

# WYBRANE ASPEKTY PROCESÓW INŻYNIERII CHEMICZNEJ OD WYDOBYCIA RUD URANOWYCH DO WZBOGACANIA URANU

*Selected aspects of chemical engineering  
processes from the mining of uranium  
to the uranium enrichment*

Monika Małgorzata Szołucha

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wybrane aspekty procesów inżynierii chemicznej znajdujących się na początku cyklu paliwowego, rozpoczynając od wydobycia uranu a kończąc na procesach wzbogacania uranu.

**Abstract:** This paper presents selected aspects of chemical engineering processes applied in early stages of a fuel cycle, begins with the mining of uranium and ends with the uranium enrichment processes.

**Słowa kluczowe:** inżynieria chemiczna i procesowa, energetyka jądrowa, uran, proces wzbogacania uranu, wydobycie uranu

**Key words:** chemical and process engineering, nuclear energy, uranium, uranium enrichment process, mining of uranium

## Wstęp

Dynamiczny rozwój technologiczny współczesnej cywilizacji wiąże się z coraz większym zużyciem energii i zapotrzebowaniem na surowce energetyczne. W praktyce, w energetyce wykorzystywane są głównie naturalne zasoby surowców kopalnych, takie jak, węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny, które według statystyk mogą wyczerpać się za 50 – 150 lat, ostatnio również biomasa, w tym drewno [1]. Znane światowe zasoby uranu powinny wystarczyć na ponad 200 – 300 lat.

W roku 1789 niemiecki chemik Martin Heinrich Klaproth podczas eksperymentów z blendą uranową odkrył i opisał pierwiastek, któremu nadał nazwę uran. Eugene M. Peligot w 1841 roku otrzymał uran w stanie czystym, metalicznym [2]. Uran jest metalem ciężkim, który powszechnie występuje w przyrodzie. Krajami o największej produkcji uranu są: Kanada, Australia, Nigeria, Rosja, Kazachstan, Namibia oraz Uzbekistan. Obecnie tylko Kanada i Australia produkują ponad 50 % światowej produkcji uranu, który może być pozyskiwany metodami konwencjonalnymi i niekonwencjonalnym [3]. Do głównych konwencjonalnych metod pozyskiwania uranu należą: odkrywkowa, głębinowa oraz otworowa *in-situ leaching* (ISL). Rudy uranu po wydobyciu są kruszone, mielone a następnie ługowane [4]. W wyniku przerobu ługu i strąceniu nierozpuszczalnych soli uranylowych otrzymuje się tzw. *yellowcake*

(o niskiej zawartości rozszczepialnego izotopu U – 235, wynoszącej ok. 0,7 %), który jest przedmiotem obrotu handlowego na nowojorskiej giełdzie towarowej NY-MEX [5]. Z powodu niewielkiej zawartości w materiale izotopu uranu podlegającego procesowi rozszczepienia, nie może być on wykorzystywany do produkcji paliwa jądrowego. Materiał ten poddawany jest kolejnym etapom obróbki. Uran może być odzyskiwany również z kwasu fosforowego, roztworu z ługowania rud miedzi oraz popiołu węglowego w Chinach. W Japonii opracowano metodę wydobycia uranu z wody morskiej (3 mg uranu w 1 m<sup>3</sup> wody morskiej). Są to metody niekonwencjonalne pozyskiwania uranu [6].

Czym jest Inżynieria Chemiczna i Procesowa (ang. *Chemical and Process Engineering*)? Według definicji [7]: „Inżynieria chemiczna i procesowa – dyscyplina naukowa, należąca do dziedziny nauk technicznych, która zajmuje się – wraz z technologią chemiczną – projektowaniem i prowadzeniem operacji i procesów jednostkowych, będących elementami procesów produkcyjnych w przemyśle chemicznym. Formułuje ilościowe opisy takich procesów, jak przepływ płynów, przenoszenie masy przez granice faz, przenoszenie energii (np. działanie wymienników ciepła). O inżynierii chemicznej mówi się wówczas, gdy istotnymi elementami procesu produkcyjnego są reakcje chemiczne. W zakres inżynierii chemicznej wchodzi m.in. projektowanie aparatów, urządzeń (np. reaktorów chemicznych,

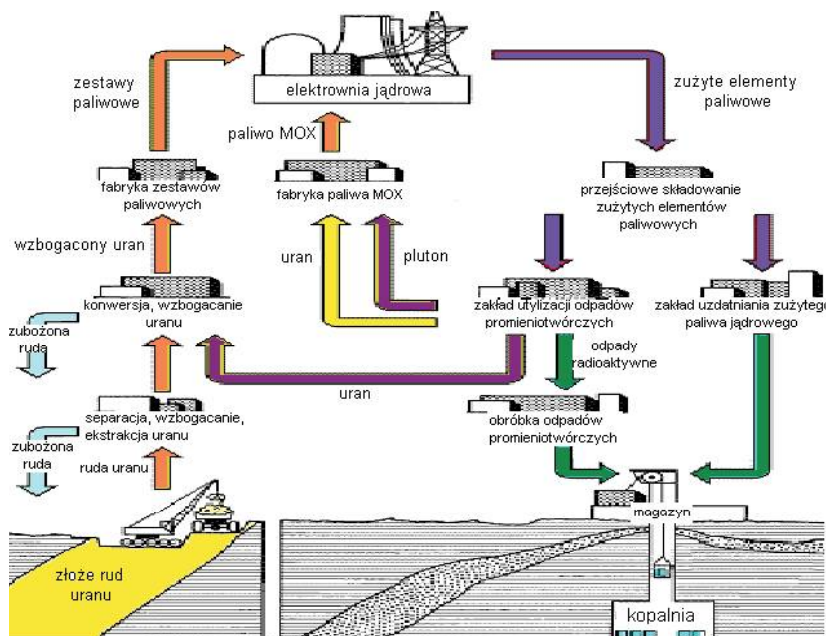
mieszalników lub urządzeń służących do rozdzielania mieszanin związków chemicznych) oraz całych złożonych systemów produkcyjnych (instalacji). Projekty są opracowywane na podstawie wiedzy z zakresu chemii, fizyki, technologii chemicznej, materiałoznawstwa oraz innych nauk podstawowych i stosowanych". Dyscyplina ta ma szerokie zastosowanie w energetyce jądrowej. Zagadnienia inżynierii chemicznej i procesowej wykorzystywane są w całym cyklu paliwowym (od wydobycia uranu do przerobu i składowania odpadów radioaktywnych) oraz w szeroko pojętej eksploatacji reaktora jądrowego („wyspy jądrowej”) oraz „wyspy konwencjonalnej” elektrowni jądrowej.

### Procesy przerobu uranu

W celu produkcji materiału rozszczepialnego uranu należy poddać wielu etapom technologicznym w cyklu

paliwowym (otwartym lub zamkniętym). W cyklu paliwowym otwartym stosowanym, np. w Szwecji, Francji, Kanadzie, wypalone paliwo traktowane jest jako składowany odpad. W cyklu paliwowym zamkniętym (Rys. 1) stosowanym, m.in. we Francji, Rosji, Japonii, sposób prowadzenia gospodarki paliwem wypalonym jest odmienny. Poddawane jest ono procesowi recyklingu. MOX (ang. *Mixed Oxides*), czyli mieszanina tlenku uranu i tlenku plutonu, powstaje z recyklingu 96% uranu i plutonu uzyskanych z paliwa wypalonego po przerobie. Odpady promieniotwórcze (produkty rozszczepienia, pozostałe aktywnowce, produkty powstałe w wyniku aktywacji konstrukcji zestawów paliwowych i materiałów koszulek paliwowych) są następnie utylizowane, kondycjonowane i składowane.

Wybór cyklu paliwowego zależy od typu zastosowanego reaktora jądrowego, rodzaju rud paliworodnych (nuklidów, które mogą być rozszczepialne w wyniku wychwyty neutronu) i rozszczepialnych [8].



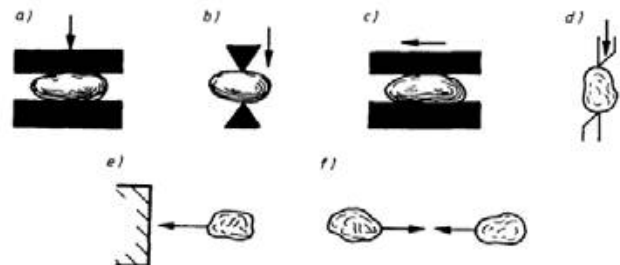
Rys. 1. Zamknięty cykl paliwowy [9]

Fig. 1. The closed fuel cycle [9]

Postępowanie z wydobytą w kopalni rudą uranową za pomocą metody górnictwa głębinowego, prowadzące do otrzymania paliwa jądrowego [8, 10-12]:

### 1. Rozdrabnianie, kruszenie, mielenie bloków skalnych

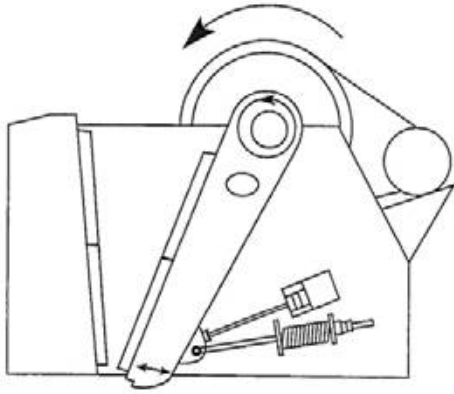
Do wstępnego rozdrabniania, kruszenia dużych bloków skalnych rud, minerałów stosowane są łamacze szczękowe i stożkowe. Głównymi sposobami rozdrabniania (Rys. 2) wykorzystującymi siły nacisku i tarcia są: zgniatanie, rozłupywanie, ścieranie, ścinanie, uderzenie (zderzenie), wzajemne zderzenie.



Rys. 2. Główne sposoby rozdrabniania bloków skalnych: a) zgniatanie, b) rozłupywanie, c) ścieranie, d) ścinanie, e) uderzenie (zderzenie), f) wzajemne zderzenie [12]

Fig. 2. Main ways of a rock block crumbling: a) crumpling, b) riving, c) abrasion, d) truncating, e) thacking, f) impact [12]

Do rozdrabniania dużych bloków skalnych stosowane są sposoby (a,b,c), do średnich i drobnych materiałów skalnych (d,e), natomiast do miękkich ciał stałych (f). W kruszarkach szczękowych (Rys. 3) surowiec wprowadzany jest pomiędzy dwie szczęki: ruchomą i napędzaną mechanizmem mimośrodowym. Stosowane są one zazwyczaj do kruszenia bloków skalnych.



Rys. 3. Łamacz szczękowy [12]  
Fig. 3. Jawbreaker [12]

Średnie i drobne materiały skalne rozdrabniane są za pomocą młynów kulowych, prętowych, strumieniowych lub w rozdrabniarkach młotkowych. Miękkie i włókniste ciała stałe rozdrabniane są w krajalnicach i młynach z wirującymi nożami tnącymi. Głównymi mechanizmami w młynach są zginanie i ścinanie oraz ścieranie i uderzanie. Rys. 4 przedstawia przekrój poprzeczny młyna kulowego.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny młyna kulowego [12]  
Fig. 4. The cross section of a ball mill [12]

Najlepszy efekt rozdrobnienia materiału skalnego uzyskuje się, gdy młyn obraca się z prędkością ( $n$ ) równą [12]:

$$n = (0,65 \div 0,80) \cdot n_c$$

gdzie:

$n_c$  – krytyczna prędkość obrotów zdefiniowana

$$\text{następująco: } n_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r}} \approx \frac{42,3}{\sqrt{D}},$$

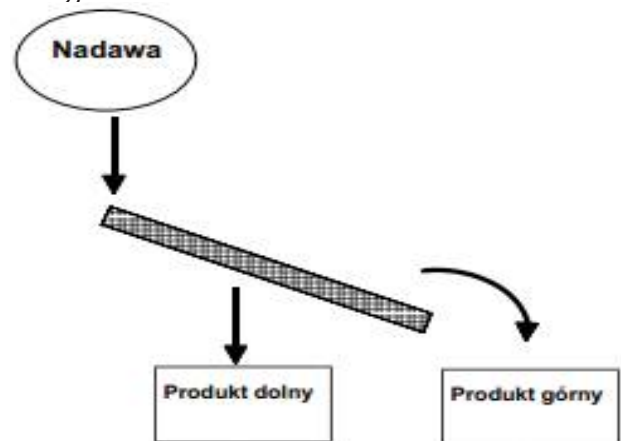
gdzie:  $D$  – średnica bębna [m],  $r$  – promień bębna [m],  $\omega_c$  – prędkość kątowna [rad/s].

## 2. Przesiewanie (klasyfikacja mechaniczna)

Klasyfikację ziaren materiału można podzielić na klasyfikację mechaniczną (przesiewanie) oraz klasyfikację pneumatyczną i hydrauliczną. Przesiewanie to proces klasyfikacji mechanicznej na sitach. Klasyfikacja pneumatyczna polega na rozdziale mieszaniny cząstek stałych na frakcje o poszczególnych rozmiarach ziaren w strumieniu gazu, natomiast klasyfikacja hydrauliczna – w strumieniu cieczy.

### Przesiewanie w skali laboratoryjnej

Do procesu klasyfikacji mechanicznej ziaren materiału używane są zestawy znormalizowanych sit lub urządzenia z zamontowanymi sitami (płaskimi, cylindrycznymi, stożkowymi). W trakcie przesiewania materiału na jednym sicie powstają dwie klasy ziarnowe. Mniejsze ziarna od oczek sita – przechodzą przez otwory, zatem jest to produkt dolny. Ziarna większe od rozmiaru oczka oraz ziarna o rozmiarach identycznych – pozostają na sicie, czyli jest to produkt górny. W celu otrzymania różnych klas ziarnowych surowców i produktów rozdrabniania stosowane są przesiewacze wibracyjne.



Rys. 5. Schemat rozdziału nadawy na sicie [13]  
Fig. 5. The scheme of a feed apportionment on a sieve [13]

### Przesiewanie w skali przemysłowej

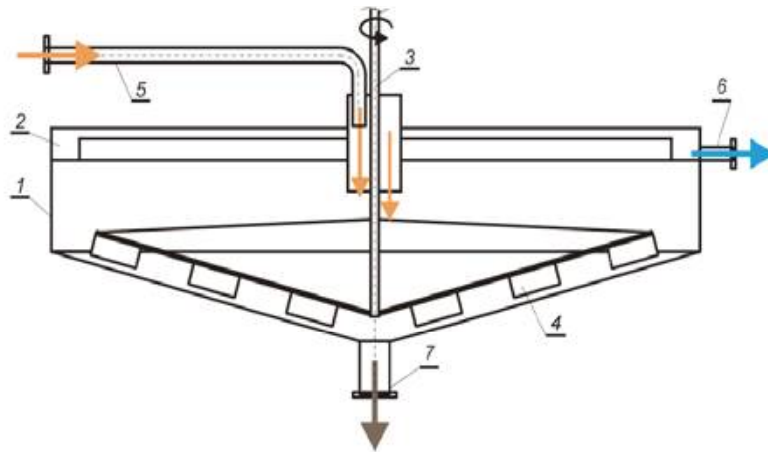
Przesiewacze wibracyjne (eliptyczne, prostoliniowe, kompaktowe, talerzowe) na skalę przemysłową stosowane są do procesów klasyfikacji materiałów na sucho lub mokro [14].

## 3. Oczyszczanie, płukanie, filtrowanie

Ruda uranowa oczyszczana jest roztworami związków chemicznych na bazie amoniaku, sody, tlenu magnezowego, kwasu siarkowego. Oczyszczona ruda następnie jest płukana i filtrowana. Stosowane są, m.in. odwadniacze spiralne, zagęszczacze konwencjonalne,

odwadniacze mechaniczne (prasy rurowe, prasy filtracyjne z płytami pionowymi). Często stosuje się też tzw. osadniki-klarowniki, których działanie opiera się na swobodnym opadaniu cząstek stałych w cieczy. Dzięki temu następuje separacja fazy zagęszczonej (szlamu) od cieczy klarownej. Odстойniki są aparatami typu zbiornikowego o kołowym lub czworokątnym kształcie przekroju poprzecznego. Wyróżniamy odстойniki o działaniu ciągłym, półciągłym i okresowym. Przykła-

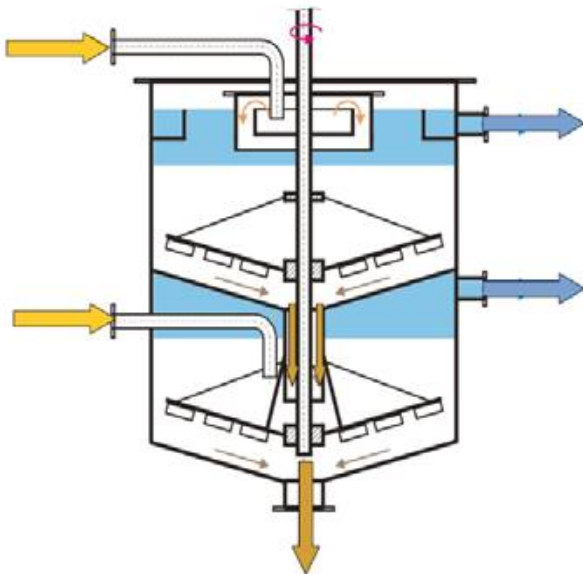
dem aparatu o działaniu ciągłym jest konstrukcja firmy Dorr-Oliver nazywana odстойnikiem Dorra. Jest to aparat cylindryczny z dnem stożkowym o dużym kącie rozwarcia. Zawiesina doprowadzana jest do niego przewodem znajdującym się współosiowo z wałem zgarniaczy, którego wylot znajduje się poniżej górnego poziomu cieczy w odстойniku [15]. Rys. 6 przedstawia schemat jednokomorowego odстойnika Dorra.



**Rys. 6.** Schemat odстойnika Dorra. 1 – zbiornik, 2 – rynna, 3 – wał, 4 – zgarniacz, 5 – dopływ zawiesiny, 6 – odpływ cieczy klarownej, 7 – odpływ szlamu [15]

**Fig. 6.** The scheme of the Dorr settling tank. 1 – tank, 2 – gutter, 3 – shaft, 4 – scraper, 5 – suspension flow, 6 – liquid outflow, 7 – sludge outflow [15]

W celu zwiększenia wydajności zagęszczania oraz lepszego wykorzystania miejsca, budowane są odстойniki wielokomorowe (od 2 do 7 komór o średnicach 3-20 m i wysokościach ok. 2 m). Rys. 7. Przedstawia schemat dwukomorowego odстойnika Dorra o działaniu ciągłym [15].



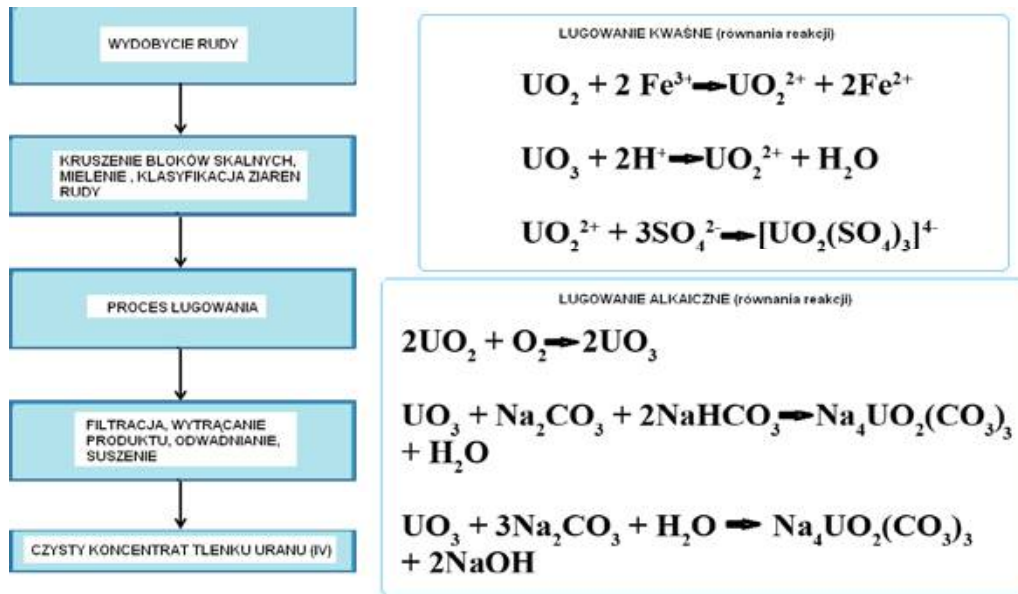
**Rys. 7.** Schemat dwukomorowego odстойnika Dorra o działaniu ciągłym [15]

**Fig. 7.** Scheme of the continuously operating two-chamber Dorr settling tank [15]

## Procesy ługowania

Często miękką masę skalną poddaje się ługowaniu chemicznemu (kwasowemu/zasadowemu) lub biologicznemu. W przypadku ługowania chemicznego, w zależności od składu chemicznego i mineralogicznego ługowanego surowca skalnego, stosowane są różne czynniki ługujące, takie jak: roztwory wodne kwasu siarkowego, kwasu solnego, kwasu azotowego, wodorotlenku sodu, chlorku amonu, chlorku żelaza (III), węglan sodu i węglan amonu. Najbardziej rozpowszechnione jest ługowanie minerałów tlenkowych za pomocą kwasu siarkowego (VI). W przypadku ługowania rud siarczkowych zastosowanie utleniacza jest konieczne ze względu na trudność rozpuszczania się siarczków w wodzie.

Schemat postępowania z wydobytą rudą oraz równania reakcji chemicznych zachodzących w przypadku ługowania kwaśnego (czynnik ługujący: rozcieńczony  $H_2SO_4$  z utleniaczem  $Fe^{3+}$ ) i alkaicznego (czynnik ługujący:  $Na_2CO_3$  z utleniaczem  $O_2$ ) przedstawia Rys. 8.



**Rys. 8.** Schemat postępowania z wydobytą rudą oraz równania zachodzących reakcji chemicznych w przypadku ługowania chemicznego [16]  
**Fig. 8.** The process flow chart of uranium ore and the chemical leaching equations [16]

#### Czynniki ługujące stosowane w procesie ługowania chemicznego uranu

Zastosowane czynniki ługujące (Tabela 1) powinny stosunkowo szybko ekstrahować pożądany metal z łu-

gowanych surowców. Odczynniki powinny być również jak najmniej toksyczne, dobrze rozpuszczalne w wodzie, łatwo dostępne i tanie [17].

**Tabela 1.** Czynniki ługujące stosowane w procesach ługowania chemicznego oraz przykłady zastosowań [17]

**Table 1.** The leaching reagents used to chemical leaching processes and examples of application [17].

Typ czynnika ługującego	Rodzaj czynnika ługującego	Zastosowanie (surowiec mineralny)
kwasy	rozcieńczony $\text{H}_2\text{SO}_4$	tlenki cynku, tlenki miedzi
	rozcieńczony $\text{H}_2\text{SO}_4$ z utleniaczem	siarczki cynku, siarczki niklu, siarczki miedzi, tlenkowa ruda uranowa
	stężony $\text{H}_2\text{SO}_4$	siarczkowe koncentraty miedzi, lateryty
	$\text{HNO}_3$	siarczki molibdenu, siarczki miedzi, siarczki niklu, koncentraty uranowe, tlenki cyrkonu
	$\text{HCl}$	ilmenit, kasyteryt, kamień niklowy
zasady	$\text{NaOH}$	boksyty
	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	szelit, tlenki uranu
	$\text{NH}_4\text{OH}$ z solami amonowymi i $\text{O}_2$	siarczki miedzi, siarczki niklu, zredukowane lateryty (Ni)
sole	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ lub $\text{FeCl}_3$	siarczkowe koncentraty metali nieżelaznych
	$\text{CuCl}_2$	siarczkowe koncentraty metali nieżelaznych
	KCN i powietrze	rudy srebra, rudy złota, odpady miedzi
	$\text{FeSO}_4$ i $\text{O}_2$	siarcezek niklu
woda chlorowa	Woda chlorowa, podchloryny	zredukowane lateryty (Ni), siarczkowe koncentraty niklu, miedzi, cynku, ołowiu, rtęci, molibdenu
woda	$\text{H}_2\text{O}$	rozpuszczalne siarczany, chlorki, wanadany, molibdenu, nadreniany

Wybór stężenia kwasu lub zasady stosowanych w ługowaniu chemicznym oraz temperatury w której prowadzone jest ługowanie zależą od analizy techniczno – ekonomicznej całego procesu. Najbardziej efektywny roztwór ługujący zawiera aniony, które tworzą trwałe, rozpuszczalne kompleksy z kationem uranylowym

( $\text{UO}_2^{2+}$ ). W przemyśle, w celu przekształcenia jonu  $\text{Fe}^{2+}$  w  $\text{Fe}^{3+}$  stosowane są silne związki utleniające, które umożliwiają utrzymanie potencjału redox pomiędzy 400 – 500 mV [3].

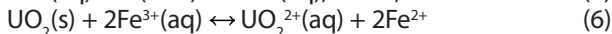
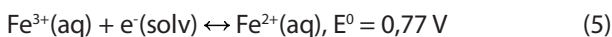
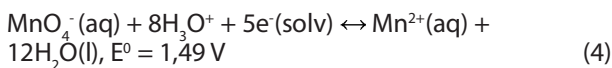
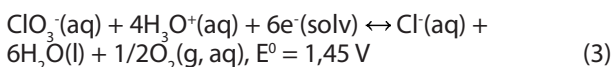
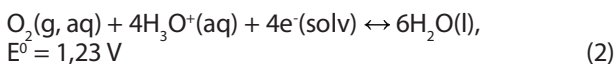
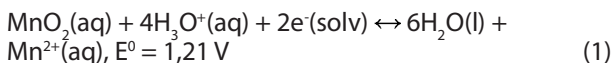
Najczęściej stosowanymi utleniaczami są [3]:

- $H_2O_2$  (30 % cz.d.a.) – stosowany najczęściej ze względu na neutralne, nietoksyczne działanie, brak wprowadzania do roztworu dodatkowych metali, niski koszt
- $H_2SO_5$  (cz.d.a.)
- $NaClO_3$  (cz.d.a.)
- $KClO_3$  (cz.d.a.)
- $MnO_2$  (cz.d.a.)
- $KMnO_4$  (cz.d.a.).

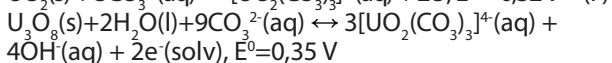
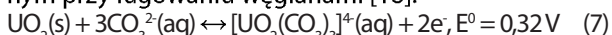
Zastosowanie środka utleniającego powoduje większą wydajność procesu ługowania. Za pomocą utleniacza  $Fe^{2+}$  jest utleniane do  $Fe^{3+}$ , które następnie utleniają nierozpuszczalną formę uranu  $U^{4+}$  do  $U^{6+}$  – dobrze rozpuszczalnej.

Potencjały redox poszczególnych utleniaczy w środowisku kwaśnym i alkaicznym przyjmują różne wartości. Utlenianie nierozpuszczalnej formy uranu do rozpuszczalnej w środowisku alkaicznym zachodzi w bardziej skomplikowany sposób, niż w środowisku kwaśnym.

Potencjały redox utleniaczy stosowanych do pośredniego utleniania uranu w rudzie w środowisku kwaśnym [18]:



Potencjały reakcji pomiędzy różnymi związkami uranu oraz jonami węglanowymi w środowisku alkaicznym przy ługowaniu węglanami [18]:



#### Czynniki wpływające na proces ługowania chemicznego uranu

W celu uzyskania wysokich wydajności ekstrakcji metali z surowca, niezależnie od sposobu realizacji procesu ługowania, czynniki wpływające na proces należy utrzymać na optymalnym poziomie.

Czynniki wpływające na proces chemicznego ługowania uranu:

- Stężenie i rodzaj czynnika ługującego
- Substancje utleniające
- Temperatura roztworu ługującego
- pH roztworu ługującego

- Potencjał redox (oksydacyjno – redukcyjny) roztworu ługującego
- Stężenie  $O_2$  i  $CO_2$  w roztworze ługującym
- Objętość roztworu ługującego
- Rodzaj, mineralogia i rozmiar ziaren ługowanej rudy.

#### Metody ługowania biologicznego uranu

Bioługowanie jest efektywnym i prostym procesem biotechnologicznym zachodzącym przy udziale mikroorganizmów, który polega na przekształceniu nierozpuszczalnych metali z siarczkowych rud i minerałów w formy rozpuszczalne w wodzie [19]. Proces bioługowania może zajść w sposób efektywny tylko wtedy, gdy w przestrzeni międzyfazowej cząstki rudy – komórki bakterii są związki organiczne. Komórki bakterii muszą również przylegać do hydrofobowej powierzchni z ładunkiem ujemnym cząstek rudy. Powierzchnia komórek bakterii jest hydrofilowa niezależnie od potencjału na ich powierzchni.

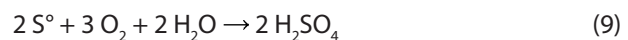
#### Mikroorganizmy stosowane w procesie bioługowania uranu

W procesie bioługowania rud siarczkowych najczęściej stosowane są bakterie siarkowe *Thiobacillus thiooxidans* oraz *Thiobacillus ferrooxidans*. Do bioługowania niesiarczkowych rud oraz minerałów stosowane są bakterie heterotroficzne, drożdże, np. *Rhodoturula* oraz fungi, np. *Penicillium* [19].

Mikroorganizmy z rodzaju *Thiobacillus* mogą być wyizolowane z bogatych w żelazo i siarkę wód powierzchniowych, wód kopalni (siarki, chalkopiryty, piryty). Najaktywniejsze w procesie bioługowania są **mikroorganizmy wyizolowane z otoczenia złożeń rudy** [20].

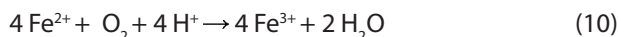
W 1922 roku wyizolowano Gram – ujemne, aerobowe bakterie *Thiobacillus thiooxidans*. Bakterie są pałeczkami o rozmiarach  $0,5 - 0,8 \mu m \times 1 - 2 \mu m$  z jedną polarną spiralną rzęską. *Thiobacillus thiooxidans* są chemoautotofami (produkują związki organiczne wykorzystując energię chemiczną z utleniania związków nieorganicznych). Z punktu widzenia biohydrometalurgii, mikroorganizmy chemolitotroficzne jako źródło energii wykorzystują różnice w potencjałach redox między  $(Fe(II)/Fe(III))$  i  $(O_2/H_2O)$  lub  $(S^0/SO_4^{2-})$  i  $(O_2/H_2O)$  [3]. W warunkach optymalnej temperatury i pH, egzotermiczny proces utleniania siarki elementarnej do kwasu siarkowego (VI) i jej związków zachodzi bardzo szybko.

Proces utleniania siarki elementarnej do kwasu siarkowego (VI) zachodzi zgodnie z poniższym równaniem reakcji [19, 21]:



Niewielkie ilości siarki mogą gromadzić się w ścianach komórkowych bakterii [19]. Kwas siarkowy (VI) (produkt uboczny metabolizmu bakterii) często powoduje, np. korozję rur.

W 1947 roku wyizolowano bakterie *Thiobacillus ferrooxidans*. W warunkach optymalnej temperatury i pH, egzotermiczny proces utleniania jonów żelaza (II) do żelaza (III) oraz zredukowanych związków siarki zachodzi trochę wolniej w porównaniu z kinetyką bakterii *Thiobacillus thiooxidans*. Proces utleniania jonów żelaza (II) do żelaza (III) zachodzi zgodnie z poniższym równaniem reakcji:



Bakterie powodują powolne uwalnianie siarczanów i fosforanów, więc są użyteczne w nawożeniu gleby. Najczęściej występują w odpadach górniczych, kopalniach (pokrywają ściany kopalń, żyją w bogatej w żelazo wodzie i ściekają z wysokich skarp) [22].



Fot. 1. Bakterie żelazowe na terenie Sipsey Wilderness w Parku Narodowym William B. Bankhead w Alabamie, USA [23]

Photo 1. The iron bacteria in Sipsey Wilderness in the William B. Bankhead National Forest in Alabama, United States [23]

Najczęściej w procesie biolugowania rud, odpadów poflotacyjnych, szlamów galwanicznych stosowane są konsorcja bakteryjne. Egzotermiczny proces utleniania

powoduje wzrost temperatury wewnątrz rudy powyżej optymalnej nawet do 80°C. W celu zapewnienia warunków do prawidłowego wzrostu kultur bakteryjnych (*Thiobacillus thiooxidans* lub *Thiobacillus ferrooxidans*), stosowane są dodatkowo termofilne bakterie *Acidians brierleyi* lub *Sulfolobus acidocaldarius* [19].

Bakterie *Thiobacillus ferrooxidans* w mechanizmie pośrednim powodują utlenianie jonów żelaza (II) do żelaza (III), zatem są biokatalizatorami, które powodują, iż reakcja utlenienia zachodzi ok. 10<sup>6</sup> razy szybciej niż w warunkach sterylnych. W przypadku bakterii *Thiobacillus thiooxidans* utrzymanie optymalnego pH zapewnia odpowiednią ilość jonów żelaza (III) w roztworze. Stosując w procesie biolugowania kultury bakterii *T. ferrooxidans* i *T. thiooxidans* (przy założeniu zachodzących równocześnie mechanizmów ługowania pośredniego i bezpośredniego) można zapewnić najbardziej optymalne warunki prowadzenia procesu oraz skrócić jego czas trwania [19].

#### Porównanie ługowania chemicznego i biologicznego uranu

W metodach chemicznych (najczęściej stosowane: kwaśna i alkaliczna) ruda ługowana jest za pomocą związków chemicznych, często z dodatkiem substancji utleniającej. W metodzie biolugowania, zamiast związków chemicznych stosowane są wyselekcjonowane szczepy bakterii lub konsorcja bakteryjne.

Tabela 2. Porównanie ługowania kwaśnego, alkalicznego i biolugowania [3, 24]

Table 2. The comparison of acid, alkaline and biological leachings [3, 24].

Ługowanie kwaśne	Ługowanie alkaliczne	Biolugowanie
Stosowane najczęściej w skali przemysłowej	Stosowane najczęściej w skali przemysłowej	Stosowane często zarówno w skali laboratoryjnej, jak i przemysłowej; opracowywane są nowe usprawnienia (automatyzacja, prosta kontrola) różnych rozwiązań technologicznych (bioreaktorów, stosów, zwalów, kadzi)
Stopień wyekstrahowania uranu wynosi 70 – 90 %, ekstrakcja U jest bardzo szybka w porównaniu z biolugowaniem	Bardzo wysoka selektywność procesu	Bardzo wysoka selektywność procesu
Instalacja do procesu ługowania kwaśnego musi być wykonana z materiałów antykorozyjnych	Ekstrakcja U jest wolniejsza w porównaniu z ługowaniem kwaśnym; możliwe jest ługowanie rud o wysokiej zawartości węglanów	Stopień wyekstrahowania uranu wynosi 50 – 98 %, ekstrakcja U jest wolniejsza w porównaniu z ługowaniem chemicznym
Nie jest wymagane dodawanie utleniaczy	Instalacja do procesu ługowania alkalicznego nie musi być wykonana z materiałów antykorozyjnych	Instalacja do procesu biolugowania nie musi być wykonana z materiałów antykorozyjnych
Procesowi towarzyszy emisja szkodliwych gazów	Dodawanie utleniaczy i kwasów jest wymagane	Nie jest wymagane dodawanie utleniaczy; nadmiar kwasu w metodzie ISL musi być neutralizowany
Brak ograniczeń klimatycznych	Procesowi towarzyszy emisja szkodliwych gazów	Brak emisji szkodliwych gazów (dwutlenku siarki, związków arsenu i rtęci)
Ługowana ruda musi mieć porowatość równą 40 – 70% całej objętości rudy	Brak ograniczeń klimatycznych	Brak ograniczeń klimatycznych
Wymagane jest zagospodarowanie odpadów z zachowaniem przepisów ochrony środowiska	Ługowana alkalicznie ruda musi mieć większą porowatość niż w przypadku ługowania kwaśnego	Ługowana biologicznie ruda musi mieć większą porowatość niż w przypadku ługowania chemicznego
Istnieje możliwość odzyskiwania produktów ubocznych ługowania	Wymagane jest zagospodarowanie odpadów z zachowaniem przepisów ochrony środowiska	Wymagane jest zagospodarowanie odpadów zachowaniem przepisów ochrony środowiska
Proces ma duże wymaganie energetyczne, wysokie główne koszty procesu (duże zużycie kwasu w przypadku ługowania rud węglonośnych)	Proces ma duże wymaganie energetyczne, niższe główne koszty procesu w porównaniu z ługowaniem kwaśnym	Proces ma duże wymaganie energetyczne, wysokie główne koszty procesu

## Techniki procesu ługowania uranu

Hydrometalurgia i pirometalurgia tworzą dział metalurgii ekstrakcyjnej. W hydrometalurgii odzysk metali zachodzi zazwyczaj w roztworach wodnych w temperaturze  $\leq 100$  °C. W odróżnieniu od hydrometalurgii, w pirometalurgii, ekstrakcja metali z surowców mineralnych zachodzi w piecach w temperaturze  $> 100$  °C. W procesach hydrometalurgicznych zużywana jest mniejsza ilość energii. Procesy te mogą również być stosowane do chemicznego odzyskiwania metali, soli metali i innych związków z surowców ubogich w ten pierwiastek (rud, koncentratów, odpadów, półproduktów). Techniki ługowania stosowane w procesach hydrometalurgicznych można podzielić na ługowanie perkolacyjne i ługowanie z mieszaniem.

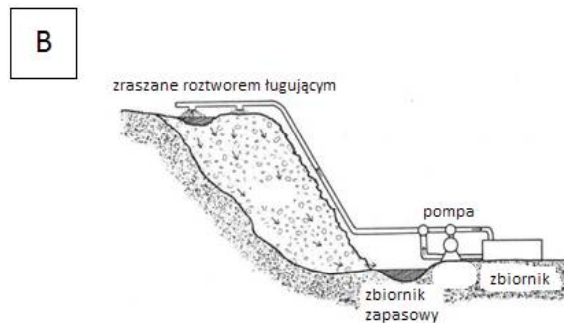
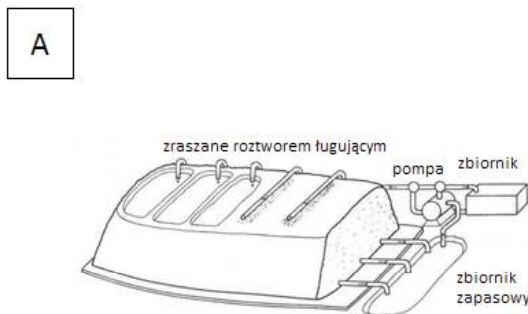
### Techniki ługowania stosowane w procesach hydrometalurgicznych [25]:

#### 1) Ługowanie perkolacyjne

Podczas ługowania perkolacyjnego następuje przepływ laminarny roztworu ługującego przez nieruchome złożone surowca mineralnego.

##### a) Ługowanie w złożu (*in situ leaching, ISL*)

Ługowanie ISL stosowane jest w przypadkach, gdy eksploatacja górnicza jest znacznie utrudniona lub nie-



Rys. 9. Wybrane techniki ługowania uranu; A – ługowanie na hałdzie, B - hałda na zboczu [26]

Fig. 9. Selected techniques of the uranium leaching; A – heap leaching, B – dump leaching [26]

##### d) Ługowanie w zbiornikach (kadziach)

Ługowanie nieruchomego złoża zachodzi w zbiornikach z perforowanym dnem. Powietrze i roztwór ługujący przepływają przeciwnie przez złożone. Proces ten stosowany jest często do ługowania rud bogatych, m.in. spiekanej blendy cynkowej, siarczkowych rud miedzi.

##### e) Ługowanie w kolumnach (perkolatorach)

W CSIR - National Metallurgical Laboratory w Indiach prowadzono badania procesów bioługowania uranu oraz ługowania chemicznego uranu z rud apatytowych ( $\sim 0,047\%$   $U_3O_8$ ) z kopalni Narwapahar (Indie) w kolumnach z wypełnieniem. Trzy kolumny były wypełnione 2 kg rudy (ułożonej frakcjami, kolejno góra

możliwa. Ługowane są zazwyczaj rudy ubogie (surowce będące poza złożem) lub złoża pozabilansowe rud (surowce będące w złożu na miejscu). W celu regeneracji czynnika ługującego stosowane jest powietrze lub bakterie *Thiobacillus ferrooxidans*.

##### b) Ługowanie na hałdach (*heap leaching*)

Ługowanie na hałdach (Rys. 9) stosowane jest zazwyczaj do wyekstrahowania metali z ubogich w ten pierwiastek surowców transportowanych do miejsca ługowania, odpadów usypanych w hałdy. Jest to proces o niskich kosztach operacyjnych, ponieważ nie jest wymagana jednolita struktura i rozdrobnienie ługowanej rudy. Hałda jest zraszana czynnikiem ługującym, który powoduje przedostanie się metali ze złoża rudy do roztworu ługującego. W celu wydzielenia metali z roztworu ługującego stosowane są takie procesy, jak: ekstrakcja i elektroliza lub cementacja żelazem. W celu regeneracji czynnika ługującego stosowane są bakterie *Thiobacillus ferrooxidans*.

##### c) Ługowanie na zwałowiskach (*dump leaching*)

Proces ługowania na zwałowiskach (Rys. 9) jest bardzo podobny do ługowania na hałdach. Ługowanie na zwałowiskach zachodzi jednak bezpośrednio w miejscu złoża.

i dół kolumny:  $< 150$   $\mu\text{m}$ : 100 g, 5 mm – 9 mm: 1,9 kg). Warunki prowadzenia procesów: pH = 1,7; 10 l roztworu ługującego (10% obj. inokulum); przepływ roztworu ługującego w układzie 3 l/h; codzienne napowietrzanie roztworu przez 5 minut. W dwóch kolumnach prowadzone było bioługowanie (w jednej użyto *A. ferrooxidans*, w drugiej *L. ferrooxidans*), zaś w trzeciej ługowanie chemiczne za pomocą  $H_2SO_4$  i utleniacza  $MnO_2$ . W ciągu 40 dni uzyskano stopień wyekstrahowania uranu, kolejno: 57%, 66%, 39% [27].

#### 2) Ługowanie z mieszaniem

Podczas ługowania z mieszaniem następuje wymuszone, turbulentyne mieszanie roztworu ługującego z surowcem mineralnym.



## a) Ługowanie w zawieszynie

Ługowanie w zawieszynie zachodzi w zamkniętych lub otwartych reaktorach z mieszaniem pneumatycznym lub mechanicznym.

W CSIR-National Metallurgical Laboratory w Indiach prowadzono badania procesu bioługowania uranu z rud apatytowych z kopalni Narwapahar (Indie) w 2 l bioreaktorze z mieszaniem mechanicznym. Zastosowano kultury bakterii *A. ferrooxidans* i *L. ferrooxidans*, rudę o średnicy ziaren < 45 μm. W warunkach prowadzenia procesu: pH = 2, T = 35 °C, obroty mieszadła 150 rpm. W ciągu 5 dni uzyskano stopnie wyekstrahowania uranu: 57 % i 63 % [27].

## b) Ługowanie ciśnieniowe

Ługowanie ciśnieniowe metali z rud lub koncentratów flotacyjnych zachodzi pod wysokim ciśnieniem (do ok. 50 bar) i w wysokiej temperaturze (nawet do 250 °C)

w reaktorach ciśnieniowych (autoklawach) z mieszaniem mechanicznym lub parowym. Dla procesów ługowania nie wymagających utleniaczy, ługowanie zachodzi bez użycia tlenu. W przypadku procesów, które wymagają utleniaczy, ługowanie zachodzi w obecności tlenu.

## c) Spiekanie ługujące

Proces spiekania ługującego surowców mineralnych zachodzi w piecach obrotowych, warnikach, mieszarkach w temperaturze ok. 200 °C. Po zestaleniu surowców prowadzone jest następnie ługowanie wodą. Spiekanie ługujące stosowane jest zazwyczaj tylko w przypadkach, gdy ługowanie innymi technikami nie jest możliwe.

Przegląd warunków i urządzeń stosowanych w różnych technikach ługowania przedstawia Tabela 3.

**Tabela 3.** Przegląd warunków i urządzeń stosowanych w technikach ługowania [25]

**Table 3.** Overview of conditions and devices used to leaching techniques [25]

Technika ługowania	T, °C	p, kPa	Sposób mieszania	Materiał	Czas	Stosowane urządzenia	Przykłady zastosowań
ISL	Otoczenia	Normalne	Brak	Bryły	Lata	Nie wymagane	Miedź, uran
Na hałdzie	Otoczenia	Normalne	Brak	Bryły	Miesiące	Nie wymagane	Miedź, uran, złoto
W nieruchomym złożu	Otoczenia	Normalne	Brak	Piaski	Dni	Zbiorniki (kadzie) z perforowanym dnem, kolumny	Miedź, uran, złoto
W zawieszynie z mieszaniem	< 100	Normalne	Mechaniczne, sprężone powietrze	Drobne ziarna	Godziny	Ługowniki Pachura, mieszalniki Dorr'a	Miedź, złoto, ZnO, fosfaty
spiekanie	ok. 200	Normalne	Brak	Drobne ziarna	Godziny	Warniki, mieszalniki, piece obrotowe	Szlamy anodowe, piaski monocytowe, ilmenit

### Procesy po ługowaniu

Kolejno rozdziela się wylugowaną fazę stałą. Najczęściej stosuje się wielostopniową filtrację z przeciwnym obmywaniem osadu oraz przeciwną dekantację z myciem (repulsacją).

Wielostopniowa filtracja z przeciwnym obmywaniem osadu nie wymaga znacznych objętości roztworów do przemywania. Charakteryzuje się dużą wydajnością oraz możliwością zastosowania do zawiesin o znacznym zagęszczeniu fazy stałej.

Przeciwną dekantację z myciem stosowana jest głównie do rozdzielenia zawiesin o niewielkim zagęszczeniu, zwłaszcza gdy ziarna rudy szybko osadzają się lub łatwo ulegają flokulacji w wyniku dodawania odpowiednich flokulantów. Dekantację prowadzi się

w zagęszczaczach. Powstaje klarowny roztwór i zawiesina o znacznym zagęszczeniu, która następnie może być filtrowana.

Filtracja jest najbardziej uniwersalną metodą rozdziału faz. Metody perkolacyjne mają ograniczone zastosowanie, jednak są łatwiejsze do przeprowadzenia niż w reaktorze z mieszaniem. W ługowaniu perkolacyjnym rozdział faz zachodzi wskutek swobodnego przepływu roztworu przez warstwę ługowanego surowca. Przy wyborze metody rozdziału faz należy wziąć pod uwagę kilka czynników, m.in.: skalę operacji, zawartość składników użytecznych w fazie stałej, masę fazy stałej przeznaczonej do operacji rozdziału faz, zdolność do sedymentacji ługowanej zawiesiny, koszt i dostępność urządzeń [28].

#### 4. Wytrącanie, zagęszczanie i filtrowanie osadu, spiekanie rudy uranowej

W metodzie górnictwa głębinowego wydobycia uranu następnie osad jest wytrącany, zagęszczany i filtrowany w wirówce. W wyniku spiekania w piecach otrzymywany jest oczyszczony uraninit  $U_3O_8$ , tzw. *yellowcake* o zawartości powyżej 99% U-238 i poniżej 1% U-235. Do celów energetycznych  $U_3O_8$  należy wzbogacić z niskiej zawartości izotopu U – 235 wynoszącej ok. 0,7% do ok. 3 – 5%. Jedynie reaktory jądrowe ciężkowodne CANDU (*Canadian Deuterium Uranium*), ze względu na zastosowanie ciężkiej wody jako moderatora i chłodziwa, nie wymagają wzbogacenia uranu.



Fot. 2. „Żółte ciasto” (ang. *yellowcake*) [29]

Photo 2. *Yellowcake* [29]

Jakość procesu spiekania rudy uranowej w celu usunięcia zanieczyszczeń (pyły lotne, chlorowane związki organiczne,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , HCl, HF, metale) zależy od zawartości wilgoci materiału, strumieni dostarczanego powietrza i produktów niecałkowitego spalania (w po-

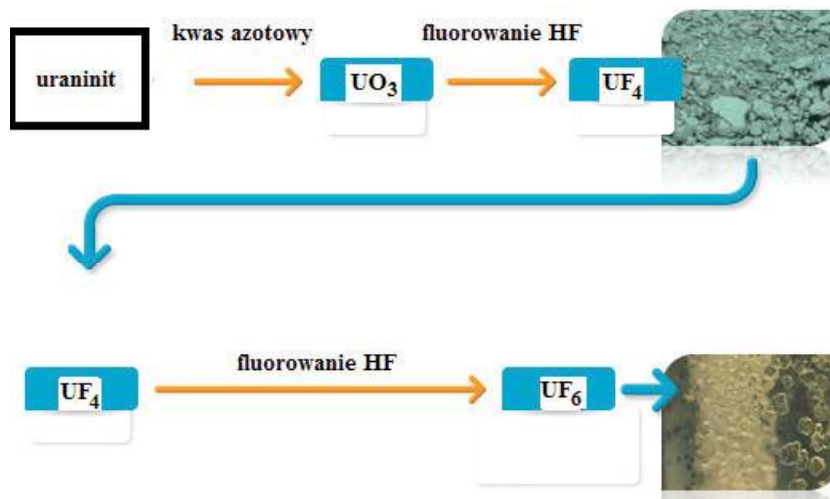
staci stałej i gazowej). Najczęściej stosowane są piece: komorowe, kręgowo, tunelowe, obrotowe, półkowe, fluidalne, elektryczne, pyłowe, szybowe, plazmowe.

#### 5. Konwersja uranu

Przed procesem wzbogacenia, uran poddawany jest procesowi konwersji. Proces ten polega na otrzymaniu  $UF_6$  (przezroczyste kryształy, które w temperaturze  $56^\circ C$ , pod ciśnieniem atmosferycznym sublimują do fazy gazowej) z  $U_3O_8$ . Proces konwersji może odbywać się w jednym lub dwóch etapach z produktami pośrednimi, tj.  $UO_3$  lub  $UF_4$  (czterofluorek uranu, zielony proszek, tzw. „green salt”).

Temperatura wrzenia uranu jest bardzo wysoka i wynosi  $3818^\circ C$ . Dlatego też potrzebny jest związek uranu, który w stosowanych parametrach przemysłowych będzie występował w postaci gazowej. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie sześćfluorku uranu. Dodatkową jego zaletą jest to, iż fluor posiada pojedynczy izotop, czyli przebieg procesu wzbogacenia jest definiowany wyłącznie przez izotopy uranu.

Najkorzystniejsza technologia procesu konwersji uranu, ze względu na możliwość otrzymania wysokiego stopnia oczyszczenia uranu, wykorzystuje fluorowanie. Uraninit rozpuszczany jest w kwasie azotowym, a następnie powstały roztwór miesza się w kilkudziesięciometrowych kolumnach. Roztwór azotanu uranylu ogrzewany jest do temperatury ponad  $300^\circ C$ . Po dodaniu gazowego amoniaku do ogrzanego azotanu uranylu powstaje proszek  $UO_3$ . W kolejnych dwóch etapach fluorowania kwasem fluorowodorowym powstaje kolejno:  $UF_4$  i  $UF_6$ . Schemat procesu konwersji uranu przedstawia Rys. 10.



Rys. 10. Schemat procesu konwersji uranu [30]

Fig. 10. The process flow chart of uranium conversion [30]

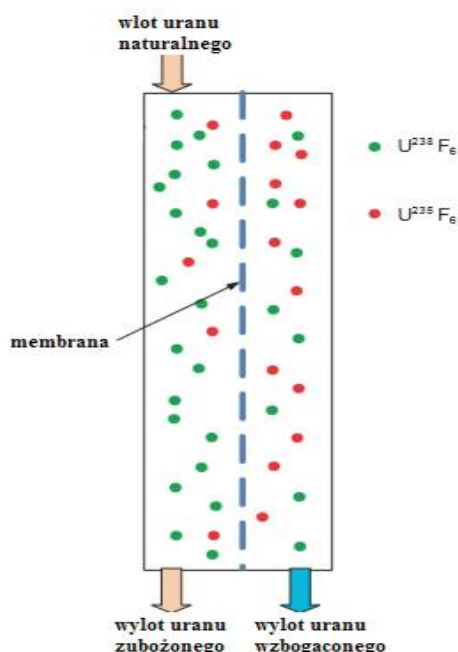
## 6. Wzbogacanie uranu

W zakładzie wzbogacania uranu metodą rozdzielania izotopowego z  $UF_6$  powstaje uran wzbogacony (przy wzbogaceniu U – 235 do 3,5%, ok. 16% początkowej objętości wsadu  $UF_6$ ) oraz uran zubożony (ok. 84% początkowej objętości wsadu  $UF_6$ ). Technologie wzbogacania uranu stosowane na skale światową wykorzystują różnicę mas atomów izotopów uranu: U – 235, U – 238.

Metody wzbogacania uranu [8]:

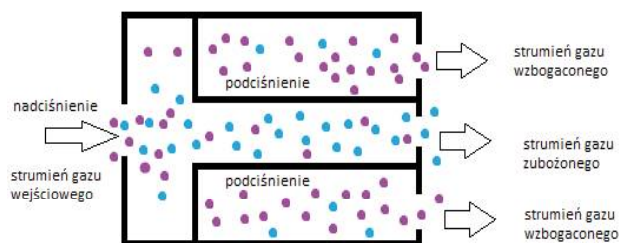
- Metoda dyfuzji gazowej

Metoda dyfuzji gazowej polega na przepuszczaniu gazowego  $UF_6$  przez porowate membrany. Na drodze dyfuzji Knudsen, izotop U – 235 szybciej dyfunduje przez membranę ceramiczną. Jest to metoda mało wydajna, kosztowna oraz energochłonna. Do wzbogacania uranu do ok. 3 – 5% w izotop uranu U – 235 należałoby użyć nawet do tysiąca stopni rozdzielczych.



**Rys. 11.** Rozdział izotopów uranu w dyfuzorze stosowanym w metodzie dyfuzji gazowej wzbogacania uranu [8]

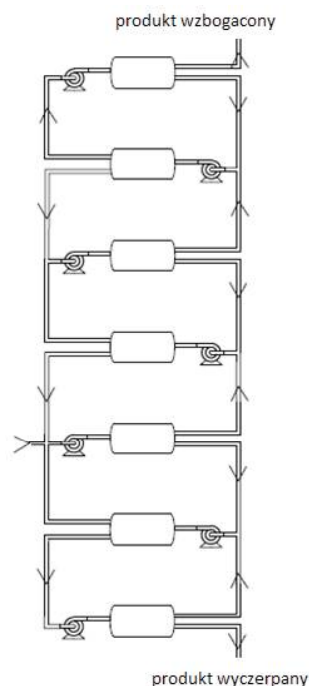
**Fig. 11.** The uranium isotope separation in a diffuser in the diffusion method of uranium enrichment [8]



**Rys. 12.** Rozdział izotopów uranu w dyfuzorze w metodzie dyfuzji gazowej wzbogacania uranu [31]

**Fig. 12.** The uranium isotope separation in a diffuser in the diffusion method of uranium enrichment [31]

Do wzbogacania uranu od ok. 0,7% do ok. 3 – 5% w izotop U-235 należy powtarzać ten cykl nawet 1500 razy! Z tego względu w tej metodzie stosowane są układy kaskadowe (Rys. 13). Jest to metoda: mało wydajna, kosztowna, energochłonna i istnieje możliwość zjawiska foulingu, czyli zanieczyszczenie membran, które prowadzi do zmniejszania wydajności i żywotności membran. Proces dyfuzyjny stosowany jest głównie w USA i we Francji. Zakład wzbogacania uranu (ZWU) metodą dyfuzji gazowej w Tricastin we Francji przedstawia Fot. 3.



**Rys. 13.** Schemat kaskady rozdzielczej w dyfuzji gazowej [31]

**Fig. 13.** The scheme of a separation cascade in the diffusion method of uranium enrichment [31]



**Fot. 3.** Zakład wzbogacania uranu (ZWU) metodą dyfuzji gazowej w Tricastin we Francji (należący do EDF) – zamknięty w 2012 r. [32]

**Photo 3.** The uranium enrichment plant with the diffusion method of uranium enrichment in Tricastin in France (belonging to EDF) – shut down in 2012 [32]

- Metoda wirówkowa

Metoda wirówkowa jest najczęściej stosowaną metodą wzbogacania uranu, która polega na wprowadzeniu  $UF_6$  do wirówki szybkoobrotowej (50 000 – 70 000 obrotów/min). Pod wpływem siły odśrodkowej cięższe cząsteczki  $UF_6$  – 238

są wzbogacone w strumieniu zewnętrznym spływającym na dół wirówki, zaś lżejsze  $UF_6 - 235$  gromadzą się w strumieniu wznoszącym się wokół osi wirnika (Rys. 14). Różnica ciśnień między wlotem ( $UF_6$ ) a wylotem ( $UF_6 - 235$ ,  $UF_6 - 238$ ) powoduje przepływ  $UF_6$  do zewnętrznego systemu rurociągów. Wzdłuż osi obrotu wirówki następuje przepływ przeciwny strumieni izotopów uranu z poprzecznym kierunkiem wymiany strumieni masy.

Efektywność procesu charakteryzuje tzw. współczynnik rozdziału  $Z$ , definiowany jako stosunek przyspieszenia odśrodkowego i ziemskiego [12]:

$$Z = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} \approx \frac{n^2 \cdot D}{1800}$$

gdzie:

$\omega$  – prędkość kątowna bębna [rad/s]

$n$  – częstość obrotów bębna [obr/min]

$r$  – promień bębna [m]

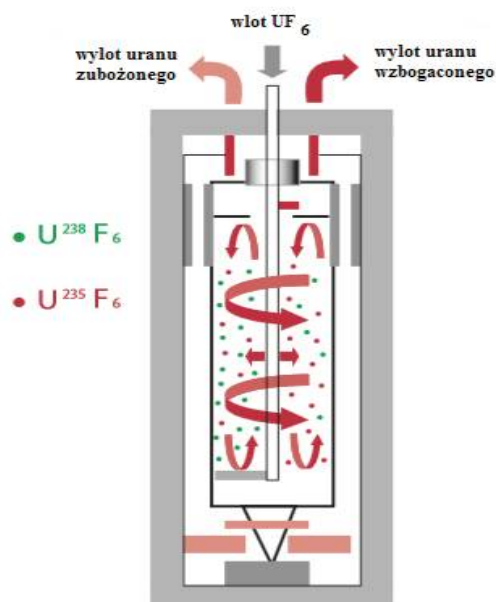
$D$  – średnica bębna [m]

$g$  – przyspieszenie ziemskie [

W zależności od współczynnika rozdziału wirówki dzieli się je na:

- Zwykłe, gdzie  $Z = 500 \div 4000$
- Ultrawirówki, gdzie  $Z = 6000 \div 50000$

Metoda wirówkowa stosowana jest od ponad 30 lat w Wielkiej Brytanii, Niemczech, Holandii. Ze względu na możliwość uzyskania wysokich wydajności procesu oraz niewielkiego zapotrzebowania energetycznego, metoda ta jest jedną z najczęściej stosowanych do wzbogacania uranu. Nie ma konieczności używania sprężarek czy pomp do zasilania wirówki  $UF_6$ , ponieważ między wlotem  $UF_6$  a wylotami uranu zubożonego i wzbogaconego jest różnica ciśnień.



**Rys. 14.** Rozdział izotopów w wirówce stosowanej w metodzie wirówkowej wzbogacania uranu [8]. Wymiary typowego dyfuzora: średnica 15-20 cm, wysokość 1-2 m.

**Fig. 14.** The uranium isotope separation in a centrifugal in the centrifugal method of uranium enrichment [8]. Typical dimensions of a diffuser: diameter 15-20 cm, height 1-2 m.

Zubożony w rozszczepialny izotop uranu  $UF_6$  zazwyczaj poddawany jest procesowi odfluorowania w celu jego zmagazynowania w postaci uranu zubożonego  $U_3O_8$ . Proces odzyskiwania uranu zubożonego w postaci  $UF_6$  stosowany jest zarówno w metodzie dyfuzji gazowej, jak i wirówkowej wzbogacania uranu.

Zakłady, które wzbogacają uran metodą wirówkową pracują kaskadowo. Każdy ze stopni stanowi dużą liczbę wirówek połączonych ze sobą w sposób równoległy. W takim układzie frakcja ze wzbogaconym uranem zasila kolejną wirówkę, natomiast część zubożona kierowana jest do poprzedniego stopnia (recyrkulacja).

Wzbogacenie od 0,7% do 3% U-235 wymaga od 10 do 20 kolejnych kaskad. Zużycie energii mniejsze, udział wzbogacania wirówkowego rośnie. Metoda stosowana jest od ponad 30 lat w Wielkiej Brytanii, Niemczech, Holandii. Kaskadę wirówek gazowych w ZWU Piketon w Ohio przedstawia Fot. 4.

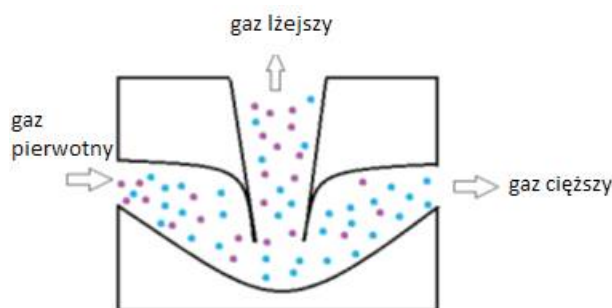


**Fot. 4.** Kaskada wirówek gazowych w ZWU Piketon w Ohio (USA) [33]

**Photo 4.** The cascade of gas centrifuges at the Piketon uranium enrichment plant (Ohio, United States) [33]

#### • Metoda dyszowa

Metoda dyszowa wzbogacania uranu stosowana jest ze względu na prostą konstrukcję aparatury (brak elementów ruchomych) w Niemczech. Jest jednak metodą energochłonną. W tej metodzie  $UF_6$  z dużą prędkością przepływa przez zakrzywiony obszar dzieląc się na dwie frakcje: lekką i ciężką (Rys. 15).



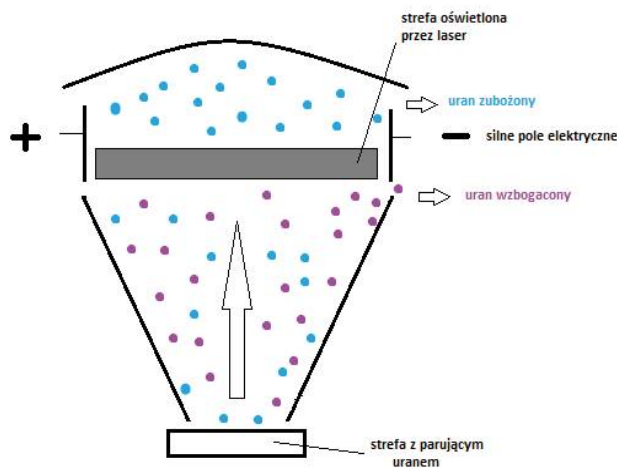
**Rys. 15.** Rozdział  $UF_6$  w metodzie dyszowej [34]

**Fig. 15.** The  $UF_6$  separation in the nozzle method of uranium enrichment [34]

• Metoda laserowa

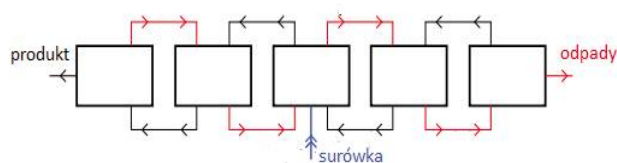
Metoda wzbogacania uranu od 1975 roku w fazie ciągłych badań głównie we Francji i USA. Wyróżniamy trzy metody laserowe: AVILIS, MLIS, SILEX.

METODA AVILIS (Atomic Vapour Laser Isotope Separation) (Rys. 16) polega na rozdzielaniu izotopów na poziomie atomowym. Badania dotyczące tej metody zaniechano. W  $T = 2600\text{ K}$  około 30% uranu jest w stanie metastabilnym. U-235 w stanie metastabilnym jest wzbudzany wiązką lasera o długości 378,1 nm. Dla U-238 długość fali nie jest selektywna, zatem nie są one pobudzone. Następnie wzbudzone izotopy U-235 jonizuje się za pomocą lasera kryptonowego. W fazie końcowej procesu jony o różnym ładunku i masie są rozdzielane w polu z gradientem elektrycznym. Dodatni jon izotopu U - 235 jest przyciągany do ujemnych elektrod. Schemat kaskady rozdzielczej w metodzie laserowej przedstawia Rys. 17.



Rys. 16. Rozdział uranu w metodzie AVILIS [31]

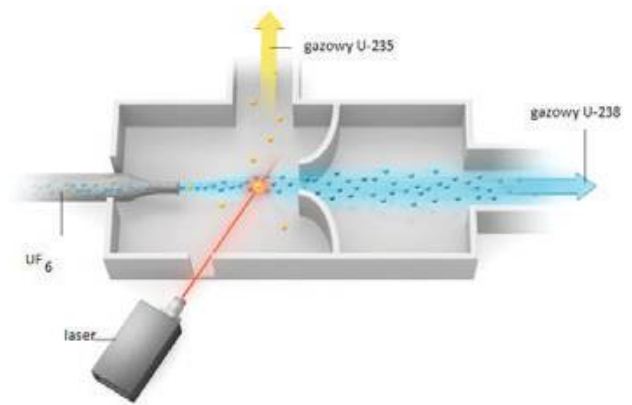
Fig. 16. The uranium separation in the AVILIS method [31]



Rys. 17. Schemat kaskady rozdzielczej w metodzie laserowej [34]

Fig. 17. The scheme of a separation cascade in the laser method of uranium enrichment [34]

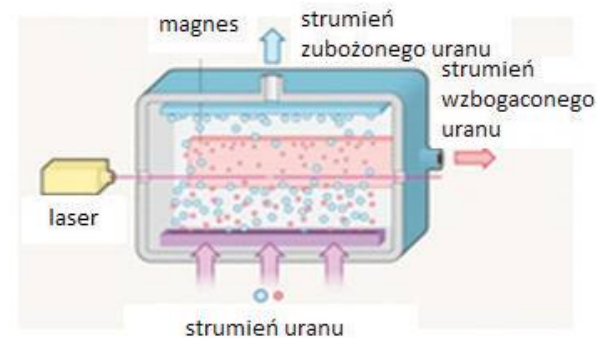
METODA MLIS (Molecular Laser Isotope Separation) (Rys. 18) polega na rozdzielaniu izotopów na poziomie molekularnym (gazowy sześćfluorek uranu).  $^{235}\text{U-F}_6$  otrzymuje się poprzez fotodysocjację przy użyciu lasera ekscymerowego. Atutem tego procesu jest mniejsze zapotrzebowanie energetyczne o około 5-10% w porównaniu do dyfuzji gazowej.



Rys. 18. Rozdział uranu w metodzie AVILIS [35]

Fig. 18. The uranium separation in the AVILIS method [35]

METODA SILEX (Separation of Isotopes by Laser Excitation) (Rys. 19), czyli nowość „całkowicie zmieniająca reguły gry” od firmy Silex Systems Limited (Dr M. Goldsworthy, Dr H. Struve), we współpracy z GE Hitachi, Cameco. Oparta jest na wcześniejszych technologiach laserowych (AVILIS, MLIS). Laser wykorzystany jest do fotodysocjacji  $\text{UF}_6$  do  $\text{UF}_5^+$  poprzez złamanie wiązań jednego z atomów fluoru w cząsteczkach z izotopem U-235. Jonizacja  $\text{UF}_5^+$  pozwala oddzielić je od  $\text{UF}_6$  zawierających U-238.



Rys. 19. Rozdział uranu w metodzie SILEX [36]

Fig. 19. The uranium separation in the SILEX method [36]

Tabela 4 przedstawia porównanie metody SILEX z metodami dyfuzji wirówkowej i gazowej.

Tabela 4. Porównanie metod: SILEX, wirówkowej i dyfuzji gazowej [37]

Table 4. The comparison of SILEX, centrifugal and diffusion methods [37]

	Metoda laserowa SILEX	Metoda wirówkowa	Metoda dyfuzji gazowej
Wykorzystywany proces	Wzbudzenie laserowe	Rozdział mechaniczny (wykorzystanie siły odśrodkowej)	Rozdział mechaniczny (wykorzystanie procesu dyfuzji Knudsen)
współczynnik podziału*	2 - 20	1,3	1,004

\*stosunek pierwiastków kwadratowych z mas cząsteczkowych  $^{238}\text{U-F}_6$  i  $^{235}\text{U-F}_6$

Na tle metod dyfuzji gazowej i wirówkowej, metoda SILEX jest najbardziej atrakcyjna pod względem kosztów eksploatacyjnych [37].

#### Metody wzbogacania uranu, które przeszły do historii...

Metody wzbogacania, które obecnie nie są już stosowane cechowały się wysokimi kosztami eksploatacyjnymi oraz niską efektywnością procesu. Przykłady metod rozdzielania izotopów uranu (obecnie już niestosowanych) [38]:

- Odseparowanie jonów U-235 i U-238 w polu magnetycznym, wykorzystując zasadę stosowaną w spektrometrii masowej - stosowana na potrzeby projektu Manhattan.
- W latach 70. w Brazylii i Republice Południowej Afryki podejmowano próby z metodami separacji izotopów uranu w strumieniu rozprężonego gazu.
- Francuska firma Chemex opracowała proces chemiczny, pozwalający oddzielić izotopy wykorzystując różnice w ich podatności na zmiany wartościowości i w efekcie do tworzenia różnych związków, ale on również nie wszedł do szerszego zastosowania.

Z nisko wzbogaconego uranu (zawartość 3 – 5% izotopu U-235) wytwarzane jest następnie paliwo jądrowe. Produkowany i montowany jest zestaw paliwowy w rdzeniu reaktora jądrowego.

#### **Wnioski końcowe**

Inżynieria chemiczna i procesowa jest obecna w wielu procesach przerobu rud uranowych. Znajomość praw, zjawisk i procesów inżynierii chemicznej pozwala na dogłębne zrozumienie procesów technologicznych w energetyce jądrowej.

Metody laserowe są najbardziej perspektywiczne (uzyskanie wysokiego współczynnika podziału przy stosunkowo niskich kosztach) w porównaniu z pozostałymi metodami, tj. wirówkową, dyszową, dyfuzyjną. Jednak nadal większość ZWU będzie opierało się na metodach lepiej poznanych i również wydajnych, tj. wirówkowych. Według World Nuclear Association, do 2017 r. ok. 3% uranu będzie wzbogacane dla potrzeb elektrowni jądrowych metodą SILEX, ale zdecydowania większość – metodą wirówkową. W 2007 r. metodą wirówkową wzbogacono 75% uranu (25% - metodą dyfuzji gazowej), a w 2017 r. będzie to już 96% (zgodnie z prognozami World Nuclear Association). Powodem jest zasadnicza różnica efektywności energetycznej obu metod. W procesie dyfuzji gazowej zużycie energii wynosi 2500 kWh/kg SWU, w zakładach zaś z wirówkami gazowymi - 40 kWh/kg SWU<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> kg SWU (SWU = ang. Separative Work Unit, jednostka pracy rozdzielczej) - potencjał ZWU wyraża się wartością zużywanej energii na jednostkę pracy, która jest potrzebna do rozdzielania izotopów.

#### **Literatura**

- [1] Dobrzyński L. i in., *Spotkanie z promieniotwórczością*, wydanie drugie poprawione i rozszerzone. Broszura powstała we współpracy z Państwową Agencją Atomistyki, Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana; listopad 2010.
- [2] Infoplease, *Uranium Discovery and Uses*, <http://www.infoplease.com/encyclopedia/science/uranium-discovery-uses.html>
- [3] Abhilash, Pandey, *Microbially assisted leaching of uranium – a review*, CSIR – National Metallurgical Laboratory (CSIR - NML), Jamshedpur, India, Mineral Processing & Extractive Metall Rev., 34: 81 – 113, 2013.
- [4] World Nuclear Association, *World Uranium Mining Production*; July 2013; <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Mining-of-Uranium/World-Uranium-Mining-Production/>
- [5] Ministerstwo Gospodarki, *Cykl paliwowy*; <http://www.mg.gov.pl/node/10974>
- [6] World Nuclear Association, *World Uranium Mining Production*; July 2013; <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Mining-of-Uranium/World-Uranium-Mining-Production/>
- [7] Wikipedia, [https://pl.wikipedia.org/wiki/In%C5%BCynieria\\_chemiczna\\_i\\_procesowa](https://pl.wikipedia.org/wiki/In%C5%BCynieria_chemiczna_i_procesowa)
- [8] AREVA, *Wszystko o energetyce jądrowej, Od atomu A do cyrkonu Zr*, Paryż, 2008 r.
- [9] Zakrzewska – Trznadel G., Polkowska – Motrenko H., *Uran z zasobów krajowych*, Ekomanager, numer 4/2010 (05); <http://ecomanager.pl/?p=703>
- [10] *Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 24 października 2007 r. w sprawie konwencjonalnych źródeł energii i technologii wytwarzania energii* (2007/2091(INI)), <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+20071024+ITEMS+DOC+XML+V0//PL#-docta23>
- [11] Kosiński K., *Wydobycie i wstępny przerób rudy uranowej*, Uniwersytet Warszawski; <http://www.atom.edu.pl/index.php/technologie/cykl-paliwowy/wydobycie-uranu.html>
- [12] Warych J., *Aparatura chemiczna i procesowa*, OW PW, Warszawa, 2004.
- [13] Drzymała J., Konopacka Ż., *Instrukcja do ćwiczenia: Przesiewanie, Przeróbka kopaliny i odpadów, podstawy mineralurgii*, Politechnika Wrocławska, <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/zpkio/pdf/PrzerKopLab/labPK10.pdf>
- [14] CARBOMA, <http://www.carboma.pl/>
- [15] [http://www.pg.gda.pl/chem/pl/zamawiane/images/stories/odstojniki\(1\).pdf](http://www.pg.gda.pl/chem/pl/zamawiane/images/stories/odstojniki(1).pdf)
- [16] Weil B., *Uranium Mining and Extraction from Ore*, Submitted as coursework for PH241, Stanford University, Winter 2012; <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph241/weil2/>

- [17] Bell T., *The 10 Largest Uranium Mines*; <http://metals.about.com/od/suppliersaz/tp/10-Largest-Uranium-Mines.htm>
- [18] Степлин Я. М., „Металлургия урана” Москва 1962.
- [19] Bogacki M., *Procesy ługowania*, Metody Odzysku Metali, rozdział 2., Zakład Inżynierii Procesowej, Wydział Technologii Chemicznej PP.
- [20] Pluskota B., *Bakteryjne ługowanie rud miedzi*, Zakład Przeróbki Rud, ZB i PM „Cuprum”.
- [21] Wierzbka S., Farbiszewska T., *Badanie zdolności utleniania siarki przez bakterie Acidithiobacillus Thiooxidans*, Katedra Biotechnologii i Biologii Molekularnej, Uniwersytet Opolski.
- [22] Klapper R., *Thiobacillus ferrooxidans*, [http://web.mst.edu/~microbio/BIO221\\_2008/T\\_ferrooxidans.html](http://web.mst.edu/~microbio/BIO221_2008/T_ferrooxidans.html)
- [23] *Iron Bacteria in Bankhead National Forest*, [http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Iron\\_Bacteria\\_in\\_Bankhead\\_National\\_Forest.JPG](http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Iron_Bacteria_in_Bankhead_National_Forest.JPG)
- [24] Foszcz D., Niedoba T., Tumidajski T., *Analiza możliwości prognozowania wyników wzbogacania polskich rud miedzi uwzględniającego stosowaną technologię*, *Górnictwo i Geoinżynieria*, 34, zeszyt 4/1, 2010.
- [25] OECD NEA & IAEA, *Uranium 2011: Resources, Production and Demand (“Red Book”)*, Paryż – Wiedeń, 2012.
- [26] Nèveke R., *Bacterial leaching of ores and other materials*, Institut für Mikrobiologie, Technische Universität Braunschweig, Germany, 1986.
- [27] Abhilash, Pandey B. D., Singh A. K., *Comparative performance of uranium bioleaching from low grade Indian apatite rock in column and bioreactor*, *Asian Nuclear Prospects 2012*, *Energy Procedia* 39 (2013) 20 – 32.
- [28] <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/1996/22%20Chmielewski.pdf>
- [29] *Metallurgy for Dummies, What is Yellow Cake Uranium?*, <http://metallurgyfordummies.com/what-is-yellow-cake-uranium/>
- [30] AREVA, *La conversion de l'uranium naturel*, <http://www.aveva.com/FR/activites-697/activites-de-comurhex-malvesi-du-yellow-cake-a-l-uf4.html>
- [31] Jezierski G., 2005r, *Energia jądrowa wczoraj i dziś*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa
- [32] <http://www.atom.edu.pl/index.php/technologie/cykl-paliwowy/konwersja-i-wzbogacanie.html>
- [33] [www.usec.com](http://www.usec.com)
- [34] Villani S., 1979r, *Uranium Enrichment*, Springer-Verlag, New York; [http://www.fizyka.umk.pl/~bezet/pdf/Sep\\_izot.pdf](http://www.fizyka.umk.pl/~bezet/pdf/Sep_izot.pdf)
- [35] <http://spectrum.ieee.org/energy/nuclear/laser-uranium-enrichment-makes-a-comeback/0>
- [36] <http://www.scientificamerican.com/article/us-grants-license-uranium-laser-enrichment/>
- [37] [http://nextbigfuture.com/2013\\_05\\_26\\_archive.html](http://nextbigfuture.com/2013_05_26_archive.html)
- [38] [http://poznajatom.pl/poznaj\\_atom/wirujacy\\_uran,442/](http://poznajatom.pl/poznaj_atom/wirujacy_uran,442/)

mgr inż. Monika Małgorzata Szołucha,  
Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej -  
SEREN,  
Państwowa Agencja Atomistyki,  
Warszawa



## DIAGNOSTYKA I TERAPIA IZOTOPOWA W ONKOLOGII

Z inicjatywy Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Medycyny Nuklearnej dniach 13 – 15 października 2017 r. odbędzie się w Szklarskiej Porębie V Konferencja Naukowo-Szkoleniowa „Diagnostyka i Terapia Izotopowa w Onkologii”. Współorganizatorem wydarzenia jest Zarząd Oddziału Regionalnego we Wrocławiu Polskiego Towarzystwa Onkologicznego. Celem spotkania jest próba opracowania standardów postępowania diagnostycznego i terapeutycznego na poszczególnych etapach leczenia wybranych chorób nowotworowych ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania procedur izotopowych. Organizatorzy zakładają zorganizowanie kilku paneli tematycznych prowadzonych przez polskich ekspertów oraz zaproszenie do czynnego uczestniczenia w nich przedstawicieli wszystkich odłamów szeroko pojętej onkologii. Zamiarem jest wywołanie dyskusji – swoistego konsylium, a w efekcie opracowanie schematów optymalizujących postępowanie z chorymi. Proponowane są następujące tematy seminariów: Rak prostaty – rola PET (PSMA vel Cholina), współczesne metody leczenia izotopowego; PET-MR – aktualne możliwości i wizje przyszłości; Nowotwory narządu rodowego – rola i miejsce metod izotopowych (diagnostyka, planowanie radioterapii, leczenie izotopowe); Nowotwory głowy i szyi – czy PET może być metodą z wyboru w planowaniu Rth; Rak piersi – nowe algorytmy w diagnostyce i terapeutycznych metodach izotopowych. Konferencja ma głównie charakter szkoleniowy z prawem wolnego głosu w dyskusji wszystkich uczestników. Organizatorzy liczą na fachową moderację przez ekspertów, którzy przyjmą zaproszenie do prowadzenia poszczególnych bloków tematycznych. W ramach Konferencji prowadzone będzie równoległe szkolenie uzupełniające z zakresu onkologii nuklearnej dla techników i pielęgniarek placówek izotopowych. Szkolenie będzie oparte o najnowsze wytyczne Europejskiego Towarzystwa Medycyny Nuklearnej, które przekażą wykładowcy zarówno w dziedzinie technologii pracy, jak i ochrony radiologicznej. Szczegóły organizacyjne dostępne są na stronie <http://www.ptmn.pl/>.