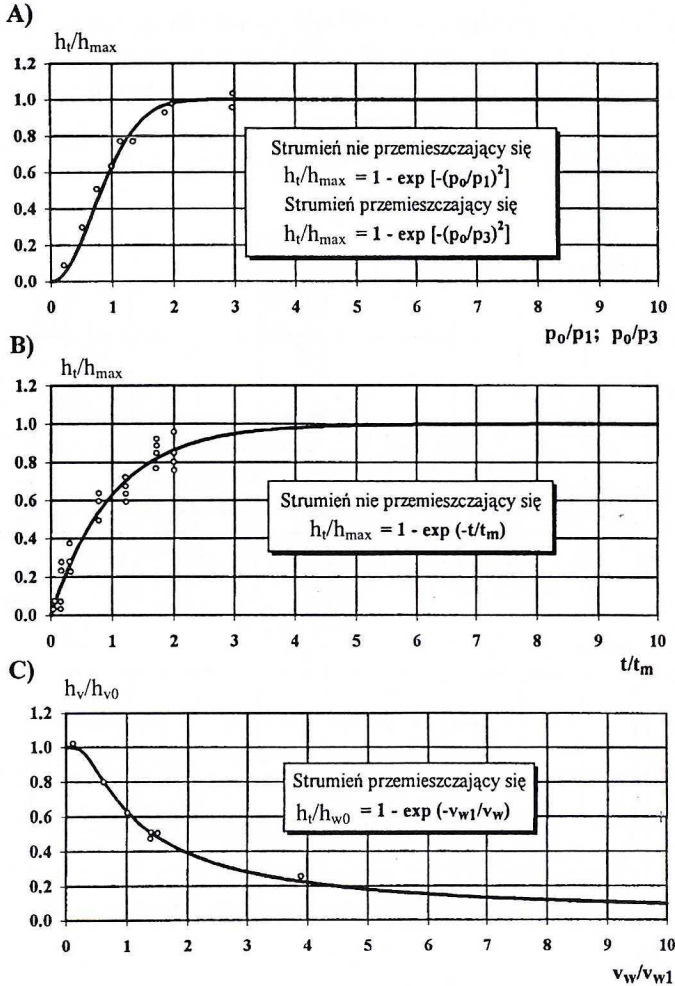
$$E_j = E'_j \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{-1/2} \cdot \exp\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^2 \quad (18)$$

gdzie E'_j oznacza stałą (z wymiarem energii).

Jeżeli strumień przemieszcza się ze stałą prędkością v_w , to zależności funkcyjne pomiędzy tymi samymi wielkościami przyjmują postacie:

- dla głębokości cięcia:

$$h_w = h_{w0} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{p_0}{p_2}\right)^2 \right] \quad (19)$$



Rys. 9. Zależności względnej głębokości cięcia od:

A — względnego ciśnienia strumienia stacjonarnego lub przemieszczającego się, B — względnego czasu działania strumienia stacjonarnego, C — względnej prędkości przemieszczania dyszy

Fig. 9. Relative cut depth vs:

A — relative pressure of stationary or moving water jet, B — relative time of stationary jet operation, C — relative velocity of nozzle motion

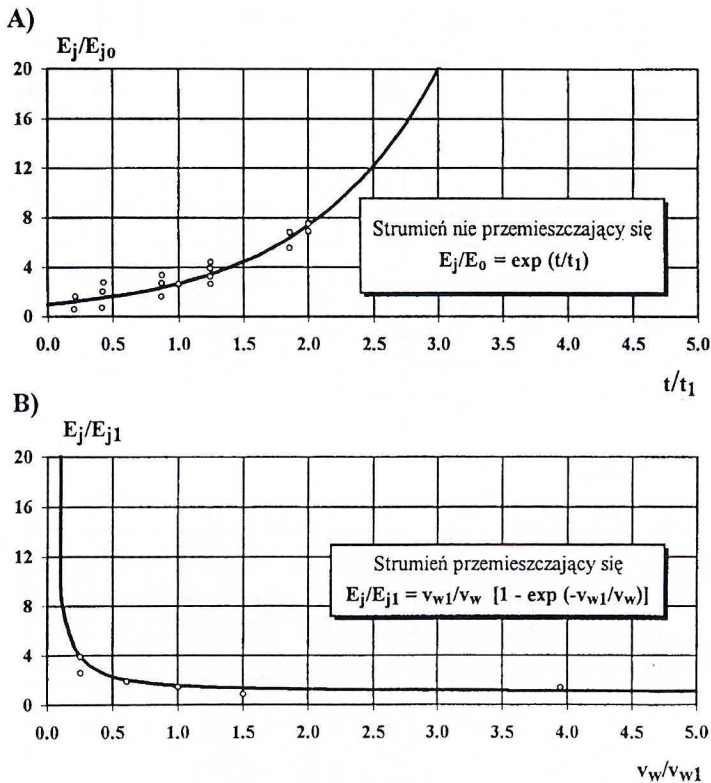
- a dla zmian energii właściwej w funkcji ciśnienia:

$$E_j = \frac{C_v^3 \cdot \pi}{2\sqrt{2} \cdot \rho} \cdot \frac{2}{k_2 \cdot h_{w0} \cdot v_w} \cdot \frac{p_0^{3/2}}{\left[1 - \exp\left(-\frac{p_0}{p_2}\right)^2\right]} \quad (20)$$

gdzie:

- p_2 — parametr odpowiadający wartości ciśnienia dla danej wartości prędkości względnej v_w , przy którym rozpoczyna się penetracja materiału,
- k_2 — stała określająca stosunek szerokości nacięcia s do średnicy strumienia d .

Jak widać, wartość energii jest minimalna gdy $p_0/p_2 = 0,72$.



Rys. 10. Zależności względnej energii początkowej cięcia: A — względnego czasu działania strumienia stacjonarnego, B — prędkości przemieszczania dyszy względem skały dla strumienia przemieszczającego się

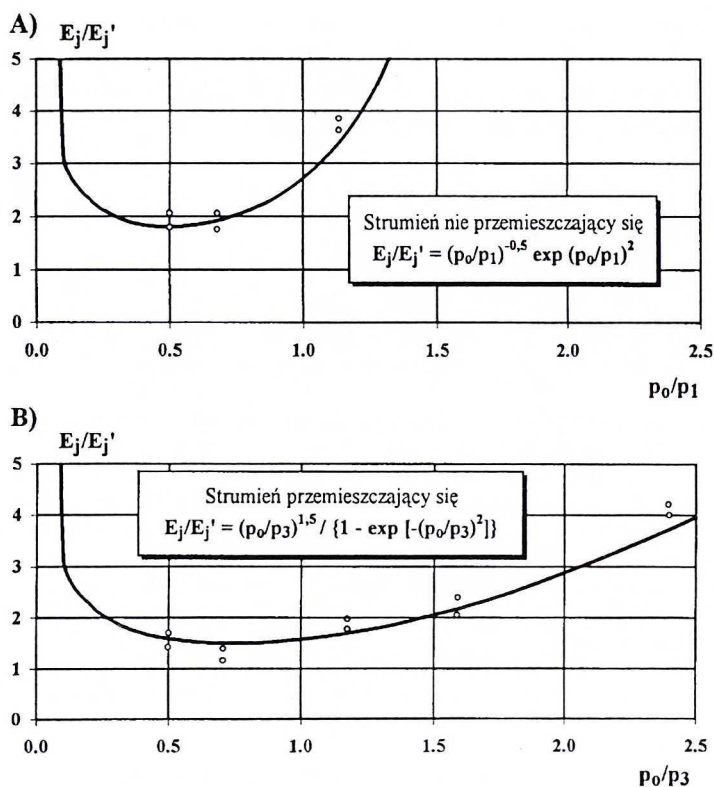
Fig. 10. Relative initial energy of cutting in the function of: A — relative time of stationary jet action, B — nozzle displacement with respect to rock for a moving jet

Dla praktyki istotne jest też określenie zależności głębokości cięcia jako funkcji odległości dyszy od calizny. Rezultatem oddalania dyszy od calizny jest redukcja zagłębienia, która dla odległości l znacząco mniejszych od efektywnej długości strumienia l_j wyraża się zależnością

$$h_w = (l_j - l) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{v_{wl}}{v_w}\right) \right] \quad (21)$$

gdzie l_j jest całkowitą, efektywną długością strumienia lub maksymalnym zagłębieniem dla zerowego rozszczepienia strumienia.

Otrzymane analityczne zależności względnej głębokości cięcia strumieniem oraz względnej energii jednostkowej cięcia przedstawiają krzywe na rysunkach 9, 10, 11.



Rys. 11. Zależności względnej energii jednostkowej cięcia od bezwymiarowych współczynników ciśnienia:

A — strumienia stacjonarnego, B — strumienia przemieszczającego się

Fig. 11. Relative unit/specific energy of cutting in the function of dimensionless pressure coefficients:
 A — stationary jet, B — moving jet

Na przedstawionych graficznie zależnościach funkcyjnych naniesione zostały wartości średnie, uzyskane z pomiarów zamieszczonych w wielu pracach badawczych (Kalukiewicz 1984, 1986, 1993; Klich, Kalukiewicz 1990). Wartości te oznaczone zostały punktami w układach współrzędnych przedstawionych wykresów, weryfikując podane wcześniej zależności.

5. Wnioski

Hydrourabianie jako technika górnicza ma szereg zalet, m.in.:

- brak iskrzenia,
- bardzo niskie zapylenie,
- strumień jest narzędziem, które nie ulega zużyciu itp.

Wymaga jednak zaawansowanego technologicznie osprzętu. W praktyce górnictwa na obecnym etapie łączy się najczęściej wysokociśnieniowe strumienie wody z tradycyjnymi narzędziami skrawającymi (Summers, Baker 1978). Z technicznego punktu widzenia, jak to wykazały przedstawione w tym artykule wyniki badań, możliwe jest zbudowanie maszyny urabiającej opartej na technologiach wysokociśnieniowego hydrourabiania.

REFERENCES

- Crow S.C., 1973: A theory of hydraulic rock cutting. *Int. J. Rock Mech., Min. Sci. Geomech., Abst.* vol. 10.
- Crow S.C., 1974: The effect of porosity on hydraulic rock cutting. *Int. J. Rock Mech., Min. Sci. Geomech., Abst.* vol. 11.
- Hlavač L., 1992: Physical description of high energy liquid jet interaction with material. HOU ČSAV, Ostrawa.
- Kalukiewicz A., 1984: Badania nad urabianiem węgla strumieniami cieczy. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków.
- Kalukiewicz A., 1986: Die Laborversuche für das Schneiden der Gesteine mit einem Hochdruckwasserstrahl. Massenguttransport durch Rohrleitungen. 7. Kolloquium der Universität GH Paderborn, Meschede, Niemcy.
- Kalukiewicz A., 1993: Examination of the range of jet action in an aqueous medium. *Proceedings of the 7th American Water Jet Conference*, Seattle, Washington, USA.
- Klich A., Kalukiewicz A., 1990: Untersuchungen über die Gewinnung von Gesteinen mit einem Hochdruckwasserstrahl unter Wasser. Massenguttransport durch Rohrleitungen. 9. Kolloquium der Universität GH Paderborn, Meschede, Niemcy.
- Mazurkiewicz M., 1977: Niektóre aspekty intensyfikacji obróbki materiałów wysokociśnieniową strugą cieczy. *Prace Naukowe Inst. Techn. Bud. Maszyn Politechniki Wrocławskiej* nr 19, Monografia 9.
- Mellor M., 1972: Some general relationships for idealized jet cutting. *1th International Symp. on Jet Cutting Technology*, Coventry, Anglia.
- Nikonov G.P., Szawłowski C.C., Hynkin W.F., 1967: Исследования условий формирования тонких струй высокого давления в гидравлических резаках новой машины. *Inst. Górn. Dela im. A.A. Skoczynskowo*, Moskwa.
- Nikonov G.P., Kuzmich I.A., Goldin J.A., 1986: Cutting rocks by high-pressure water jets. Nedra, Moscow.
- Nikonov G.P., 1962: Osnovnyje napravlenija sowierszewstwowania gidrawliczeskoj wyjemki górnych poród. *Izd. Gornoje Delo*.
- Pasche E., 1981: Das Schneidverhalten von Höchstdruckwasserstrahlen zur Unterstützung mechanischer Lösevorgänge. *Glückauf-Forschungshefte* vol. 42.

- Rehbinder G., 1978: Erosion resistance of rock. Proc. 4th International Symposium on Jet Cutting Technology, Canterbury.
- Rehbinder G., 1977: Slot cutting in rock with high speed water jet. Int. J. Roch Mech., Min. Sci. Geomech. Abst. vol. 14.
- Rehbinder G., 1980: A theory about cutting rock with water jet. Rock Mechanics vol. 12.
- Summers D., Barker C., 1978: Surface Trials of the Hydrominer, 4th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, Canterbury, England.
- Vašek J., Foldyna J., Hlavač L., 1991: Vysokotlaky vodni paprsek v procesu rozpojovani hornin. Hornicky ustav ČSAV, Ostrava.
- Vašek J., Hlavač Z., 1994: Physical model of a high energy liquid jet for cutting rock. Intern. Journal of Water Jet Technology vol. 2, no 1.
- Vijay M., Brierley W., 1980: Drilling of Rocks With Rotating high Pressure Water Jets: An Assessment of Nozzles. 5th International Symposium on Jet Cutting Technology, Hannover, Niemcy.

REVIEW BY: PROF. DR HAB. INŽ. JERZY ANTONIAK, GLIWICE

Received: 28 April 2003