



---

---

## Izotop przyszłości - He<sup>3</sup>

AUTOR: Jakub Niechcial<sup>a,\*</sup>

REKOMENDOWANE PRZEZ: Maciej Chorowski<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Zakład Automatyki i Kriogeniki, Instytut I-22, Politechnika Wroclawska

\* Adres do korespondencji: jakub.niechcial@pwr.edu.pl, tel. 71 320 45 28

---

### STRESZCZENIE

Na Ziemi występują dwa stabilne izotopy: hel-3 oraz hel-4. Pozostałymi niestabilnymi izotopami są hel-2, hel-5, hel-6, hel-7, hel-8, hel-9 i hel-10. Izotop helu, którego liczba neutronów w jądrze wynosi trzy jest powszechnie oznaczany jako He-3. Współcześnie izotop ten nie dość, że nie jest postępowany to w wielu dziedzinach fizyki i przemysłu jego występowanie ma wręcz kolosalne znaczenie. Jego implementacja jest obecna zarówno w medycynie, kriogenice, chłodnictwie jak również w fizyce. Może być adaptowany jako paliwo do przyszłościowych reaktorów termojądrowych. Jego właściwości fizyko – chemiczne pozwalają na zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu i nauki. Niniejsza praca jest podsumowaniem dotychczasowej wiedzy na temat wykorzystania helu-3 oraz jego przyszłych aplikacji w świecie technicznym. Wiele instytucji naukowych próbuje dyskutować aktualny kryzys braku helu-3, poszukując nowych jego źródeł. W artykule poruszone zostały problemy z otrzymywaniem dotychczasowych zasobów izotopu jak i możliwych nowych potencjalnych źródeł He-3. W temperaturze pokojowej hel jest lekkim, obojętnym gazem. Jest bezwonny, bezbarwny i bez smaku. Światowy rynek odczuwa obecnie dotkliwie braki zaopatrzenia w ten izotop. 85% aktualnego na rynku He-3 wykorzystywane jest w detektorach neutronów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** *He-3, zasoby He, Księżyca*

---

### 1. WSPÓLCZESNE PROBLEMY ENERGETYCZNE

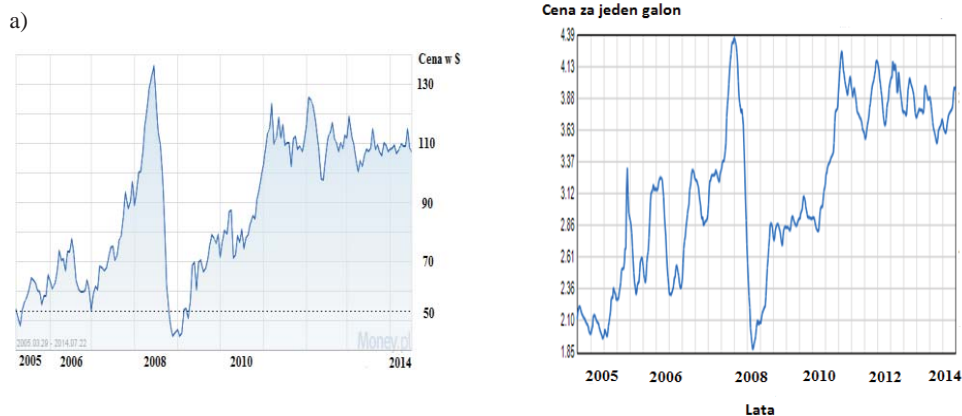
Rosnące ceny ropy naftowej oraz zwiększający się poziom energochłonności gospodarek krajów wysokorozwiniętych powodują, że poszukiwane są inne nośniki energii, które w przyszłości mogą być alternatywą dla ropy i gazu ziemnego. Ropa naftowa wciąż jest jednym z dominujących paliw wykorzystywanych na świecie (tabela 1).

Tabela 1. Bilans energetyczny, dane za 2000r. [1]

Rodzaj paliwa	Udział
Ropa naftowa	36,4%
Węgiel	27,8%
Gaz ziemny	23,5%
Odnawialne - woda	6,3%
Uran	5,9%
Inne	0,1%

Praktycznie jedna trzecia wyprodukowanej energii pochodzi z ropy naftowej, której udział pozostaje na niezmiennym poziomie od lat 80-tych. Jednymi z największych państw - producentów tego surowca są m.in. Rosja (o udziale w światowej produkcji – 12%), USA (10%), Arabia Saudyjska (9%) oraz Chiny (4%). Stany Zjednoczone są w czołówce krajów o największym PKB, stąd w dalszej części artykułu będą stawiane, jako przykład zmian polityki energetycznej. Problemy energochłonności i pozyskiwania nowych źródeł energii najlepiej widać na przykładzie amerykańskiego rynku paliwowego. W okresie poprzednich trzech lat cena baryłki ropy wzrosła dwukrotnie, zaś w szczytowym roku 2008 jej cena wynosiła ponad 130 \$. Stan ten spowodował zwiększenie kosztów

we wszystkich pozostałych gałęziach przemysłu, w szczególności zaś w przemyśle samochodowym. Aby lepiej zobrazować sytuację ekonomiczną, wystarczy wspomnieć, że w omawianym okresie, cena benzyny w USA wzrosła z około 2 \$ do poziomu 4 \$, co skutkowało wzrostem ceny benzyny na rynkach światowych (rys. 1a i b).



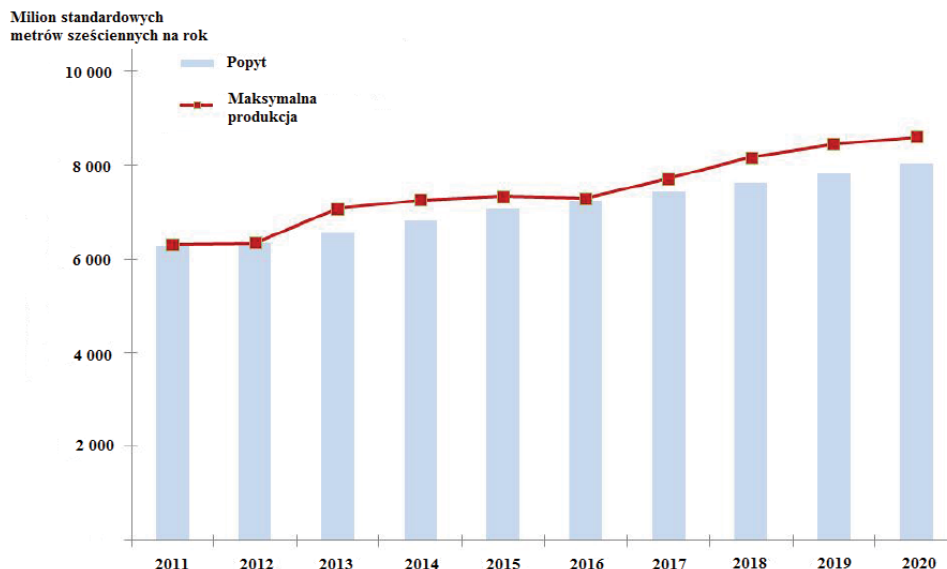
Rys. 1. (a) Cena ropy za baryłkę [2] (b) Cena paliwa w dolarach amerykańskich [3]

Oczywiście wzrost ceny ropy powoduje stopniowe zwiększenie kosztów produkcji energii elektrycznej. Ma to miejsce zwłaszcza w krajach bliskowschodnich, gdzie elektrownie produkują energię elektryczną stosując właśnie ropę, jako paliwo. Problemy energetyczne dzisiejszego świata można, więc podzielić na trzy kategorie: pierwszą jest ogromne zuży-

cie energii w krajach rozwijających się takich jak Chiny, czy Indie, które w przeciągu dekady staną się państwami o największym stopniu zużycia energii. Drugim elementem układanki jest niska sprawność dotychczasowych technologii, dla przykładu - elektrownie jądrowe budowane w Japonii były projektowane jeszcze w latach 70. i budowane w 80. Ich parametry techniczne pozwalają na osiągnięcie sprawności termodynamicznej na poziomie około 30%. Ostatnim elementem jest dostępność źródeł energii. Większe zapotrzebowanie na dane paliwo powoduje zwiększone wydobycie oraz głębszą penetrację skorupy ziemskiej w poszukiwaniu nowych źródeł. Do tego celu trzeba użyć droższych rozwiązań technicznych, które pociągają za sobą wielkie koszty inwestycyjne. Stąd opłacalność ekonomiczna w wielu przypadkach jest niska. Osobnym problemem jest również przyrost ludności w Chinach i Indiach, gdzie gęstość sieci elektroenergetycznej jest wciąż poniżej średniej europejskiej. Trzeba pamiętać, że cały tamtejszy region jest obecnie silnie rozrastającą się gospodarką. Wzrost gospodarczy Indii w 2008 r. wynosił 9% (Chin - 10,4%). Zapotrzebowanie na energię dla 1,2 miliarda ludzi jest ogromne. Przewiduje się, że przez następne 25 lat cały kontynent azjatycki będzie miał wzrost PKB na poziomie 1,7%. Prognozy dla Chin wynoszą 5%, zaś dla Indii 4,7% rocznie. Ma to oczywiście przełożenie na rosnące zużycie energii elektrycznej w tych krajach.

Wszystkie te argumenty przemawiają za znalezieniem nowego źródła energii, zdolnego zastąpić dotychczasowe. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że jedną z rozważanych alternatyw jest uzyskiwanie He-3, który może być w najbliższej przyszłości paliwem do reaktorów fuzyjnych, zastępując gaz oraz ropę. Przykładowymi rozwiązaniami wykorzystującymi He-3 mogą być dwa kluczowe projekty: ITER oraz DEMO, które są pierwszymi konstrukcjami do celów cywilnej produkcji energii elektrycznej z plazmy wysokotemperaturowej. Obecna ilość tego izotopu, jak później zostanie wykazane w artykule jest niewystarczająca na potrzeby tejże energetyki. Jedną z oczywistych przyczyn tego stanu jest fakt, że jego dostępność w przyrodzie jest niewielka. Świadczą o tym dane pomiarowe, które wskazują, że w naturalnej mieszaninie gazowego helu, He-3 stanowi zaledwie 0,000137%. Jest to więc izotop, który jest trudny do uzyskania technicznie, jednakże popyt na ten rodzaj izotopu ciągle rośnie (rys. 2). Na skutek polityki amerykańskiej po atakach terrorystycznych z 11 września 2001 r., głównym odbiorcą pierwiastka są producenci detektorów neutronów.

Obecnie USA starają się wszelkimi sposobami zapewnić odpowiedni poziom konsumpcji energetycznej w kraju, szukając nowych źródeł energii, będących w stanie zaspokoić popyt wewnętrzny na energię elektryczną.

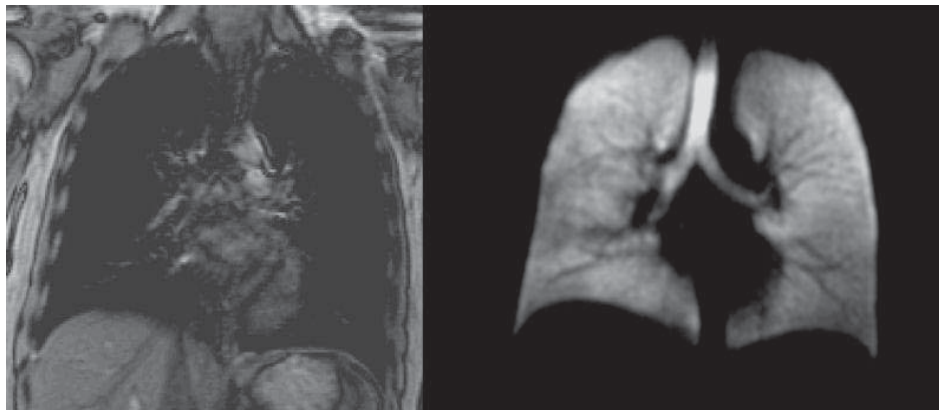


Rys. 2. Przewidywalny popyt helu-3 na najbliższe lata [4]

W dalszej części artykułu przeglądowego omówione zostaną poszczególne zastosowania tego pierwiastka na różnych poziomach ogólności. Tam gdzie będzie to konieczne zostaną zaprezentowane szczegółowe rozwiązania techniczne, zwłaszcza w kontekście najlepiej rokujących, potencjalnych zastosowań w technice i przemyśle.

## 2. DOTYCHCZASOWE ZASTOSOWANIA HELU-3

Medycyna jest jedną z najtrudniejszych dziedzin nauki, ze względu na różnorodne problemy tak natury technicznej jak i biologicznej. Wiele pomysłów i rozwiązań z innych gałęzi nauki znalazło zastosowanie również w leczeniu ludzi. Wykorzystuje się w tym celu różne substancje pochodzenia organicznego i nieorganicznego, w tym również gazy szlachetne, znajdując dla nich nowe zastosowania. Jedną z opcji jest wykorzystanie helu-3. Ten stabilny izotop dobrze zbadanego helu-4, ze względu na swoje szczególne właściwości fizyko - chemiczne (duży współczynnik przewodzenia ciepła, postać gazowa) pozwala na szerokie zastosowanie nie tylko w gałęziach energetycznych (reaktory jądrowe chłodzone helem, fuzja termojądrowa), ale również w medycynie. W sztuce lekarskiej hel-3 ma kilka praktycznych zastosowań. Jego działanie zmniejsza opór dróg oddechowych i ułatwia przepływ powietrza przez płuca. Inną istotną cechą helu-3 jest jego zdolność polaryzacji promieniowania wykorzystywanego podczas rezonansu magnetycznego (MRI). Dla osób cierpiących na astmę, mukowiscydozę lub inne choroby płuc hel-3 pomaga w diagnozowaniu. Przykładowo, przy prostym rentgenowskim badaniu (rys. 3) płuca są zaciemnione i niewiele można z nich odczytać (lewa strona obrazka). Gdy jednak chory wdycha hel-3, wyniki płuc są tak jasne, jakby pacjenta rozświetlała od wewnątrz żarówka (prawa strona).



Rys. 3. Prześwietlenia płuc bez helu-3 (po lewej) i po zaaplikowaniu pacjentowi (po prawej) [5]

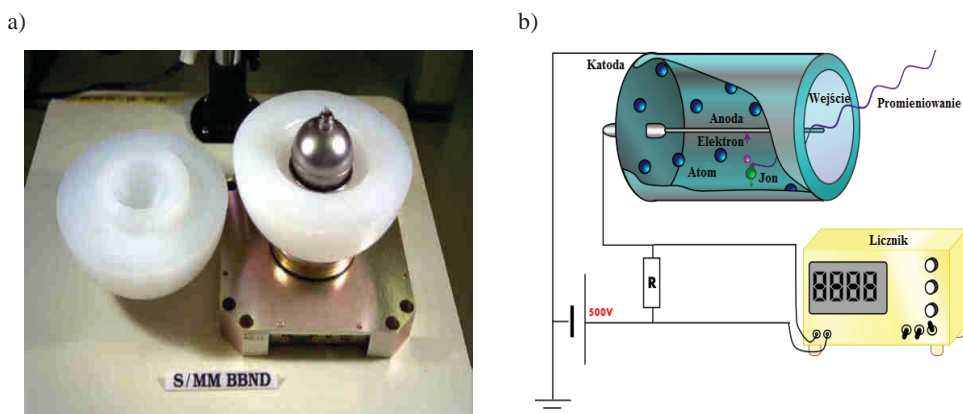
Na tym jednak nie kończą się zastosowania izotopu He-3. Jego zdolność do interakcji z promieniowaniem można również wykorzystać do wykrywania materiałów radiologicznych, ponieważ jest niezwykle wrażliwy na promieniowanie neutronowe, co pozwala na budowę tzw. detektorów neutronów (rys. 4). Przykładowe działanie takiego urządzenia jest następujące: gdy gaz inherentny współdziała z neutronami powstają naładowane cząstki, co łatwo może być wychwycone przez czujniki. Detektory neutronów wykorzystujące hel-3 są w dużym stopniu wrażliwe na tzw. neutrony termiczne, czyli neutrony o energii kinetycznej porównywalnej z energią ruchu cieplnego w temperaturze zbliżonej do pokojowej (ok. 300 K). Wychwytywane są cząstki o niewielkiej prędkości. Dlatego urządzenia te implementowane są w elektrowniach jądrowych do monitorowania liczby neutronów. Pozwala to na kontrolę rozszczepialnej reakcji łańcuchowej, a co za tym idzie kontrolowanie mocy rdzenia reaktora jądrowego, co wymaga dodatkowego komentarza technicznego.

Neutrony mogą być wykryte przy użyciu helu-3 w następujący sposób: typowy licznik składa się z tuby wypełnionej gazem, w której między anodą i katodą następuje przepływ elektronów. W środku znajduje się czynnik gazowy - hel. Neutrony przemieszczające się wzdłuż rury oddziałują z helem-3 tworząc tryt (izotop wodoru) i proton. Proton jonizuje otaczające atomy, które z kolei jonizują inne atomy. Proces jest lawinowy, co pozwala mierzyć powstałe zmiany jako impulsy elektryczne, z amplitudami proporcjonalnymi do energii elektronów. Przykładem rzeczywistego detektora gazowego może być detektor typu BBND (Bonner Ball Neutron Detector) (rys. 4a i b), często instalowany na promach kosmicznych, ze względu na swoje niewielkie rozmiary i skuteczność. Cały dotychczasowy proces można skrótnie opisać wzorem (1):



Próżnia panująca we Wszechświecie jest dla człowieka wielce nieprzyjazna. Z tego też względu potrzebny był sposób na bezpieczne pomiary promieniowania wewnątrz promu kosmicznego. Okazało się to wykonalne właśnie przy użyciu detektorów neutronów. Na-

leży pamiętać, iż ten rodzaj urządzenia najlepiej działa, gdy wychwytywane cząstki są obiektami o niewielkich energiach. Możliwe jest wykrycie przede wszystkim neutronów termicznych. Padające cząstki trzeba, więc najpierw spowolnić. Ogólna zasada działania tego typu urządzenia jest następująca: wysokoenergetyczne protony, uderzając w pancerz promu wyzwalają szybkie neutrony, które mogą swobodnie wnikać do wnętrza statku powodując jego zniszczenie. Sam detektor składa się z metalowej puszki wypełnionej helem-3 pod ciśnieniem 6-ściu atmosfer (ciśnienie to jest optymalne, aby zgromadzić odpowiednią liczbę atomów przy jednoczesnym braku niebezpieczeństwa pęknięcia osłony). Metalowa kapsuła pokryta jest grubą warstwą materiału bogatego w wodór (np. polietylen), czyli substancję, doskonale wyhamowującą wysokoenergetyczne neutrony. Lekkie atomy wodoru powodują spowolnienie uderzających w powierzchnię cząstek. Uzyskane w ten sposób neutrony termiczne reagują z helem wewnątrz tzw. kuli Bonnera. To właśnie tam powstały w wyniku reakcji proton replikuje ponownie z helem, prowadząc do uwolnienia elektronu, ten zaś natychmiast jest przyciągany przez anodę.



Rys. 4. (a) Kula Bonnera [6], (b) Schemat detektora gazowego [6]

Innym rodzajem detektorów działających w oparciu o wykorzystanie helu mogą być sferyczne detektory neutronów. Jak już wspomniano w poprzednim rozdziale, jest to obecnie główny odbiorca dostaw izotopu He-3. Priorytetem dla strony amerykańskiej są właśnie detektory sferyczne, rozmieszczone na granicy Meksyk-USA oraz w portach lotniczych. Dlatego też inne zastosowania He-3 są obecnie utrudnione. Powód takiej polityki wymaga szerszego komentarza, który zostanie omówiony w kolejnym rozdziale.

Hel-3 na dużą mniejszą skalę jest również stosowany w kriogenice, w szczególności w tzw. chłodziarkach rozcieńczalnikowych. Umożliwiają one uzyskiwanie bardzo niskich temperatur, sięgających nawet 1 K. Ich działanie oparte jest na zjawiskach cieplnych powstających w mieszaninie izotopów He-3 i He-4. Największą uwagę przykuwa jednak przyszła implementacja He-3 w reaktorach jądrowych i termojądrowych, gdzie może być użyty jako paliwo lub chłodziwo.

Podsumowując ten rozdział warto zaznaczyć, że nie są to wszystkie możliwe zastosowania helu-3. Dzięki skupieniu się na kilku wybranych przykładach oraz omówieniu zagadnień związanych z promieniowaniem można jednak wnioskować o wzrastającej roli tego izotopu w najbliższej przyszłości. W kolejnym rozdziale przedstawione zostaną przykłady w jaki sposób pozyskiwany jest ten konkretny izotop oraz jego aktualne zasoby.

### 3. AKTUALNE POZYSKIWANIE HELU-3

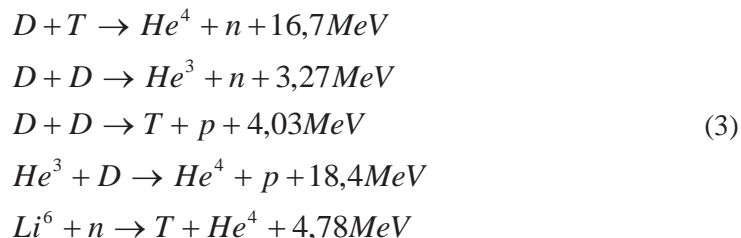
Źródłem helu-3 (He<sup>3</sup>) były przede wszystkim głowice termojądrowe. Na skutek działania na tryt (T) promieniowania beta (strumienia elektronów - e) uzyskiwano go jako produkt uboczny reakcji (wzór 2), neutrino ( $\nu$ ) nie miało większego znaczenia ze względu na słabe oddziaływanie z materią:



Proces ten wymagał jednak czasu - okres trwania reakcji wynosił około 12 lat. Z tego powodu co 5 lat głowice musiały być oczyszczane. Był to jedyny sposób pozyskiwania He-3 na skalę przemysłową, a jego głównymi dystrybutorami były dwa kraje – Stany Zjednoczone oraz Federacja Rosyjska. Hel-3 nie był nigdy przedmiotem rynkowym, jak wiele innych pierwiastków - miedź czy aluminium.

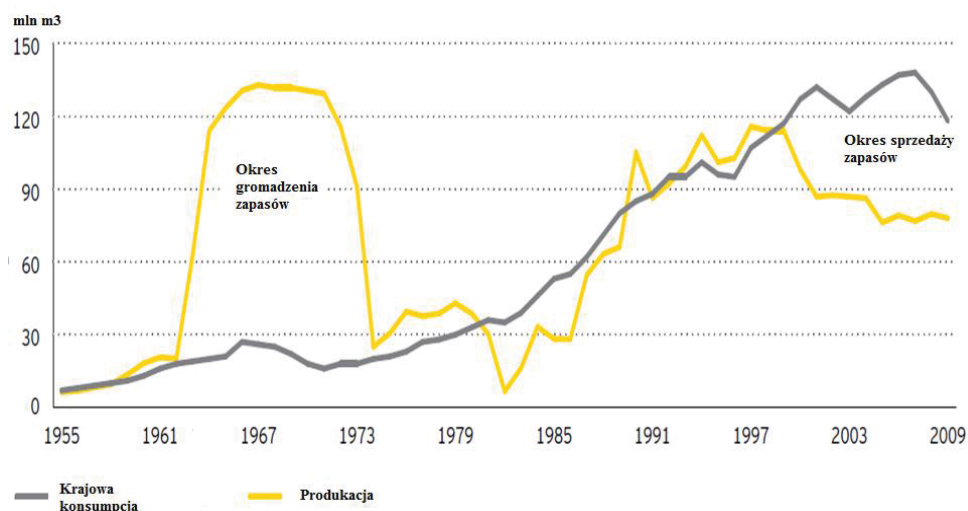
Jednakże podpisane w 2010 r. porozumienie między USA i Federacją Rosyjską - traktat o ograniczeniu broni jądrowej (czyli nowej wersji programu START- Strategic Arms Reduction Treaty - traktat o redukcji zbrojeń strategicznych) zakładał, że liczba głowic zostanie docelowo zredukowana do poziomu 1 550 (z obecnych około 2 150). Już teraz oznacza to spadek amerykańskiej rezerwy helu-3 z około 200 tys. do poziomu poniżej 50 tys. litrów, co poważnie uszczupla i tak skromne zasoby technicznie już wykorzystywane. Z drugiej jednak strony, rząd amerykański postawił sobie za cel zwiększenie produkcji tego izotopu.

Nie jest przypadkowe, że Stany Zjednoczone zainteresowane są zwiększeniem rezerwy tego pierwiastka. Ma to związek z aktualnie prowadzonymi badaniami w zakresie IV generacji reaktorów jądrowych. Jest to tym ważniejsze, że He-3 można również zastosować w fuzji termojądrowej. Reakcje z helem wytwarzają najwięcej energii (wzór 3), więc z punktu widzenia maksymalizacji generowanej mocy jest to najlepiej nadający się pierwiastek do zastosowań cywilnych w nowo budowanych reaktorach fuzyjnych, gdzie D- deuter, T- tryt, n- neutron, p- proton, Li- lit:



Obecne zasoby nie pokrywają w 100% popytu na ten pierwiastek, co można zaobserwować analizując rys. 5. W przeszłości gromadzono ten izotop, ponieważ nie miał prak-

tycznego zastosowania. Lata sześćdziesiąte i siedemdziesiąte to dopiero raczkowanie pomysłów konstrukcyjnych reaktorów fuzyjnych. W tamtym okresie nie było materiałów zdolnych wytrzymać tak wysoką temperaturę, jak również tajemnicą pozostawało zjawisko nadprzewodnictwa, które jest wymagane do budowy reaktora syntezy jądrowej.



Rys. 5. Produkcja i konsumpcja He-3 w USA [8]

Nieprzypadkowo w poprzednim rozdziale została omówiona zasada działania detektorów neutronów. Przed 2001 r. zasoby He-3 w 100% wystarczały na zaspokojenie popytu wewnętrznego. Jednakże po atakach z 11 września, Stany Zjednoczone postanowiły zwiększyć bezpieczeństwo przed atakami radiologicznymi, w szczególności w postaci ochrony przed tzw. „brudnymi bombami” czy też bombami walizkowymi. Brudna bomba jest specjalną konstrukcją, która ma za zadanie rozrzucić na określonym obszarze materiał radioaktywny. Inicjatorem wybuchu jest zazwyczaj klasyczny materiał wybuchowy. Groźniejszą bronią są jednak bomby walizkowe, które można uruchomić w czasie 10–20 minut. Konstrukcja takiej walizki zawiera w sobie zminiaturyzowane elementy konwencjonalnych bomb atomowych.

Po rozpadzie ZSRR zarządzono kontrolę arsenału jądrowego, w wyniku którego okazało się, że zaginęły 84 walizki atomowe. Jedno z takich urządzeń miało wagę 40 kg i gabaryty 60 x 40 x 20 cm. Taka walizka jest w stanie zniszczyć wszystko w promieniu 700 m. Istnieją również pewne modyfikacje takich urządzeń zdolne przenosić ładunek o mocy 1 kT (dla porównania bomba zrzucona na Hiroszimę miała około 14,5 kT). Produkowano również mniejsze ładunki o wadze 30 kg i mocy 0,2 kT. Do 1996 r. odnaleziono zaledwie 48 walizek atomowych.



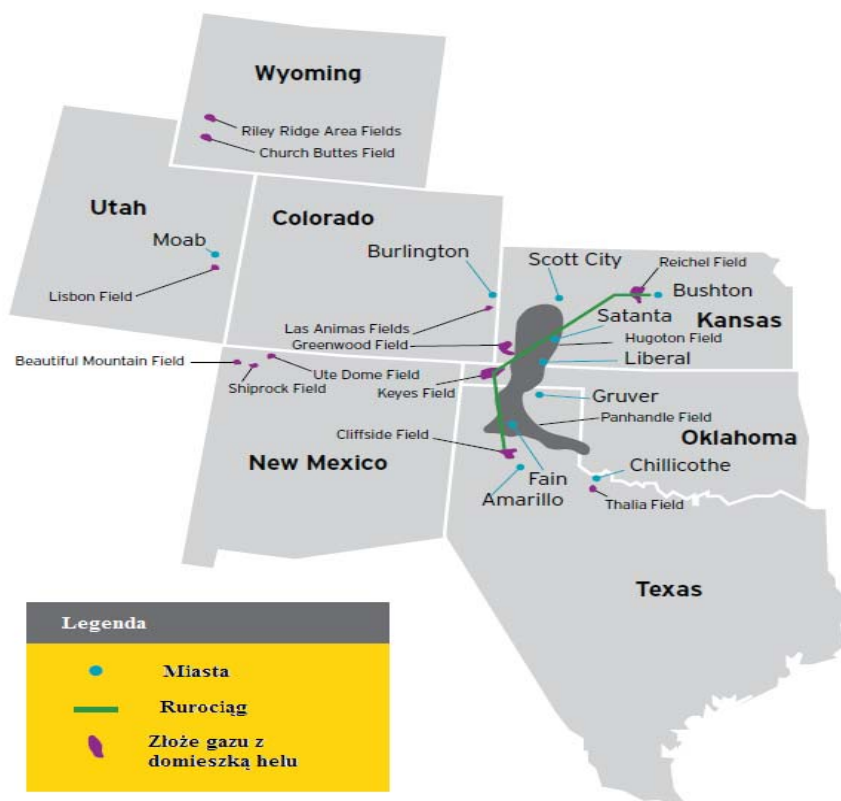


Rys. 6. Kongresman Dan Burton z makietą przenośnej bomby [7]

Tak, więc priorytetem administracji amerykańskiej po 11 września stało się zapewnienie dostatecznej ochrony radiologicznej na granicach USA. Przykładowa konstrukcja walizki z ładunkiem jądrowym została ukazana na rys. 6. Z tego względu największy udział (ponad 85%) zasobów helu przypadają na detektory neutronów. Hel-3 jest, więc wytwarzany głównie jako produkt uboczny przy składowaniu i oczyszczaniu broni jądrowej z trytu, stąd jak już wspomniano głównymi producentami są USA i Rosja. Na skutek zatrzymania dostaw przez Federację Rosyjską cena za jeden litr helu-3 skoczyła z mniej niż 100 \$ (w 2001) do ponad 2100 \$ (2009). W tej sytuacji Stany Zjednoczone są zobligowane do rozpraszania źródeł pozyskiwania helu. Pozyskiwanie jest jednak niezwykle trudne i czasochłonne, po części dlatego, że izotop jest niezwykle rzadki w przyrodzie - stanowi około 0,000137% składu helu naturalnego.

Jego konsumpcja w ciągu ostatnich 50 lat wzrosła niemalże 8-krotnie, podczas gdy produkcja He-3 przez USA ciągle się zmniejsza. Dopóki, więc Federacja Rosyjska nie zaprzestala wydobycia i sprzedaży helu-3, rynek amerykański nie odczuwał niedoborów tzn. produkcja izotopu z oczyszczania głowic w pełni pokrywała zapotrzebowanie krajowe na ten rodzaj pierwiastka.

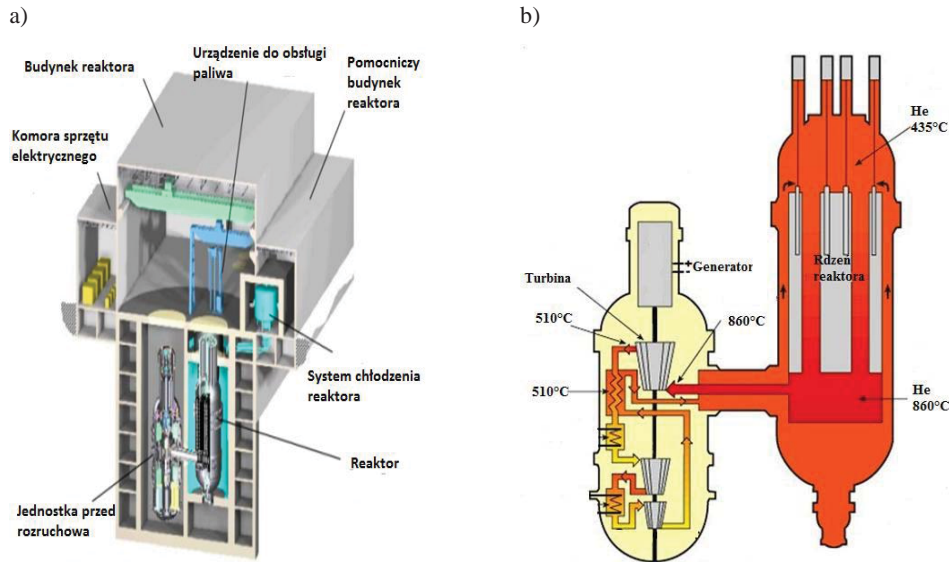
Sama infrastruktura helu w USA na potrzeby przemysłu obejmuje 720 kilometrowy system rurociągów, jak również rezerwy helu w Cliffside w stanie Texas (rys.7). W skład tego złożonego systemu wchodzi liczne firmy. Dziewięć przedsiębiorstw jest zaangażowanych w ekstrakcję helu z gazu ziemnego i ropy. Dziesięć placówek jest w stanie uzyskać mieszaninę helu i azotu, a następnie wyprodukować wysokorafinowany hel. Należy jednak wspomnieć, że tylko część z nich jest połączona z rurociągiem umożliwiającym uzyskiwanie, oczyszczanie oraz transport helu.



Rys. 7. Złoże He-3 w USA [9]

Drugimi po detektorach neutronów urządzeniami, na które istnieje coraz większe zapotrzebowanie w Stanach Zjednoczonych są reaktory jądrowe typu HTR (ewentualnie VHTR). Dzięki nim możliwe jest uzyskanie bardzo wysokiej temperatury na wylocie z reaktorów. Hel jest stosowany w tym przypadku jako chłodziwo, zastępując tradycyjną oraz ciężką wodę (rys. 8). Taka konstrukcja reaktora ma kilka zalet, ale przede wszystkim spośród wszystkich dotychczasowych struktur ma największą sprawność. Są to reaktory IV generacji, które cechują się wysoką wydajnością i sprawnością. Mogą one dostarczać ciepło przy temperaturze na wyjściu z rdzenia reaktora rzędu 1000 stopni Celsjusza. To co wyróżnia reaktory HTR to mikrokapsułki paliwowe otoczone grafitem, tak zaprojektowane aby element paliwowy zwiększał bezpieczeństwo w przypadku jakiegokolwiek przedostania się składników promieniotwórczych poza reaktor. Może się to odbywać np. poprzez zablokowanie emisji gazowych pierwiastków radiacyjnych. Przy 1000 stopniach Celsjusza, reaktor ten może osiągnąć sprawność ponad 50% (w porównaniu do obecnych 30-40%). Tak zaprojektowane paliwo jądrowe pozwala również na przepuszczenie gazowego helu przez element paliwowy. Duży współczynnik przewodzenia ciepła oraz stan

gazowy chłodziwa pozwalają na wydajny i szybki odbiór ciepła z reaktora. Przykładową konstrukcję oraz umiejscowienie w budynku przedstawiono na rys. 8a i b.



Rys. 8. (a) Budynek reaktora [10], (b) Schemat reaktora [11]

Dodatkową zaletą takich reaktorów jest fakt, że przy produkcji ciepła możliwa staje się produkcja wodoru, który w kolejnym etapie może być magazynowany i sprzedawany, w celu ulepszenia ciężkiej i zakwaszonej surowej ropy naftowej.

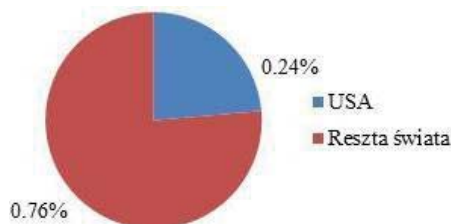
Skupienie się w tym rozdziale na reaktorach wysokotemperaturowych nie jest przypadkowe. W przyszłości taki reaktor na paliwo He-3 – deuterium mógłby być idealnym elementem do zasilania statków kosmicznych. Masa reaktora byłaby mniejsza, za sprawą wykorzystania innych radioaktywnych pierwiastków niż w obecnych generacjach, co w konsekwencji spowodowałoby zmniejszenie masy samego statku (wskutek mniejszych materiałów osłonowych).

Analizując, na przykładzie Stanów Zjednoczonych, dotychczasowe metody uzyskiwania izotopu He-3 widać wyraźnie, że potrzebne są nowe metody separacji tego izotopu. W kolejnym rozdziale omówione zostaną właśnie technologie przyszłościowego wydobycia izotopu He-3, skupiające się zwłaszcza na aspektach związanych z separacją wodną.

#### 4. NOWE MOŻLIWOŚCI WYDOBYCIA

Jak już zostało zaznaczone w poprzednich rozdziałach, uzyskiwanie helu na dotychczasowych zasadach ekonomicznych (oczyszczanie głowic) okazuje się niewystarczające. Z tego względu w planach są koncepcje nowych sposobów wydobycia He-3, jak np. ekstrakcja helu z gazu ziemnego czy też planowane próby koncepcyjne eksploatacji z powierzchni Księżyca. Zanim jednak księżycowe plany wejdą w fazę

konstruktorską warto przeanalizować dostępne opcje uzysku He-3 na Ziemi, w kontekście dostępności zasobów, obszaru na jakim występują oraz ich ekonomicznej opłacalności. Nie bez przyczyny, w dalszej części artykułu rynek amerykański będzie ponownie poziomem odniesienia do dalszych rozważań na temat wydobycia helu-3.

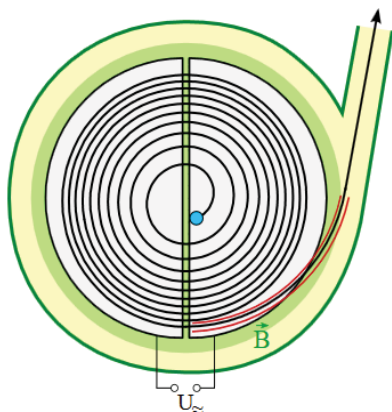


Rys. 9. Procentowy udział zasobów He-3 USA i pozostałych krajów [12]

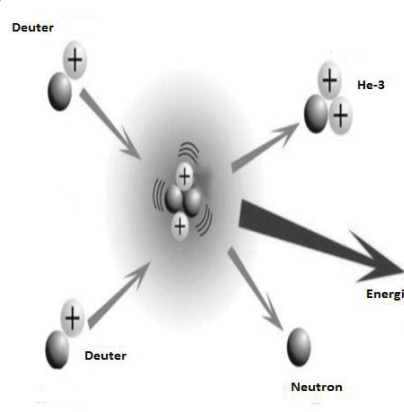
Warto zauważyć, że około  $\frac{1}{4}$  światowych potencjalnych zasobów znajduje się w Stanach Zjednoczonych (rys. 9) co zostało zaakcentowane w poprzednim rozdziale. Jednocześnie właśnie w tym kraju występuje największy niedobór tego pierwiastka. Wstępne plany mające na celu zmniejszenie deficytu zapotrzebowania na He-3 polegają na wykorzystaniu urządzenia zwanego cyklotronem. Jako, że około 71% obszaru naszej planety zajmuje woda, w szczególności woda morska, nie dziwi fakt, że powstała koncepcja wykorzystująca istniejące zasoby wód, w celu wytworzenia interesującego nas pierwiastka.

Za pomocą procesu elektrolizy możliwe jest wydzielenie zawartych w wodzie deuteru i tlenu. Jest to pierwszy etap całego procesu. Następnie poprzez bombardowanie deuteru jego izotopem powstaje izotop He-4. Kolejnym etapem jest wprowadzenie He-4 do urządzenia zwanego cyklotronem (rys. 10a), gdzie neutron jest eliminowany z jądra, doprowadzając do postaci gazowego He-3 (rys. 10b). Następnie możliwe jest skroplenie go, przy użyciu tradycyjnych metod.

a)



b)



Rys. 10. (a) Schemat Cyklotronu [13], (b) Schemat pozyskiwania Helu-3 w cyklotronie [13]

Tak przedstawia się w ogólnych zarysach cały proces „produkcji” gazowego He-3. Samo urządzenie - cyklotron nie jest nadzwyczaj skomplikowane i opiera się o podstawowe prawa fizyki. Składa się ono z następujących elementów: elektromagnesu wytwarzającego pole magnetyczne i komory próżniowej, w której umieszczono dwie półkolisty elektrody zwane duantami. Taka konstrukcja pozwala na efektywną i w miarę szybką separację poszczególnych elementów składowych wlatujących pierwiastków lub cząstek. Między tymi komponentami, przy użyciu generatora wysokiej częstotliwości, wytwarza się zmienne pole elektryczne w centrum cyklotronu umiejscowione jest źródło cząstek naładowanych elektrycznie. Istnieje również możliwość ewentualnego wprowadzenia cząstek z zewnątrz. Jeżeli częstotliwość generatora jest równa częstotliwości obiegu cząstek, to są one przyspieszane podczas przelotu między duantami. Składniki o innych czasach przelotu są okresowo przyspieszane oraz hamowane i w końcu uderzają w duanty. Elementy o większej energii poruszają się po zwiększonym promieniu, gdy zaś tor ruchu cząstki jest odpowiednio duży, może ona opuścić akcelerator. Pomocna jest w tym oczywiście dodatkowa elektroda kierująca cząstki w odpowiednią stronę.

Ten sposób wydobywania może być korzystny zwłaszcza dla okrętów podwodnych. Zastosowanie He-3 w silnikach okrętowych zapewnia większą moc niż obecne paliwa. Zaletami takiego rozwiązania są m.in. bardziej efektywna konwersja na energię elektryczną, nieznaczny poziom radioaktywności oraz w tym przypadku nie potrzeba paliwa radioaktywnego (brak trytu). Wszystkie dotychczasowe sposoby nie są jeszcze w pełni ekonomiczne.

Rozdział ten można podsumować następująco: nie ma obecnie ekonomicznych podstaw do ekstrakcji helu-3 z wody morskiej. Jest to jednak perspektywa dosyć kusząca i możliwe, że po odkryciu nowych materiałów, będzie możliwa realizacja tej wizji. Pomocny w tym może być rozwój techniki fuzyjnej – reaktora ITER oraz projektu DEMO, które będą w najbliższych latach pierwszymi komercyjnymi reaktorami fuzyjnymi. Nie jest to jednak jedyne źródło potencjalnego uzyskiwania He-3, co wykaże następny rozdział.

## **5. EKONOMICZNE ROZWAŻANIA PRZYSZŁOŚCIOWEGO WYDOBYCIA HE-3**

Mimo, że hel nie jest najbardziej powszechnym pierwiastkiem na Ziemi to we Wszechświecie jego występowanie jest po wodrze największe. Fakt ten oznacza, że w przyszłości, gdy ludzkość będzie w stanie podróżować w przestrzeni kosmicznej na większe odległości, kluczowym paliwem może okazać się właśnie He-3. Nurtujące, więc staje się pytanie: jaką cenę trzeba będzie zapłacić za nowe sposoby wydobywania i eksploatacji?

Potencjalne dodatkowe źródła helu-3 mogą obejmować zwiększone wydobywanie trytu z lekkiej wody reaktorów jądrowych, jak również z ciężkiej wody reaktorów komercyjnych. Innymi rozpatrywanymi możliwościami są produkcja trytu i helu-3 przy użyciu akceleratorów cząstek oraz separacja z gazu ziemnego lub atmosfery. Rosjanie

posiadają pola naturalnego gazu ziemnego bogatego w hel, którego zawartość waha się od 0,18 do prawie 0,6% w złożu.

W przypadku ekstrakcji z chłodziwa reaktorów jądrowych ceny produkcji mogą być znaczne. Według jednego z szacunków koszt produkcji dla programu broni jądrowej kształtuje się jest pomiędzy 84 a 130 tys. \$ za 1g. Odpowiada to cenie od 11 000 do ponad 18 000 \$ za litr (w przypadku lekkich reaktorów). Znaczne wahania kosztów potrzebnych do produkcji helu-3 z tego źródła związane są ze ścisłym związkiem z ceną pobieraną od trytu przez zagranicznego dostawcę, która może być różna i zależy od wielu czynników. W ostateczny kosztorys trzeba uwzględnić również wydatek pieniężny na oddzielenia helu-3 z trytu i przechowywania pozostałego pierwiastka (zwłaszcza w przypadku reaktorów na ciężką wodę). W latach 90-tych XX wieku, USA próbowały alternatywnego podejścia do produkcji trytu - bez uciekania się do pomocy przemysłu zbrojeniowego. Szczególnie interesujące były badania napromieniowania litu z akceleratora liniowego, a nie jak to zwykle ma miejsce - w reaktorze jądrowym. Wstępne szacunki wskazują jednak, że proces ten jest nieopłacalny ekonomicznie. Skupiono się, więc na wydobyciu z gazu ziemnego.

Naturalny gaz ziemny zawiera często pewne domieszki innych elementów, jednakże głównym składnikiem wciąż pozostaje metan. W pewnych przypadkach zanieczyszczenia zawierają znaczące ilości helu (aż do kilku procent, jak w przypadku złóż rosyjskich). Gdy zbiornik (złoże) jest stosunkowo bogate w hel możliwe jest ekonomiczne wyodrębnienie. U.S. Geological Survey szacuje łączne rezerwy helu na 20,6 bilionów litrów. Jednakże wszystkie 36 obecnych zbiorników gazu w USA różnią się zawartością helu-3. Badania przeprowadzone w 1990 przez Departament Spraw Wewnętrznych oceniły stosunek ilości helu-3 do helu-4 w omawianych zbiornikach w zakresie od 70 do 242 cząstek na bilion. Oznacza to, że rezerwy USA kształtują się na poziomie od 1 do 5 mln litrów. Według szacunków koszt wydobycia może się wahać od 12 000 \$ wzwyż za litr.

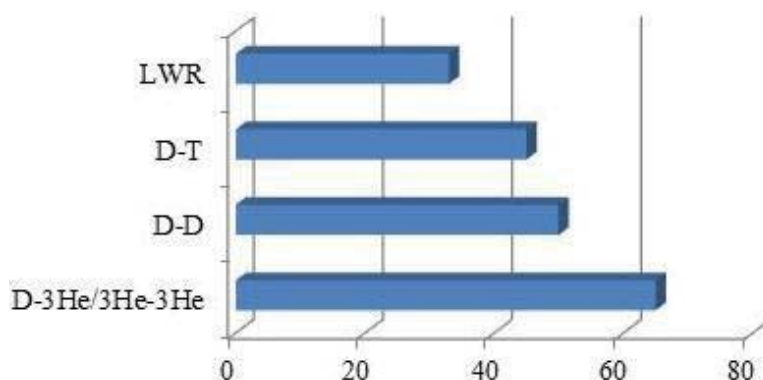
Podobnie jak gaz ziemny również atmosfera zawiera niewielką ilość helu, w tym oczywiście także helu-3. Część elementów aparatury ekstrakcji z gazu ziemnego może być przystosowana do wyodrębnienia helu-3 z powietrza. Największym jednak niezbadanym potencjałem jest księżycowy He-3, któremu poświęcony zostanie kolejny rozdział.

## 6. KSIĘŻYCOWY HEL-3

W okresie zimnej wojny prowadzony był wyścig kosmiczny, o to kto pierwszy wyląduje na Księżycu. Oba supermocarstwa nie szczędziły środków na ten cel, zwłaszcza administracja amerykańska. Było to dla niej priorytetowe postanowienie od czasów wysłania przez Związek Radziecki Sputnika, który stanowił dla Związku Radzieckiego wielkie wydarzenie nie tylko technologiczne, ale również propagandowe. W tym celu wyeksponowano kilka załogowych lotów na Księżyc. Hel-3 został przywieziony na Ziemię przez statki Apollo (11, 12, 14, 15, 16, 17) oraz rosyjskie Luna 16. W sumie

było to około 20 próbek. Po zbadaniu okazało się, że powierzchnia Księżyca jest bardzo bogata zarówno w przeróżne minerały, jak również w hel.

Obecne analizy wskazują, że powierzchnia satelity Ziemi zawiera w sobie około 1 mln ton helu-3. Taka ilość jest niezwykle kusząca i wystarczająca do produkcji energii na skalę przemysłową. Jak ważny jest hel można zauważyć na rys.11. Spośród wszystkich reaktorów jądrowych i termojądrowych, to reaktory, w których paliwem jest mieszanka oparta na izotopie He-3 mają największą sprawność termiczną. Wykorzystanie tego potencjału uniemożliwia jednak obecna technologia, stąd też powstało wiele koncepcji i teorii w jaki sposób wydobyć hel-3 z powierzchni Księżyca.



Rys. 11. Porównanie poszczególnych paliw w stosunku do sprawności reaktorów (LWR – lekko-wodny reaktor jądrowy) [14]

Obecnie NASA (Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej) ma w planach budowę kolonii na Księżycu. Nie będzie to jednak tanie rozwiązanie – wstępne kosztorysy wskazują, że sama baza księżycowa pochłonie około 100 miliardów dolarów, cały zaś projekt szacowany jest na sumę 600 miliardów dolarów (w tym wliczona jest misja załogowa na Marsa). Biorąc jednak pod uwagę nieuniknione przy tak zaawansowanym projekcie złożone technologie - dodatkowe koszty mogą sięgnąć biliona dolarów. Dla porównania produkt krajowy brutto USA wynosi około 12 bilionów dolarów rocznie, wojna w Iraku pochłania miesięcznie do 7 miliardów, w skali roku zaś 80 miliardów dolarów. Z tego też powodu został przerwany czasowo program „Constellation”. Pierwsze lądowania na Księżycu w XXI wieku planowane były na przełom 2014/15. Administracja Baracka Obamy uznała jednak, że załogowe loty na Księżyc nie są priorytetowe. Oprócz tego wstrzymano również budowę statku kosmicznego Orion, który przeznaczony był do wykonywania długotrwałych misji poza niską orbitą okołozemską – w szczególności statek miał być przeznaczony do lotów na Księżyc. Nie zniechęciło to jednak NASA do stworzenia koncepcji wydobywania helu-3. Najpopularniejsze koncepcje zostaną przedstawione w dalszej części artykułu.

Zaproponowany alternatywny proces uzyskiwania He-3 z satelity Ziemi opierał się na pozyskaniu He-3 przy użyciu specjalnie skonstruowanego pojazdu, którego wstępną koncepcję i teoretyczne parametry można zobaczyć na rys. 12a oraz tab. 2.

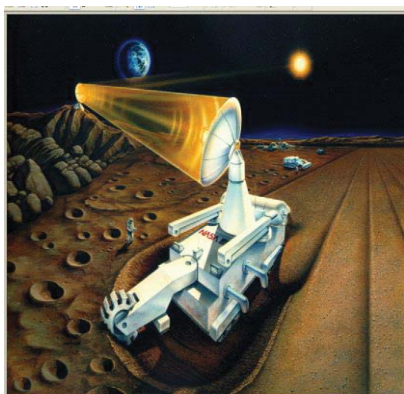
Tabela 2. Podstawowe dane koncepcyjne maszyny wydobywającej He-3 z Księżyca [15]

Poszczególne parametry	Wartości
Roczne godzinowe wydobycie	3942 h/rok
Głębokość wykopu	3 m
Prędkość jazdy	23 m/h
Obszar wydobycia na rok	1 m <sup>2</sup> /rok
Szybkość przetwarzania	556 ton/rok
Potrzebna energia	200 kW

Ważne jest, że wydobycie He-3 z Księżyca nie będzie zanieczyszczać jego okolic. Dodatkowo podczas ekstrakcji możliwa będzie produkcja ubocznych substancji (takich jak woda i tlen), które nie są szkodliwe a wręcz mogą być wykorzystane do podtrzymywania księżycowej kolonii. Aktualnie są to jedynie plany koncepcyjne amerykańskiej agencji kosmicznej (NASA).

Do nowego wyścigu księżycowego dołączają również Chiny, które mają ambicję nie tylko stworzenia kolonii na Księżycu, ale również do 2060 r. kolonii na Marsie. Jest to stosunkowo najmłodszy uczestnik programu kolonizacji Księżyca (Chiński Program Eksploracji Księżyca został ogłoszony w 2003 roku). W początkowej fazie chiński odpowiednik NASA zakładał bezzałogowe badania Księżyca, które w szczególności miały służyć do wstępnego poszukiwania złóż helu-3. Do tej pory wystrzelono dwie sondy: Chang 1 (2007) oraz Chang 2 (2010). 2 grudnia 2013 w ramach misji Chang 3 wysłano lądownik z łazikiem Yutu ("Jadeitowy królik"). Planowane są też bezzałogowe misje, których celem będzie przywiezienie próbek księżycowego gruntu na Ziemię (prawdopodobnie będą to Chang 5 i Chang 6). Próbki te zostaną następnie zbadane, co da dodatkowe informacje o zawartości He-3 w podłożu księżycowym, jak również pozwoli określić optymalne miejsca lądowania dla przyszłych załogowych lotów na Księżyc. Inną ciekawą koncepcją dotyczącą samej podróży kosmicznej jest tzw. Projekt Dedal (ang. Project Daedalus) (rys. 12b).

a)



b)



Rys. 12. (a) Artystyczna wizja zbieracza He-3 na Księżycu [15],  
 (b) Porównanie wielkości statku Dedal i rakiety Saturn V [15]



Jest to studium teoretyczne, opracowane w latach 1973-1978 przez Brytyjskie Towarzystwo Międzyplanetarne, dotyczące zaprojektowania i wysłania w kosmos międzygwiazdowego statku kosmicznego napędzanego energią powstałą w wyniku fuzji jądrowej, która jest optymalna ze względów omawianych w tym rozdziale (rys. 11). Początkowe założenia prototypu przewidywały dotarcie do Gwiazdy Barnarda przed upływem 50-ciu lat od startu statku. Obliczenia wykazały, że wymagałoby to podróży z prędkością równą około 12% prędkości światła. Wykluczono napęd tradycyjny oparty o mieszkankę chemiczną, ze względu na zbyt niskie prędkości maksymalne. Ostatecznie zdecydowano się oprzeć projekt statku o napęd atomowy, który był przedmiotem wcześniejszych analiz w czasie programu Orion. Spodziewano się uzyskać jądrowy napęd pulsacyjny, którego głównym napędem byłaby seria mikroeksplozji termojądrowych o częstości 250 na sekundę, w pewnej odległości od statku.

Wstępne plany zakładają, że statek kosmiczny o nazwie Dedal zostanie zbudowany na orbicie Ziemi i będzie miał początkową masę 54 tysięcy ton, w tym większość bo około 50 tysięcy ton będzie przeznaczona na paliwa (izotop wodoru -deuter i hel-3). Pozostała masa, czyli 500 ton zostanie zarezerwowane na oprzyrządowanie naukowe i pomiarowe. Dedal miał być rakieta dwustopniową: na pierwszym etapie, silniki w ciągu dwóch lat miały rozpędzić pojazd do prędkości 7,1% prędkości światła, po czym zostałyby odrzucone. Silniki drugiego etapu działałyby przez kolejne 1,8 roku i one właśnie miały nadać mu maksymalną prędkość docelową. W dalszym etapie dzięki sile bezwładności, statek miał się poruszać w kierunku gwiazdy Barnarda przez kolejne 46 lat, przeprowadzając w tym czasie badania ośrodka międzygwiazdowego. W planach nie przewidywano lądowania, zamiast tego, Dedal miał wystrzelić w kierunku gwiazdy lub orbitujących ją planet kilkanaście sond, mających za cel zebranie danych naukowych. Wyniki pomiarów miały być następnie przetransmitowane na Ziemię z użyciem silnej anteny statku macierzystego.

## 7. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonego zestawienia jasno wynika, że hel-3 będzie odgrywał znaczącą rolę nie tylko w przemyśle i medycynie, ale również w najbliższej przyszłości w inżynierii kosmicznej, jako paliwo do statków. Wizja jest prawdopodobna, zwłaszcza w kontekście dalekich podróży międzyplanetarnych. Obecna wysoka cena tego pierwiastka zmusza do poszukiwania nowych jego źródeł, niekiedy i poza Ziemią. W związku z tym plany budowy kolonii na Księżycu są kuszącą i bardzo prawdopodobną perspektywą, co może doprowadzić do rewizji stanowisk niektórych państw w sprawie Traktatu o Przestrzeni Kosmicznej podpisanego 27 stycznia 1967 na mocy, którego sygnatariusze zobowiązali się przestrzegać m.in. zasadę niezawłaszczalności kosmosu oraz nieumieszczania broni masowego rażenia (nuklearnej, chemicznej itd.) na orbicie okołozemskiej. Oznacza to, że hel-3 może w przyszłości stać się politycznym i ekonomicznym elementem gry supermocarstw podobnie jak dziś dzieje się to z ropą naftową i bronią jądrową. Oprócz Stanów Zjednoczonych i Rosji do gry o przyszłe wpływy nad zasobami He-3 wchodzi również Chiny. Wskazują na to ich ambitne

plany obecnych i przyszłych lotów bezzałogowych. Niedawno wystrzelone ładowniki księżycowe oprócz danych badawczych, szukały także potencjalnych miejsc wydobywczych izotopu He-3. Rozpoczyna się nowy wyścig kosmiczny o panowanie nad źródłami helowymi. Szacuje się, że 25-40 ton helu-3 może zaspokoić zapotrzebowanie energetyczne Stanów Zjednoczonych na rok, podobnie Chin, które cierpią na „głód energetyczny”. W 2003r. państwo to przesunęło się na drugie miejsce w światowej konsumpcji ropy naftowej. Przewiduje się, że do 2020r. Chiny będą miały ok. 15% udziału w światowej konsumpcji energii. Na początku lat 70-tych XX wieku wskaźnik ten był na poziomie 5%. Bogate zasoby węgla w Chinach nie są jednak w stanie zaspokoić tak znacznego wzrostu zapotrzebowania na energię. Zainteresowane technologią wykorzystania helu-3 są również Indie, które ze względu na dużą populację nadal nie osiągnęły poziomu konsumpcji Europy Zachodniej. Szybki wzrost gospodarczy tych regionów wymusza znalezienie nowych źródeł energii. Wszystko wskazuje na to, że najbliższe konflikty nie będą się toczyć o ropę czy gaz, ale właśnie o zasoby helu-3.

#### LITERATURA

- [1] Zasoby energetyczne  
[http://geographic.cba.pl/rozwój\\_energii.html](http://geographic.cba.pl/rozwój_energii.html) 3.07.2014.
- [2] Cena baryłki ropy  
<http://www.money.pl/gielda/surowce/dane,ropa.html> 15.05.2014.
- [3] Cena benzyny w USA  
<http://www.kierunek.us/us/informacje-praktyczne/mapy/ceny-benzyny-w-stanach.html>  
15.05.2014.
- [4] **Nijoka D., Boldyrev I.**, *Innovative use of helium. Does Russia need to produce helium?*, Ernst & Young, 2012.
- [5] Zastosowanie Helu-3 w medycynie  
<http://news.discovery.com/earth/the-outfall-of-a-helium-3-crisis.htm> 15.05.2014.
- [6] Detektory neutronów,  
<http://large.stanford.edu/courses/2012/ph241/lam1/> 15.05.2014.
- [7] **Kubowski J.**, *Broń jądrowa: fizyka, budowa, działanie, skutki, historia*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 86-88, 2008.
- [8] **Nijoka D., Boldyrev I.**, *Innovative use of helium. Does Russia need to produce helium?*, Ernst & Young, 2012.
- [9] **Nijoka D., Boldyrev I.**, *Innovative use of helium. Does Russia need to produce helium?*, Ernst & Young, 2012.
- [10] **LaBar M.P., Shenoy A.S.**, The gas-turbine modular helium reactor, Nuclear energy materials and reactors, vol. II,
- [11] Reaktory wysokotemperaturowe IV generacji  
[https://www.21stcenturysciencetech.com/Articles%202008/F-W\\_2008/HTR\\_1.pdf](https://www.21stcenturysciencetech.com/Articles%202008/F-W_2008/HTR_1.pdf)  
15.05.2014.
- [12] **Nijoka D., Boldyrev I.**, *Innovative use of helium. Does Russia need to produce helium?*, Ernst & Young, 2012.
- [13] **Muthukumarasamy R., Gopinath S.**, *Extraction of Helium-3 Implying Cyclotron and Its Usage as a Propellant in Ships*, Proceedings of Global Engineering, Science and Technology Conference 3-4 October 2013.

- [14] Reaktory wysokotemperaturowe IV generacji  
[https://www.21stcenturysciencetech.com/Articles%202008/F-W\\_2008/HTR\\_1.pdf](https://www.21stcenturysciencetech.com/Articles%202008/F-W_2008/HTR_1.pdf)  
15.05.2014.
- [15] Encyclopedia of Science,  
<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/D/Daedalus.html> 15.05.2014.
- [16] **Kennedy V. J.**, *Managing the Helium Reserve: Auction are the Best Way to Allocate Scarce Resources*, ITIF- The Information Technology & Innovation Foundations, 1-5, 09.2013.
- [17] **Karhohv N. A.**, *Economic efficiency of power generation units based on modular helium reactor*, Atomic Energy, Vol. 105, No.05, 376 -382, 2008.
- [18] **Gage B. D., Driskill D.L.**, *Helium Resources of the United States-2003*, United States Department of the Interior Bureau of Land Management, 06. 2004.
- [19] **Morgan D., Shea A.D.**, *The Helium-3 shortage: supply, demand and options for Congress*, Congressional Research Service, 22.12.2010.
- [20] **Kumar S., Kopal G.**, *Helium 3 as an alternate fuel technology*, The Journal of Department of Applied Sciences & Humanities, Vol. IV, 77-84, 2006.
- [21] **Broadhead F.R.**, *Helium in New Mexico-geologic distribution, resource, demands and exploitation possibilities*, New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources, Volume 27, 4, November 2005.
- [22] **Milligan T.**, *Scratching the surface: the ethics of helium-3 extraction*, 8<sup>th</sup> IAA Symposium on the future of space exploration: towards the stars, Torino, Italy, July 3-5, 2013.