

Piotr PASIOWIEC¹
Józef BROŻYNA¹
Klaudia BAŃCZYK¹
Jerzy WAJS¹
Barbara TORA²

Kolumny ciśnieniowe w procesie technologicznym wzbogacania uranu

Wprowadzenie

Sita szczelinowe produkowane są w oparciu o metodę zgrzewania elektro-oporowego, która polega na zgrzewaniu profilowanych drutów roboczych do układu nośnych prętów. W wyniku tego powstają mocne sita zdolne do przenoszenia dużych obciążeń.

Sito jest najważniejszym elementem roboczym w filtrach, na którym dokonuje się proces oczyszczania czynnika roboczego. Dlatego też, od właściwego doboru parametrów konstrukcyjnych sita i odpowiednim dobraniu do określonych warunków technologicznych, zależy w dużym stopniu skuteczność prowadzonego procesu filtracji (Blaschke S. i Blaschke W. 1989).

Sita szczelinowe zgrzewane znalazły zastosowanie w filtracji i szeroko pojętych procesach przeróbczych surowców mineralnych. Zadaniem ich w procesie jest uzyskanie wysokiej jakości produktów oraz ochrona urządzeń wchodzących w skład instalacji przed mechanicznymi uszkodzeniami poprzez redukcję zanieczyszczeń w danym czynniku (Pasiowiec i in. 2017; Jonczak i in. 2004).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie zastosowania sit szczelinowych zgrzewanych produkcji Progress Eco w filtrach stosowanych w kolumnach ciśnieniowych SNK w procesie wzbogacania uranu w kopalniach w Kazachstanie.

¹ Progress Eco Sp. z o.o. sp.j., Tuczepy.

² Wydział Inżynierii Ładowej i Gospodarki Zasobami, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; e-mail: tora@agh.edu.pl.

Występowanie uranu

Uran jest metalem ciężkim występującym powszechnie w przyrodzie, nie tylko w skałach ale też w wodzie, roślinach, zwierzętach a także w ciele człowieka. Dla celów przemysłowych największe znaczenie mają bloki skalne z dużą zawartością minerałów uranowych.

Największe złoża rud uranu znajdują się w Australii, Kazachstanie, Rosji, Kanadzie, Nigrze, RPA, Brazylii, Namibii i USA. Światowe zasoby nierozpoznane wynoszą 6 251 800 ton U, co gwarantuje dostawy na kolejne 100 lat ([Rzeczpospolita 2020](#)).

Kazachstan jest największym producentem uranu na świecie, a jego rezerwy są drugie zaraz po Australii. Przewiduje się, że w 2022 roku Kazachstan wyprodukuje, uwzględniając już redukcję wydobycia, 22 tys. ton uranu, czyli o około 2 tys. mniej niż w 2021 roku. Redukcję wydobycia ustalono na początku tego roku, kiedy kazachska państwowa spółka atomowa Kazatomprom uznała, że cena uranu jest za niska i tylko zmniejszając wydobycie, można podnieść ceny uranu na światowych rynkach.

Zakłada się, że globalna produkcja uranu będzie rosła w średnim rocznym tempie wzrostu na poziomie 6,2% w okresie prognozy na 2021–2025, by osiągnąć 65,2 tys. ton w 2025 r. Kazachstan, który posiada jedno z największych na świecie złóż uranu, będzie nadal liderem w zakresie dostaw w okresie najbliższych kilku lat.

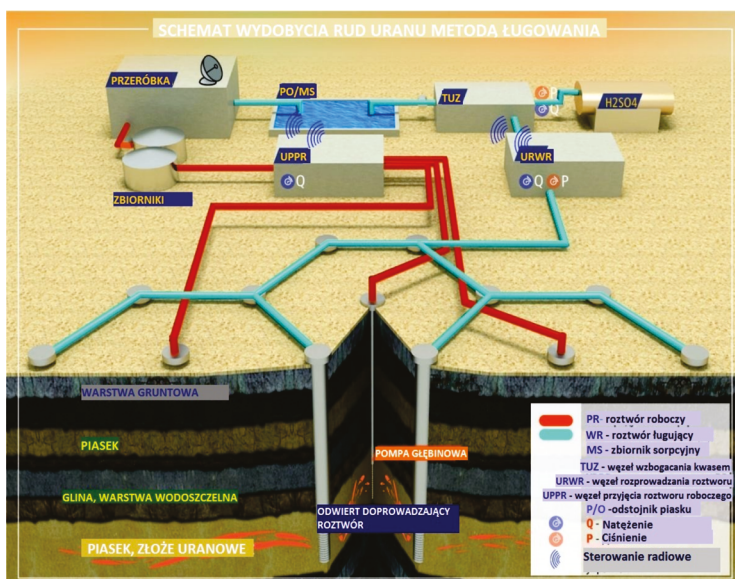
W kopalniach Kazachstanu wydobycie uranu odbywa się z warstw położonych na głębokości od 100 do 300 m, niektóre złoża sięgają do 800 m. Największą w Kazachstanie kopalnią ISL jest Inkai, gdzie uran występuje w wodonośnych piaskowcach na głębokości do 300 m.

Metody wydobycia

Stosowane są trzy główne metody wydobywania uranu:

- ➔ odkrywkowa,
- ➔ głębinowa (system wydobycia podobny do kopalń węglowych),
- ➔ otworowa, inaczej ługowania podziemnego (ISL – *In Situ Leaching*) – polegająca na ługowaniu, upłynnianiu skały i wypompowywaniu roztworu na powierzchnię.

Ruda wydobyta w kopalniach lub odkrywcę musi być poddana wieloetapowej obróbce zanim zostanie z niej wyprodukowane paliwo jądrowe. Pierwszym etapem obróbki po wydobyciu jest kruszenie bloków skalnych, mielenie i ługowanie – w rezultacie otrzymujemy tzw. *yellowcake*, czyli oczyszczony uraninit U_3O_8 . Składa się on w ponad 99% z nierozszczepialnego izotopu U-238 i w mniej niż 1% z rozszczepialnego U-235 (a tylko ten może być wykorzystany jako normalne paliwo jądrowe). Rury szczelinowe stosowane są do wydobyciu uranu metodą ługowania podziemnego, jak również w zakładach wzbogacania uranu (filtry pionowe, poziome i stożkowe). Stosowana metoda otworowa (ISL – *In Situ Leaching*), polega na wpompowaniu pod powierzchnię ziemi substancji ługujących (kwas siarkowy), upłynniających rudę, a następnie wypompowaniu rozpuszczonych minerałów na powierzchnię. W metodzie ISL wierci się sześć odwiertów położonych w wierzchołkach sześciokąta, przez które w wprowadzany jest kwas siarkowy. Pośrodku wiercony jest jeszcze jeden otwór, przez który wypompowywany jest na powierzchnię roztwór nasycony solami uranu.



Rys. 1. Schemat wydobycia uranu metodą otworową ISL

Źródło: <http://promtu.ru/dobyicha-resursovdobyicha-urana-v-rossii-i-mire>

Fig. 1. Scheme of uranium mining using the ISL borehole method

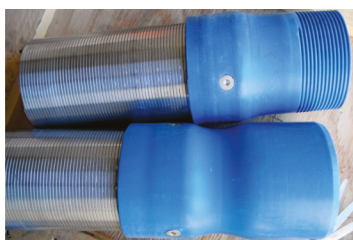
W procesie wydobywania uranu metodą ługowania stosowane są rury z sita szczelinowego zgrzewanego jako filtry. Rury szczelinowe powstają poprzez jednoczesne nawijanie po spirali i zgrzewanie do ułożonych wzdłuż osi rury drutów nośnych specjalnie profilowanych drutów roboczych. Technologia ta pozwala na wykonanie sit szczelinowych do aplikacji, gdzie wymagana jest bardzo duża dokładność szczeliny oraz wysoka wytrzymałość sita. Dzięki zastosowaniu nowoczesnej technologii zgrzewania, można uzyskać dowolne odległości pomiędzy drutami nośnymi i bardzo dokładną i powtarzalną szczelinę.

Typowe długości rur szczelinowych: 5,75 m; 2,8 m.

Szczelina sita cylindrycznego: 0,35 mm.

Średnica sita: około 113 mm.

Filtry zaopatrzone są w końcówki z gwintem zapewniające łączenie kolejnych filtrów w czasie wprowadzania do otworu wydobywczego.



Rys. 2. Filtry szczelinowe stosowane przy wydobywaniu uranu

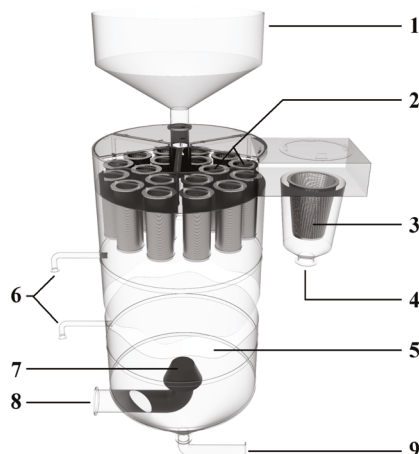
Fig. 2. Slotted filters used in uranium mining

Budowa Sorpcyjnej kolumny naporowej (SNK – Sorpcyjna Kolumna Ciśnieniowa). W kolumnie jest 18 filtrów cylindrycznych oraz 1 filtr stożkowy zabezpieczający znajdujący się poza kolumną.

Z górnego zbiornika (bunkier) do kolumny sorpcyjnej podawana jest żywica jonowymienna. Od dołu kolumny z odwiertu podawany jest pod ciśnieniem nasycony roztwór uranu. Przemieszczając się naprzeciw siebie, żywica i roztwór zawierający uran reagują ze sobą w wyniku czego powstaje zubożony roztwór i nasycony sorbent. Taki sposób prowadzenia procesu jest bardzo skuteczny, ponieważ ciężkie jony uranu grawitacyjnie opadają na dno zbiornika skąd są odprowadzane do dalszej przeróbki. W górnej części zbiornika roztwór filtrowany jest w filtrach z sit szczelinowych (18 filtrów cylindrycznych i jeden filtr stożkowy). Roztwór doprowadzany jest do właściwego stężenia (poza kolumną) koncentracji jonami i dalej podawany jest do odwiertów.

Warunki eksploatacji kolumn SNK i wkładów filtracyjnych:

- ➔ napływ roztworu do filtracji: z zewnątrz do wewnątrz,
- ➔ praca kolumn szeregowo w cyklach: sorpcja/desorpcja i mycie/regeneracja żywicy (z zastosowaniem roztworu),
- ➔ obszar roboczy kolumny wypełniony jest żywicą jonowymienną,
- ➔ filtry zamocowane są w górnej części kolumny służą do przyspieszenia filtracji i zapobieganiu przedostawania się dużej frakcji żywicy jonowymiennej,
- ➔ obiegowa ilość roztworu w kolumnie wynosi 400 m³/h,
- ➔ filtry wytrzymują ciśnienie max 6 bar wynikające z zaślepienia szczelin filtra,
- ➔ materiały filtra przystosowane do specyficznych roztworów stosowanych na zakładzie (żywica oraz skoncentrowany roztwór H₂SO₄, U, Fe²⁺, Fe³⁺, Ca, Cl, pH 1,5–1,7; temperatura od 5 do 50°C),



Rys. 3. Schemat sorpcyjnej kolumny ciśnieniowej (SNK)

1 – zbiornik, 2 – filtry, 3 – kosz zabezpieczający, 4 – wyjście roztworu, 5 – jonit, 6 – odbiór próbek, 7 – rozdzielacz strumienia, 8 – wejście roztworu, 9 – wyjście nasyconego jonitu

Fig. 3. Construction of the Sorption Pressure Column (SNK)

1 – tank, 2 – filters, 3 – safety basket, 4 – solution outlet, 5 – ionite, 6 – collection of samples, 7 – stream divider, 8 – solution input, 9 – saturated ion exchanger output

- materiał filtra szczelinowego: AISI 316L,
- waga netto filtra: konstrukcja powinna być lekka, max do 75 kg,
- graniczna długość filtra: 850 mm,
- średnica zewnętrzna z uwzględnieniem elementów ochronnych: nie więcej niż 460 mm.
- szczelina: 0,300 mm +/- 0.020 mm
- powierzchnia filtracji (prześwit): komplet sit cylindrycznych składający się z 18 sztuk zapewnia przepuszczalność roztworu, bez uwzględnienia oporu żywicy, nie mniej niż 1500 m³/godz.
- pole powierzchni otwartej (prześwit) nie mniej niż 24%.
- drut profilowy zapewnia samooczyszczenie powierzchni filtracyjnej.

Przedstawiona na rysunku 3 kolumna SNK jest to kolumna stacjonarna. Możliwe jest również stosowanie tzw. mobilnych kontenerowych zestawów kolumn SNK do wykorzystywania bezpośrednio na polach wydobywczych uranu. W praktyce w kolumnach stacjonarnych SNK stosowane są filtry posiadające różne wymiary średnica/długość i rozwiązanie konstrukcyjne. Rozwiązanie filtra do kolumny z zastosowaniem sit tkanych przedstawia zdjęcie na rysunku 4. Na konstrukcji nośnej wykonanej z prętów stalowych nawinięte jest sito tkane, uszczelnione przy kołnierzach dla zabezpieczenia przed wypływaniem żywicy jonowymiennej.



Rys. 4. Filtr do kolumny SNK z sita tkanego

Fig. 4. Filter for the SNK column made of woven sieve



Rys. 5. Filtr zabezpieczający stożkowy

Fig. 5. Conical safety filter



Rys. 6. Filtr szczelinowy do kolumny SNK

Fig. 6. Slotted filter for the SNK column



Rys. 7. Warianty wykonania filtrów do kolumny SNK

Fig. 7. Variants of filters for the SNK column

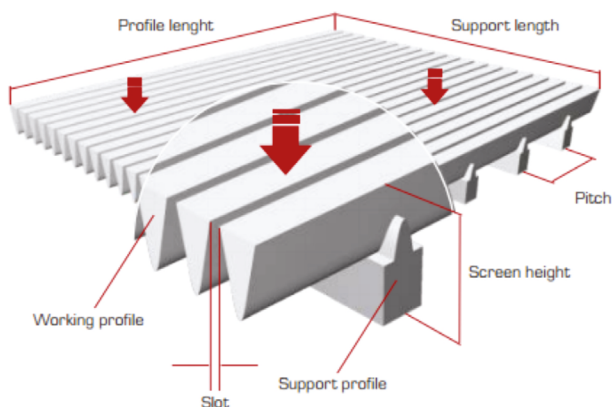
Podstawowe parametry: wysokość części filtracyjnej 700 mm; średnica 426 mm; oczko sita tkanego 0,63 mm; materiał AIS316. Filtry tego typu zastępowane są filtrami z zastosowaniem sit szczelinowych.

Filtry cylindryczne szczelinowe produkcji Progress Eco

Wykonanie filtrów, które spełniałyby wymogi procesu technologicznego zostało poprzedzone obliczeniami na przepustowość oraz wytrzymałość (Pasiowiec 2008). Analiza została wykonana dla medium typu woda. Obliczenia numeryczne wykonano Metodą Objętości Skończonych w oprogramowaniu CFD.

Przeprowadzone obliczenia obejmowały obliczenia oporów hydraulicznych wkładów oraz wytrzymałościowe obliczenia sprawdzające elementów konstrukcji wkładu filtra.

1. Obliczenia oporów hydraulicznych opierały się na analizie map ciśnień wykonanych metodą elementów o skończonej objętości z użyciem licencjonowanego oprogramowania



Rys. 8. Techniczne parametry sita
Źródło: Progress

Fig. 8. Technical parameters of the sieve

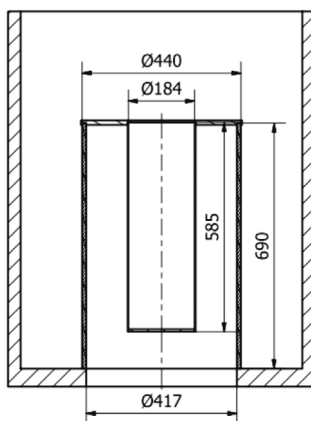
CFD Autodesk Simulation dla modelu wykonanego na bazie konstrukcji wkładu. Zamieszczone wyniki przedstawiały dodatkowo mapę prędkości przepływu czynnika.

2. Metodyka obliczeń wytrzymałościowych elementów ciśnieniowych wkładu filtracyjnego.

a) Metodyka obliczeń wytrzymałościowych sita szczelinowego.

Do obliczeń wytrzymałościowych elementów sita posłużono się wzorami z publikacji *Roark's Formulas for Stress and Strain*.

b) Do obliczeń wytrzymałościowych elementów ciśnieniowych – denka sita zastosowano komercyjne oprogramowanie firmy HEXAGON Visual Vesel Design™ (VVD). Jest to program uznany i stosowany przez jednostki notyfikowane, m.in. przez Urząd Dozoru Technicznego w procedurze oceny zgodności urządzenia ciśnieniowego z wymaganiami zasadniczymi Dyrektywy PED. Program posiada bazę materiałową materiałów dopuszczonych na urządzenia ciśnieniowe według norm EN.



Rys. 9. Geometryczny model cylindrycznego filtra szczelinowego CFD

Fig. 9. CFD geometric model of a cylindrical slotted filter

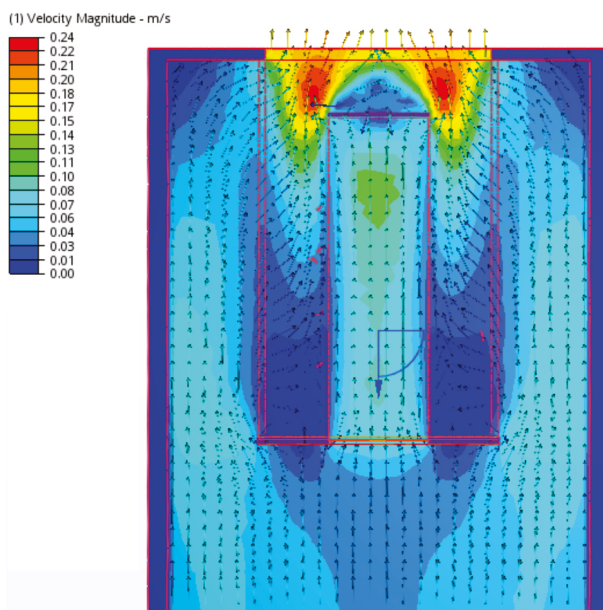
Wyniki symulacji

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wyniki symulacji filtracji na cylindrycznym filtrze szczelinowym – rozkład prędkości przepływu i ciśnienia dla wydatku nadawy $Q_1 = 89 \text{ m}^3/\text{h}$.

Uszkodzenia dotychczas stosowanych filtrów

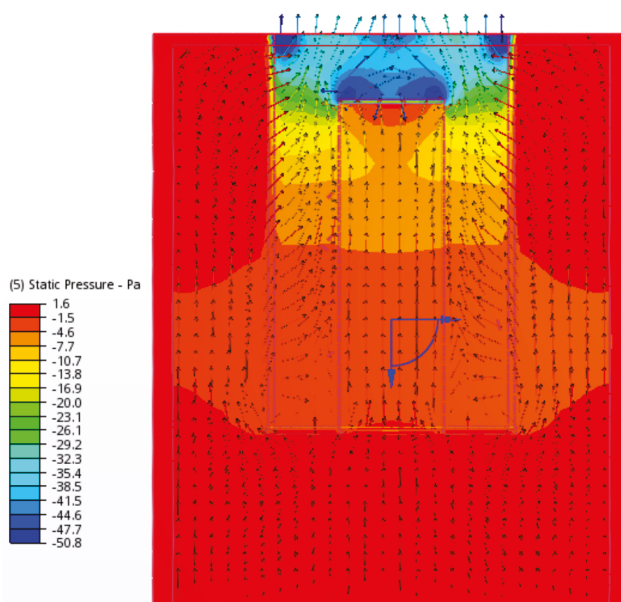
W czasie eksploatacji kolumny SNK może nastąpić zniszczenie filtrów szczelinowych cylindrycznych. Na rysunku 13 przedstawiono typowe uszkodzenia filtrów szczelinowych podczas pracy kolumny.

Uszkodzenie filtra następuje pod wpływem nagłego wzrostu ciśnienia w kolumnie, co przekłada się na powstanie dużej pionowej siły. Powoduje to nie tylko uszkodzenie filtrów,



Rys. 10. Rozkład prędkości przepływu dla wydatku $Q_1 = 89 \text{ m}^3/\text{h}$

Fig. 10. The distribution of the flow velocity for the efficiency $Q_1 = 89 \text{ m}^3/\text{h}$



Rys. 11. Rozkład ciśnienia dla wydatku $Q_1 = 89 \text{ m}^3/\text{h}$

Fig. 11. The distribution of pressure for the efficiency $Q_1 = 89 \text{ m}^3/\text{h}$



Rys. 12. Filtry szczelinowe do kolumn SNK

Fig. 12. Slotted filters for SNK column



Rys. 13. Uszkodzone filtry kolumny SNK

Fig. 13. Damaged SNK column filters

ale może również uszkodzić elementy mocujące kolumnę do fundamentów. W przypadku uszkodzenia filtra(-ów) (rys. 6) konieczna jest ich wymiana na nowe. Charakterystycznym wizualnym objawem uszkodzenia jest pojawianie się w filtrze stożkowym zabezpieczającym (rys. 5), żywicy jonowymiennej. Wymiana filtra związana jest z zatrzymaniem pracy kolumny. Powoduje to straty dla zakładu (spadek wydajności). Zjawisko skokowego wzrostu ciśnienia jest na bieżąco badane, gdyż ma to duże znaczenie dla optymalnego opracowania konstrukcji filtra. Dotychczasowe sposoby wyeliminowania uszkodzeń (deformacji) polegały na wprowadzaniu różnych rozwiązań konstrukcyjnych, zmianie poprzeczki sit szczelinowych, zastosowaniu dodatkowych wzmocnień i wytrzymalszych rodzajów stali.

Podsumowanie

Zapotrzebowanie na energię elektryczną, a co za tym idzie, na surowce energetyczne, będzie wzrastać. Odnawialne źródła energii będą w stanie zaspokoić tylko około połowy przewidywanego wzrostu światowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Dlatego też, co warto jeszcze raz podkreślić, niemożliwe byłoby prowadzenie procesów przerobczych zmierzających do uzyskania odpowiedniej jakości parametrów surowców energetycznych takich jak węgiel, ropa, gaz ziemny i uran bez zastosowania sit szczelinowych zgrzewanych. Zakładany wzrost zapotrzebowania na energię jądrową wpłynie na większą produkcję uranu, a tym samym wykorzystanie filtrów z sit szczelinowych.

Ilość i różnorodność aplikacji przemysłowych sit szczelinowych zgrzewanych sprawiają, że jest to uniwersalny produkt spełniający najwyższe wymagania stawiane najnowocześniejszym materiałom przemysłowym podlegający nieustannemu rozwojowi i doskonaleniu ich konstrukcji. Sita szczelinowe odgrywają kluczową rolę w procesach przerobczych w zapewnieniu najwyższej jakości wzbogacanych surowców.

Literatura

- Blaşchke, S. i Blaşchke, W. 1989. Maszyny i urządzenia w przeróbce kopalni. Sita. *Skrypt uczelniany* nr 1145. Kraków: Wydawnictwo AGH.
- Jonczak i in. 2004 – Jonczak, P., Pasiowiec, P. i Śmiejek Z. 2004. *Technologiczne i ekonomiczne racje istnienia nowych rozwiązań w obszarze stosowania sit produkcji Progress Eco S.A.* [W:] *Nowoczesne systemy przerobcze surowców mineralnych z uwzględnieniem problemów ochrony środowiska*. Gliwice: Komag.
- Materiały reklamowe, prace badawcze i dokumentacje firmy Progress Eco Sp. z o.o. sp.K. [Online] <http://progress-eco.pl/> [Dostęp: 09.09.2021].
- [Online] www.mining.com [Dostęp: 09.09.2021].
- Pasiowiec P. 2008. *Analysis of Work and Optimization of Centrifugal Dewatering Sieve*. Doctoral dissertation, Ostrava.
- Pasiowiec i in. 2017 – Pasiowiec, P., Bańczyk, K., Tora, B., Brożyna, J. i Wajs, J. 2017. *Zastosowanie sit szczelinowych zgrzewanych produkcji Progress Eco w procesach wydobywania i przeróbki węgla kamiennego, ropy naftowej, gazu ziemnego oraz uranu* [W:] *Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych: bezpieczeństwo-jakość-efektywność*. Gliwice: Komag.
- Rzeczpospolita 2020. [Online] <https://www.rp.pl/biznes/art8979421-producenci-uranu-zarabia-na-pandemii> [Dostęp: 02.01.2022].

Kolumny ciśnieniowe w procesie technologicznym wzbogacania uranu

Słowa kluczowe: sita szczelinowe zgrzewane, wzbogacanie uranu, ługowanie w złożu, ISL

Streszczenie: W procesie wzbogacania uranu w kolumnach ciśnieniowych typu SNK stosuje się sita szczelinowe zgrzewane. W rozdziale przedstawiono nowe rozwiązania konstrukcyjne filtrów pionowych wykonanych z sit szczelinowych zgrzewanych produkowanych przez polską firmę Progress Eco sp. z o.o. sp.j. Sita szczelinowe są konsekwentnie modernizowane w celu zapewnienia urządzeniom maksymalnej skuteczności technologicznej, prostej i łatwej obsługi, zmniejszenia awaryjności pracy oraz uzyskania lepszej efektywności ekonomicznej. Sito jest najważniejszym elementem roboczym w filtrach, na którym dokonuje się proces oczyszczania czynnika roboczego. Dlatego też, od właściwego doboru parametrów konstrukcyjnych sita i odpowiednim dobraniu do określonych warunków technologicznych, zależy w dużym stopniu skuteczność prowadzonego procesu filtracji.

Sita szczelinowe są wykorzystywane w wydobywaniu uranu metodą *In Situ Leaching* – ISL – polegającą na ługowaniu rudy ze złoża podziemnego roztworami zasad lub kwasów a następnie wypompowywaniu roztworu na powierzchnię celem dalszego wzbogacania.

Pressure columns in the uranium enrichment process

Keywords: welded slotted sieves, uranium beneficiation, in situ leaching, ISL

Abstract: Slotted welded screens are used in the uranium enrichment process in SNK-type pressure columns. The chapter presents new design solutions for vertical filters made of welded slotted screens, produced by the Polish company Progress Eco sp. z o.o. sp. j. Slotted screens are consistently modernized in order to provide the devices with maximum technological efficiency, simple and easy operation, reducing the failure rate and obtaining better economic efficiency. The sieve is the most important working element in filters, on which the process of cleaning the working medium is carried out. Therefore, the effectiveness of the filtration process depends to a large extent on the proper selection of the construction parameters of the sieve and the appropriate selection for specific technological conditions.

Slotted sieves are used in uranium mining using the In Situ Leaching – ISL method, which consists in leaching ore from the underground deposit with alkali or acid solutions and then pumping the solution to the surface for further enrichment.

