

Podstawy stosowania wysokociśnieniowej strugi wodnej do rozdrabniania kongrecji polimetalicznych

Basis of high-pressure water-jet use for polymetallic nodule comminution

PRZEMYSŁAW J. BORKOWSKI
JÓZEF A. BORKOWSKI
MICHAŁ BIELECKI
MARIUSZ O. JĘDRYSEK
TOMASZ ABRAMOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.163>

W artykule przedstawiono wyniki badań dwuzabiegowej (mechaniczno-hydrostrumieniowej) metody rozdrabniania kongrecji polimetalicznych. Określono też fizyczne podstawy i możliwości użycia wysokociśnieniowej strugi wodnej do efektywnego rozdrabniania takich kongrecji, wydobywanych z głębokości 4200 m p.p.m.

SŁOWA KLUCZOWE: kongrecja polimetaliczna, rozdrabnianie hydrostrumieniowe, wysokociśnieniowa struga wodna

Two-stage mechanical and hydro-jetting method of polymetallic nodules' comminution are presented in the paper. Physical basis as well as possibilities of high-pressure water jet method for efficient processing of such nodules, extracted from 4200 m below sea level, are given too.

KEYWORDS: polymetallic nodule, hydro-jet comminution, high-pressure water-jet

Zasoby kopaliny lądowej kończą się i zachodzi konieczność poszukiwania bogactw mineralnych we wszechocenie, gdzie ich zawartość może wystarczyć ludzkości na wiele tysięcy lat. Dlatego pod koniec XX w. rozpoczęto intensywne poszukiwania tych bogactw występujących w postaci osadów dennych i złóż podpowierzchniowych. Wyraźny wzrost nakładów inwestycyjnych w tym zakresie doprowadził ostatecznie do zintensyfikowania eksploracji i eksploatacji głębin oceanów. W rozwiniętych krajach wzmożono badania naukowe [8] nad systemami wydobywczymi kongrecji itp. Powstały również specjalistyczne przedsiębiorstwa, wytwarzające oraz stosujące odpowiednie urządzenia [3, 6] i osprzęt [7] technologiczny.

W takie działania ponad trzydzieści lat temu włączyła się – w ramach członkostwa w międzynarodowej organizacji InterOceanMetal – również Polska. Kierownictwo tej organizacji, mające siedzibę w Szczecinie, dysponuje podmorską działką o powierzchni 75 000 km², zlokalizowaną w strefie Clarion-Clipperton, która znajduje się na dnie Pacyfiku, na głębokości 4200÷5200 m, w odległości ok. 1600 km na zachód od Meksyku. Jest to jeden z bardziej perspektywicznych obszarów, w którym na każdy metr kwadratowy powierzchni dna przypada ok. 10 kg kongrecji polimetalicznych. Te kongrecje najczęściej są nieco spłaszczonymi bulami o dość rozwiniętej powierzchni i bardzo wysokiej zawartości takich metali, jak: mangan, kobalt, miedź, żelazo i nikiel. Szacunkowe zasoby zlokalizowane we wspomnianym obszarze wynoszą

prawie 450 mln ton metali, w tym prawie 90 mln ton manganu, 4 mln ton niklu, 3,5 mln ton miedzi i ok. 0,5 mln ton kobaltu [4].

Ponadto pół roku temu Polska dokonała zakupu koncesji poszukiwawczych na 100 działkach o łącznej powierzchni 10 000 km², położonych w obszarze tzw. Ryftu Śródatlantyckiego, pomiędzy Afryką Zachodnią a wschodnim wybrzeżem Meksyku, na stosunkowo niewielkiej głębokości – 1200÷2400 m. Znajdują się tam bogate złoża masowych siarczków polimetalicznych, zawierające metale ziem rzadkich i metale szlachetne. Dzięki tym przedsięwzięciom Polska dołączyła do elitarniej grupy pionierów podmorskich poszukiwań geologiczno-górnictw.

Biorąc pod uwagę sytuację strategiczną oraz światowe dokonania technologiczne, autorzy we własnym zakresie opracowali podstawy stosowania wysokociśnieniowej strugi wodnej do podmorskiego urabiania [1] i wydobywania [2] kongrecji polimetalicznych z dna oceanicznego. Jednak do zintensyfikowania hydropneumatycznego transportu pionowego tych kongrecji konieczne jest ich rozdrobnienie w strefie przydennej.

Celem niniejszego artykułu jest omówienie fizycznych podstaw i możliwości zastosowania wysokociśnieniowej strugi wodnej do rozdrabniania kongrecji polimetalicznych.

Osprzęt, aparatura i warunki badań

Badaniom poddano kongrecje polimetaliczne wydobyte z głębokości ok. 4200 m p.p.m. w części strefy Clarion-Clipperton, należącej do międzynarodowej organizacji InterOceanMetal. Te kongrecje rozdrabniano dwufazowo – wstępnie stosowano kruszarkę szczękową w celu uzyskania nadawy w postaci cząstek o ziarnistości #0,5÷2 mm, które w skonstruowanym młynie hydrostrumieniowym rozdrabniano finalnie z wykorzystaniem energii wysokociśnieniowej strugi wodnej.

Zasadnicze badania efektywności finalnego rozdrabniania hydrostrumieniowego kongrecji polimetalicznych przeprowadzano przy ciśnieniu wody 70, 100, 150 i 200 MPa. Zastosowano dyszę wodną o średnicy $d_w = 0,7$ mm oraz dyszę rozdrabniająco-homogenizującą typu RI₂₋₁ o średnicy $d_h = 2,4$ mm. Odległość wylotu dyszy homogenizacyjnej od tarczy rozdrabniającej wynosiła $s = 10$ mm.

Pomiary efektów rozdrobnienia kongrecji polimetalicznych prowadzono z użyciem laserowego miernika wielkości cząstek Analysette 22 MicroTec Plus, umożliwiającego analizę i sporządzanie rozkładów wielkości cząstek w zakresie 0,08÷2000 µm.

Do oceny kształtu i morfologii cząstek rozdrobnionych kongrecji polimetalicznych wykorzystano mikroskop skaningowy FEI Quanta 200 Mark II, wyposażony w analizator chemiczny EDAX Genesis XM 2i.

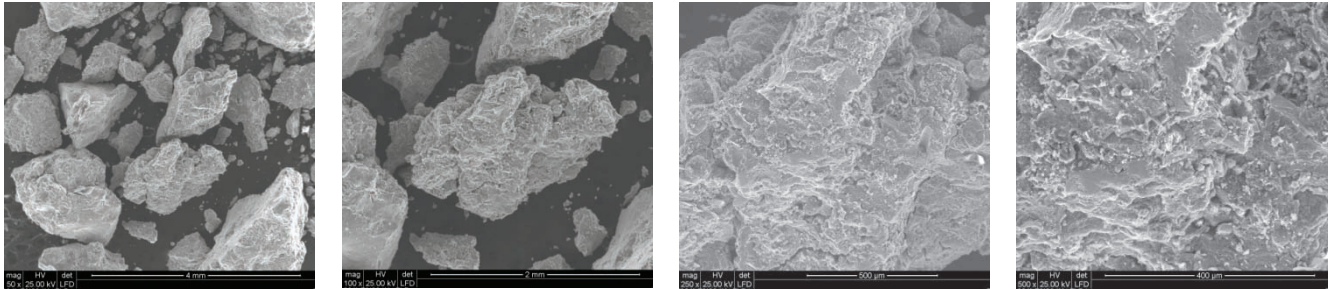
* Prof. dr hab. inż. Przemysław Borkowski (przemyslaw.borkowski@pigi.gov.pl) – Państwowy Instytut Geologiczny PIG-PIB w Warszawie; prof. dr hab. inż. Józef A. Borkowski (josef.borkowski@tu.koszalin.pl), dr inż. Michał Bielecki (michal.bielecki@tu.koszalin.pl) – Politechnika Koszalińska; prof. dr hab. inż. Mariusz O. Jędrysek (mori@jedrysek.eu) – Uniwersytet Wrocławski; dr hab. inż. Tomasz Abramowski, prof. AMS (t.abramowski@am.szczecin.pl) – Akademia Morska w Szczecinie

Hydrostrumieniowe rozdrabnianie kongrecji

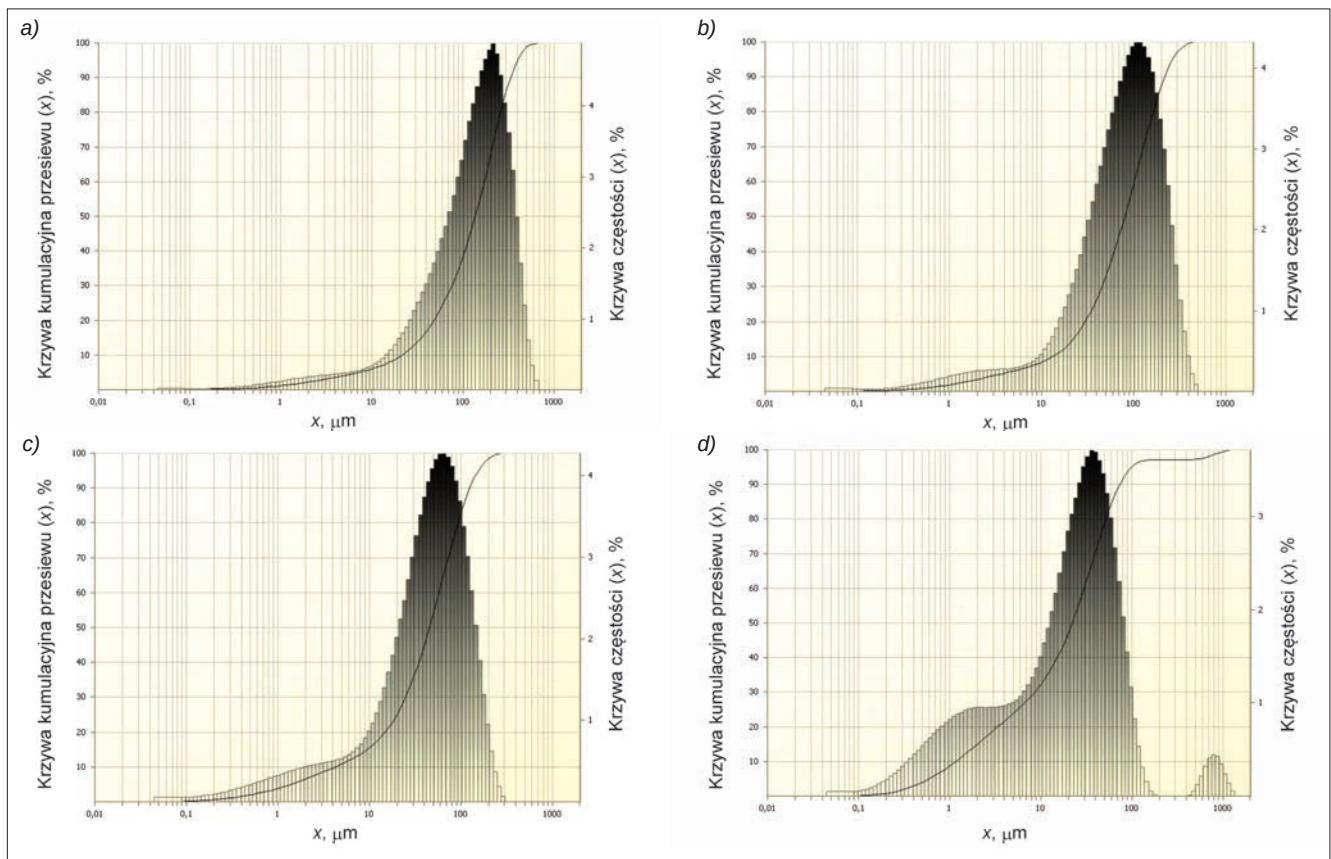
W dwuzabiegowej metodzie rozdrabniania kongrecji polimetalicznych ich wstępne rozkruszanie prowadzono w kruszarce szczękowej z wydajnością 8,49 g/s. Zapewnia ono uzyskanie: ok. 23,8% masy cząstek o wymiarach przekraczających 1 mm, ok. 18,1% masy cząstek o wymiarach $0,7 \div 1$ mm, ok. 14,4% masy cząstek o wymiarach $0,43 \div 0,7$ mm oraz ok. 43,7% masy cząstek najdrobniejszych – o wymiarach poniżej 0,43 mm. Wszystkie te

cząstki (rys. 1) stanowią nadawę do młyna hydrostrumieniowego, w którym następuje ich ostateczne rozdrobnienie wskutek oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodnej.

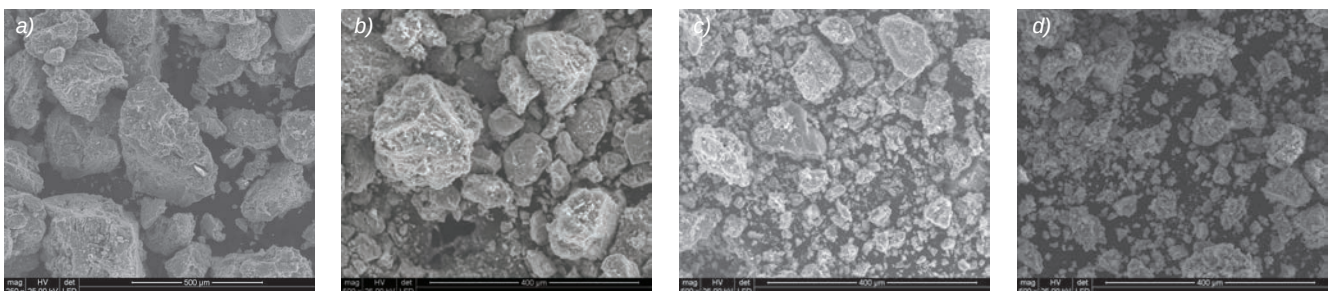
Typowe rozkłady cząstek kongrecji rozdrabnianych w młynie hydrostrumieniowym, do których standardowego sporządzenia wykorzystano miernik Analysette 22 Micro-Tec Plus, przedstawiono na rys. 2. Wzrost ciśnienia strugi wodnej sprzyja intensywniejszemu rozdrabnianiu kongrecji i powoduje wyraźne zwiększenie powierzchni właściwej otrzymywanych cząstek (rys. 3).



Rys. 1. Przykładowe obrazy SEM cząstek kongrecji polimetalicznych (z widokiem rozwinięcia ich powierzchni) rozdrobnionych w kruszarce szczękowej

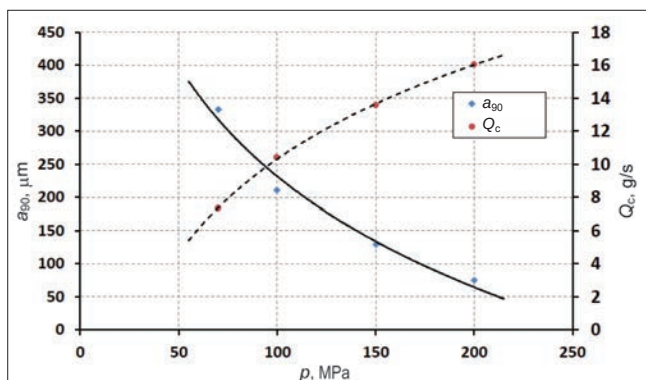


Rys. 2. Przykładowe rozkłady cząstek kongrecji polimetalicznych rozdrobnionych w młynie hydrostrumieniowym przy ciśnieniu strugi wodnej: a) 70 MPa, b) 100 MPa, c) 150 MPa, d) 200 MPa

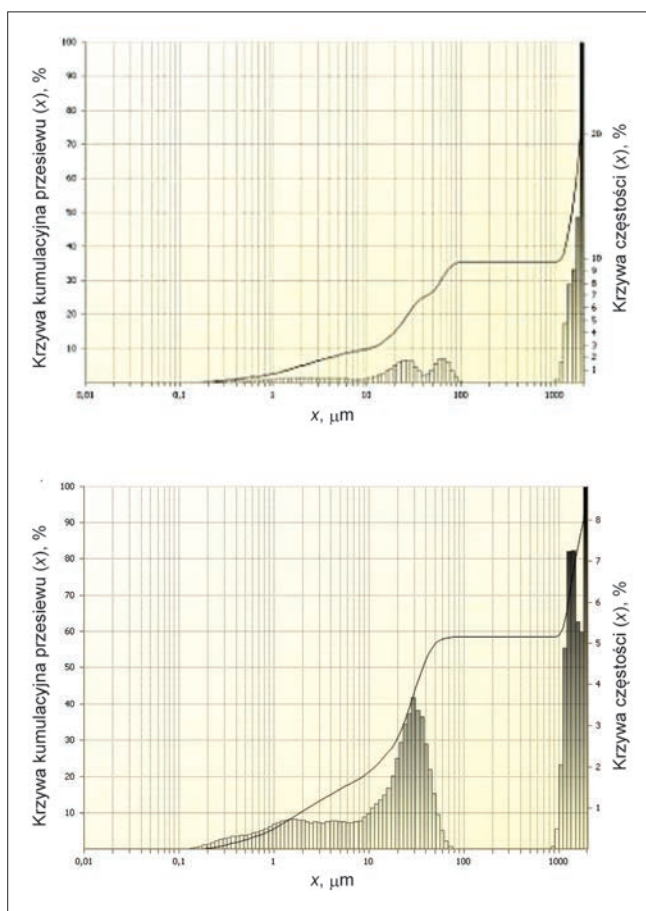


Rys. 3. Przykładowe obrazy SEM kongrecji polimetalicznych rozdrobnionych w młynie hydrostrumieniowym przy ciśnieniu strugi wodnej: a) 70 MPa, b) 100 MPa, c) 150 MPa, d) 200 MPa

Jak wynika z przeprowadzonych badań, w miarę wzrostu ciśnienia strugi wodnej rośnie skuteczność rozdrabniania konkrecji (oceniana na podstawie zmniejszania się wymiarów cząstek uzyskiwanych z hydrostrumieniowego mielenia) oraz wydajność procesu (rys. 4).



Rys. 4. Wpływ ciśnienia strugi wodnej na wielkość cząstek (a_{90}) rozdrobnionych konkrecji i wydajność (Q_c) procesu ich hydrostrumieniowego mielenia



Rys. 5. Specyficzne rozkłady cząstek konkrecji rozdrobnionych w młynie hydrostrumieniowym przy ciśnieniu strugi wodnej 200 MPa

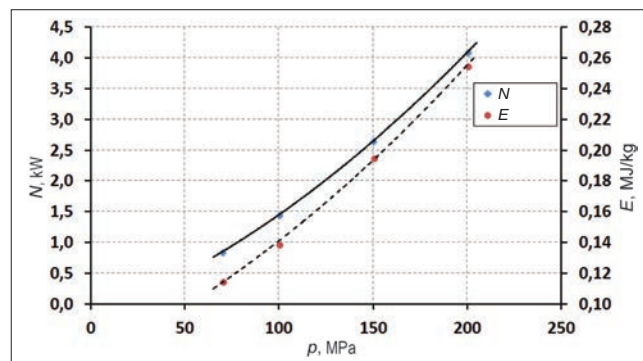
Wytwarzanie tak małych cząstek konkrecji polimetalicznych, rozdrabnianych energią wysokociśnieniowej strugi wodnej, otwiera również nową perspektywę w zakresie ich efektywniejszego hydropneumatycznego transportowania pionowego. W takim transporcie ruch najdrobniejszych cząstek stałych może być skutecznie wspomagany przez bąbelki gazu CO_2 , które – jak wykazano we wcześniejszych badaniach własnych [2] – powstają z częściowej sublimacji granulek suchego lodu CO_2 i osiągają na głębokości dna oceanicznego średnice od 1,7 do 2,1 mm.

Stosunkowo wysoka jakość i wydajność hydrostrumieniowego procesu rozdrabniania konkrecji jeszcze bardziej się poprawia wraz ze wzrostem nominalnego ciśnienia wody. Zwykle też przewyższa wydajność rozdrabniania ich w kruszarce szczękowej (8,49 g/s), z której otrzymuje się przecież znacznie bardziej gruboziarniste cząstki.

Należy jednak zasygnalizować bardzo istotną kwestię, że przy największych stosowanych ciśnieniach (200 MPa) w ponad 20 przypadkach rozkłady cząstek przybierają specyficzne formy przebiegów wielomodalnych – ich typowe przykłady przedstawiono na rys. 5. Świadczy to o tendencji do występowania segregacji dwóch, a niekiedy nawet większej liczby grup rozdrobnionych cząstek, których właściwości mechaniczne powodują wyraźne zróżnicowanie ich odporności erozyjnej. Wstępne rozpoznanie mechanizmu powstawania tego zjawiska jest wspierane także wynikami analiz chemicznych [5]. Ta bardzo ważna kwestia, rzutuująca na możliwość dokonywania wstępnego rozdziału materiałów pozyskiwanych z polimetalicznych konkrecji, wymaga przeprowadzenia obszernych badań specjalistycznych.

Energochłonność procesu rozdrabniania konkrecji

Istotną cechą procesu rozdrabniania konkrecji polimetalicznych są nakłady energetyczne na jego realizację. W celu określenia jego energochłonności przeprowadzono odpowiednie badania – ich wyniki dla przypadku rozdrabniania hydrostrumieniowego przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wpływ ciśnienia strugi wodnej na jej moc (N) i energię jednostkową (E) hydrostrumieniowego rozdrabniania konkrecji

Wyniki te wskazują, że wzrost ciśnienia wody zwiększa moc strugi wodnej i powoduje jeszcze intensywniejsze zwiększenie nakładów jednostkowej energii rozdrabniania konkrecji polimetalicznych. Takie hydrostrumieniowe rozdrabnianie przebiega na ogół ze znacznie większą wydajnością w porównaniu z rozdrabnianiem mechanicznym. Tym niemniej występujące wartości jednostkowej energii rozdrabniania hydrostrumieniowego znacznie przewyższają analogiczną energię wydatkowaną na rozdrabnianie np. w kruszarce szczękowej ($E = 0,04 \text{ MJ/kg}$).

Celowe byłoby połączenie obu wspomagających się metod, aby uzyskać efekt synergii.

Podsumowanie

Szczegółowe analizy wyników badań umożliwiły sformułowanie następujących wniosków:

- Zwiększanie ciśnienia strugi wodnej korzystnie wpływa na skuteczność hydrostrumieniowego rozdrabniania konkrecji polimetalicznych oraz na wydajność procesu takiego mielenia, natomiast jest niekorzystny z punktu widzenia jego energochłonności.

- Porównanie wydajności obu sposobów rozdrabniania kongrecji polimetalicznych potwierdza, że wydajność rozdrabniania hydrostrumieniowego jest na ogół wyższa w porównaniu z mechanicznym rozdrabnianiem w kruszarce szczękowej.
- Podczas rozdrabniania kongrecji polimetalicznych w młynie hydrostrumieniowym powstają przeważnie cząstki charakteryzujące się dość regularnym kształtem izometrycznym. Najbardziej korzystną morfologię uzyskuje się przy ciśnieniu wody równym 150 MPa.
- Najbardziej korzystne efekty rozdrabniania kongrecji polimetalicznych w młynie hydrostrumieniowym uzyskuje się przy ciśnieniu wody równym 150 MPa.
- Hydrostrumieniowa metoda, wykorzystująca wysokociśnieniową strugę wodną do rozdrabniania kongrecji polimetalicznych, jest bardzo obiecująca.
- Obecne rozwiązanie konstrukcyjne uniwersalnego młyna hydrostrumieniowego, zastosowanego w omawianych badaniach, stanowi bazę rozwojową dla budowy różnego rodzaju urządzeń pochodnych, służących do rozdrabniania minerałów w środowisku głębokomorskim.
- Jednym z pilniejszych zadań konstrukcyjnych jest opracowanie synergicznego systemu rozdrabniania kongrecji polimetalicznych, który łączyłby zalety obu wspomagających się metod: mechanicznego i hydrostrumieniowego rozdrabniania materiałów.
- Istnieje potrzeba opracowania takiego systemu oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodnej, który umożli-

wiałby zintensyfikowanie procesu rozdrabniania kongrecji polimetalicznych, a jednocześnie pozwalałby na wstępną segregację składników.

LITERATURA

1. Borkowski P., Borkowski J. "Basis of high-pressure water jet implementation for poly-metallic concretions output from the ocean's bottom". *Annual Set the Environment Protection*. 13 (2011): s. 65–82.
2. Borkowski P., Borkowski J., Jędrysek M. „Podstawy stosowania wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej do wydobywania kongrecji polimetalicznych z dna oceanu”. *Mechanika*. XXXIV, 89, 4 (2017): s. 423–434.
3. Engelman H.E. "Vertical hydraulic lifting of large-size particles – A contribution to marine mining". *The 10th Annual Offshore Technology Conf.* 1978. OTC 3173.
4. Jędrysek M.O. "Deep-ocean exploration of metals ore deposits controlled by the international seabed authority: Selected aspects of the present state and possible mining". *21st WMC & Expo 2008*. London: Taylor & Francis Group, 2008, ISBN 978-0-415-48667, s. 325–328.
5. Mackových D., Lučivjanský P., Pramuka S. "Determination of matrix composition of polymetallic nodules on samples taken in the cruise IOM-2014, including REE and noble elements. Final Report". Inter-OceanMetal Joint Organization. State Geological Institute of Dionyz Stur. Spišská Nová Ves, 2015.
6. Nautilus Minerals Niugini Ltd. Preliminary Economic Assessment of the Solwara Project, Bismarck Sea, PNG. Technical Report compiled under NI 43-101. AMC Project 317045. 2018, s. 273.
7. Saito T. i in. "Dimensionless flow characteristics on air lift pump". *Journal of Jet Flow Engineering*. 12, 3 (1991): s. 36–48.
8. Tindcheng L., Jiling M., Sheng L., Chengliang X. "Simulative analysis for deep seabed mining lifting systems". *International Symposium on New Applications of Water Jet Technology*. Ishinomaki, Japan, 1999, Paper No. H-3, s. 245–254. ■