

Jakub Niechciał, Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

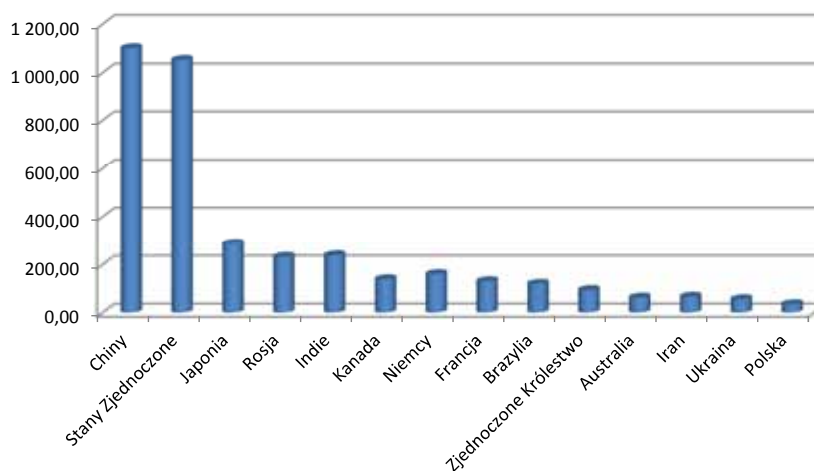
Kriogeniczna separacja mieszaniny helowej

Potrzeby energetyczne poszczególnych krajów świata ciągle rosną. Rozwój gospodarczy musi wiązać się ze zwiększeniem zapotrzebowania na energię elektryczną. Coraz więcej urządzeń i maszyn korzysta z tej formy energii. Komputery, telefony komórkowe, odkurzacze i sprzęty gospodarstwa domowego są lepsze, sprawniejsze i wydajniejsze, co pociąga za sobą większe zużycie energii elektrycznej.

Problemy energetyczne świata - stan obecny

Nie każdy kraj na chwilę obecną, dostarcza swoim obywatelom taką samą ilość energii (dane za 2011 r.). W zestawieniu na rys. 1 wybrano dziesięć krajów o największej produkcji energii elektrycznej oraz cztery o zużyciu podobnym do Polski. Jeśli chodzi o moc zainstalowaną oraz produkcję i konsumpcję energii elektrycznej, to w czołówce znajdują się takie kraje jak: Chiny, Stany Zjednoczone, Japonia, Rosja, Indie, Kanada, Niemcy, Francja oraz Brazylia i Wielka Brytania.

Dane statystyczne pokazują jak duża jest przepaść pomiędzy produkcją energii elektrycznej dwóch państw - Chin oraz USA, w stosunku do pozostałych. Te dwa kraje produkują prawie 4-rzy więcej energii elektrycznej niż trzecia w zestawieniu Japonia. Jeśli jednak spojrzeć na tą kwestię z odrobiny innej perspektywy i zobrazować wyniki jako ilość energii (kWh) przypadającej na jednego mieszkańca danego państwa,



Rys. 1. Moc zainstalowana w GWe
Źródło: na podstawie danych <http://www.eia.gov/>

można zauważyć, że Chiny mimo produkcji tak wielkiej ilości energii dostarczają jej prawie 3,5 razy mniej niż wysoko rozwinięty kraj jak np. Stany Zjednoczone i 4,5 razy mniej w stosunku do Kanady (rys. 2).

Także przeciętny Amerykanin otrzymuje 1,5 raza mniej energii niż jego odpowiednik z północnego krańca konty-

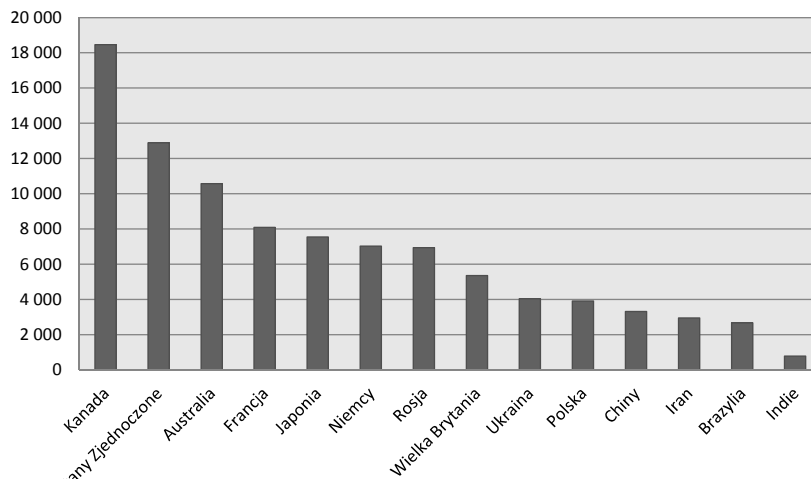
entu. Polska w tym zestawieniu jest na poziomie zaspokojenia energetycznego na jakim są Ukraina oraz Chiny. Europejskie kraje wysoko rozwinięte mogą zaoferować za to prawie dwukrotną wartość rocznej ilości kWh przypadających na jednego mieszkańca w stosunku do państw rozwijających się, jak np. Polska. Jeśli jednak brać pod

uwagę ilość wyprodukowanej energii w stosunku do powierzchni zajmowanej przez dany kraj (rys. 3), to Japonia charakteryzuje się największym takim współczynnikiem. Wskazuje to, że produkowana energia jest skumulowana na niewielkim obszarze. Mimo to japoński obywatel otrzymuje prawie 2,5 kWh rocznie mniej, niż Kanadyjczyk. Widać więc, że kraj kwitnącej wiśni wykorzystując tak niewielką przestrzeń, potrafi uzyskać bardzo dużą produkcję z jednego km². Skutkiem tego jest poszukiwanie nowego nośnika energii, który będzie łatwy w użyciu przemysłowym, transporcie i pozyskiwaniu.

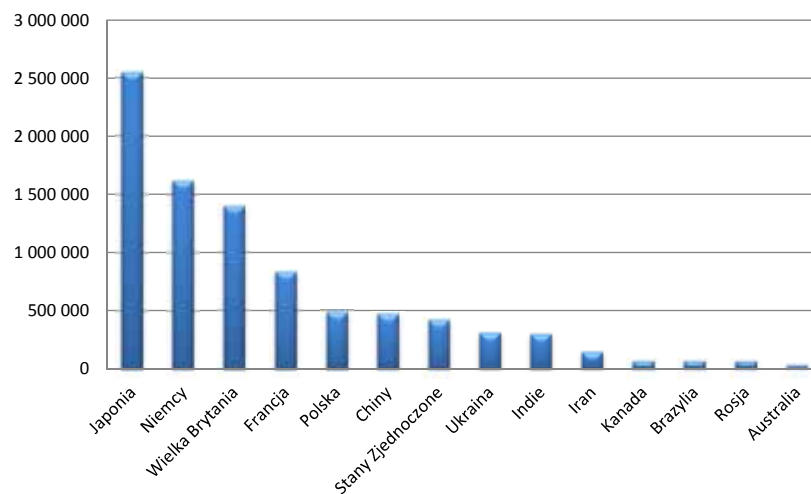
Potencjał do dalszego rozwoju mają przede wszystkim takie kraje jak: Polska, Chiny, Ukraina, czy też Rosja, które mają teoretycznie miejsce na rozwój. Kraje te cechują się niewielkim współczynnikiem energii przypadającej na jednostkę powierzchni.

■ He³ - przyszłość energetyczna

Na Ziemi istnieją dwa stabilne izotopy helu: He³ oraz He⁴. Pozostałe są nietrwałe, a czas ich rozpadu waha się w zakresie od mikrosekundy do kilku minut. W przyrodzie przeważa zawartość He⁴, który w czystej mieszance helowej stanowi ok. 99,999997%. Wielkość ta zależy od źródła pochodzenia. Nie oznacza to jednak, że izotop He³ jest niegodny uwagi. Wręcz przeciwnie, pierwiastek ten znalazł zastosowanie zarówno w medycynie (do prześwietleń płuc), kriogenice (uzyskiwanie w chłodziarkach rozcieńczalników bardzo niskich temperatur, sięgających nawet 1K), jak również ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne w detektorach neutronów, wykrywających promieniowanie radiologiczne na granicy USA-Meksyk i wewnątrz promów kosmicznych. Najbardziej interesująca z punktu widzenia energetyki jest jednak jego przyszła implementacja w reaktorach termojądrowych.



Rys. 2. Roczna ilość kWh przypadających na jednego mieszkańca
Źródło: na podstawie danych <http://www.eia.gov/>



Rys. 3. Ilość kWh przypadających na 1 km² kraju
Źródło: na podstawie danych <http://www.eia.gov/>

Ma to związek z tym, że paliwo, w którym jednym ze składników fuzji termojądrowej jest He³, wytwarza największą ilość energii spośród wszystkich rozważanych obecnie reakcji. W dodatku reakcje termojądrowe są bezpieczniejsze niż ich jądrowe odpowiedniki. Podczas reakcji jądrowej poziom wydobywających się neutronów musi być stale monitorowany. Trzeba także stosować odpowiednie zabezpieczenia w postaci pochłaniaczy neutronów (tzw. pręty bezpieczeństwa), jak również uważać na poziom czynnika odprowadzającego ciepło z

reaktora (monitorować strumień przepływu cieczy w reaktorze i jej temperaturę wlotową i wylotową). Nieprzestrzeżenie tych zasad doprowadziło do stopnienia kanałów mieszczących pręty regulacyjne i przyczyniło się do powstania katastrofy w Czarnobylu. W przypadku procesu termojądrowego, gdy nie ma wystarczającej ilości paliwa, reakcja samoistnie wygasa.

W przyszłości He³ będzie wykorzystywany w reaktorach termojądrowych typu ITER¹ oraz DEMO². Innym możliwym rozwiązaniem może być także budowa silników impulsowych, w któ-

1) ITER - International Thermonuclear Experimental Reactor

2) DEMO - DEMONstration Power Plant

rych He^3 będzie wykorzystywany jako paliwo do silników termojądrowych. Ogromne ilości helu znajdują się poza Ziemią. Hel jest jednym z najpowszechniejszych pierwiastków, drugim co do częstości występowania, zaraz po wodorze. Ogromne jego ilości znajdują się na Księżycu. Obecnie trwa nieformalny wyścig księżycowy, w którym udział biorą Stany Zjednoczone, Rosja, Indie oraz, najintensywniej w ostatnich latach, Chiny. Widać wzrastające znaczenie tego pierwiastka w najbliższej przyszłości. Problemem są jednak jego zasoby. W przeszłości He^3 był wytwarzany przede wszystkim jako produkt uboczny przy składowaniu i oczyszczaniu broni jądrowej z trytu. Stąd głównymi producentami były Stany Zjednoczone oraz Federacja Rosyjska. Z powodu zatrzymania dostaw przez Rosję nastąpił skok ceny He^3 ze 100 do 2100 dolarów za jeden litr. Taki wzrost cen skłonił ludzkość do poszukiwania alternatywnych źródeł jego pozyskiwania. Jedną z możliwości jest jego separacja z naturalnego helu, po uprzednim skropleniu i obniżeniu temperatury do 2,17 K. Współcześnie najbardziej ekonomiczną formą wydaje się pozyskiwanie helu z gazu ziemnego, w którym zawartość tego składnika może dochodzić nawet do 2%.

■ Separacja mieszaniny helowej

Potencjalne dodatkowe źródła Helu-3 mogą obejmować zwiększone wydobycie trytu z lekkiej wody reaktorów jądrowych, jak również z ciężkiej wody reaktorów komercyjnych. Wiąże się to z bardzo dużymi kosztami, zwłaszcza w drugim omawianym wyżej przypadku. Innym sposobem jest separacja mieszaniny helowej w temperaturach kriogenicznych. Polega ona na wykorzystaniu różnicy we właściwościach fizycznych pomiędzy He^3 oraz He^4 w temperaturze poniżej 2,17 K. W tej temperaturze oba izotopy mają

odmienne właściwości: He^4 z cieczy normalnej (posiadającej lepkość) staje się cieczą nadciekłą (nadpłynną), co oznacza, że jest w stanie bez oporu przemieszczać się przez tzw. filtry entropowe. He^3 nie jest nadciekły, aż do osiągnięcia o wiele niższej temperatury, tj. 0,0055 K. Fakt ten może być wykorzystany do budowy maszyny separującej, która z mieszaniny helowej wyodrębni pożądany izotop - He^3 . Konstrukcja filtrów entropowych jest różnorodna. Każdy charakteryzuje się odmiennymi właściwościami fizycznymi - średnią średnicą porów, grubością, powierzchnią oraz przepuszczalnością. Wszystkie te współczynniki wpływają na czas filtracji oraz temperaturę końcową procesu separacji. Dotychczasowe badania opierały się na pomiarach nadciekłego helu (He^4) przepływającego przez filtr entropowy. Głównymi parametrami wykorzystywanymi przy separacji mieszaniny helowej są:

- a) równanie ciągłości,
- b) pierwsza zasada termodynamiki,
- c) prawo Darcy'ego przy zastosowaniu małych przepływów.

Wykorzystanie dwóch pierwszych zasad fizyki dało podstawy do powstania modelu dwupłynowego Tiszy, który wniósł postulat o dwóch składowych: części nadciekłej i normalnej He^4 . Poniżej temperatury 2,17 K He^4 rozdziela się na dwie składowe: normalną (posiadającą lepkość) oraz nadpłynną. Obie formy współistnieją w danej objętości, im niższa temperatura tym większa jest objętość składowej nadciekłej. I odwrotnie - im wyższa, tym więcej znajduje się składowej normalnej. Model Tiszy jest użytecznym narzędziem inżynierskim, tłumaczy kilka zawiłości związanych z nadciekłością cieczy. Na jego podstawie udało się wyjaśnić tzw. efekt fontannowy, który jest ogólnym zarysem filtracji He^3 . Drugim ważnym prawem wyprowadzonym z pierwszej zasady termodynamiki jest tzw. równanie Londona, opisujące zależność zmiany temperatury i ciśnienia. Mówi ono o tym, że różnica temperatur jest

proporcjonalna do przyrostu ciśnienia. Separacja mieszaniny helowej wiąże się z użyciem tzw. filtrów entropowych, które przepuszczają jedynie składową nadciekłą, podczas gdy składowa normalna zostaje zatrzymana przed wlotem do filtra entropowego (w idealnym modelu). Model Tiszy - jak już wspomniano - rozdziela izotop He^4 na dwie składowe. W przypadku mieszaniny helowej komponenty są następujące: jedną część stanowi składowa normalna He^4 oraz He^3 , drugą zaś nadciekła wyłącznie He^4 . Nieodłączną częścią aparatury separującej jest więc filtr entropowy. Badania przeprowadzone przez zespoły naukowców przy użyciu różnych wielkości filtrów entropowych dowodzą kilku ciekawych rzeczy. Analizowano w nich między innymi średnią średnicę porów, grubość filtru i czas trwania filtracji. Większość przeprowadzonych testów skupiała się na przepływie części nadciekłej He^4 przez ośrodek porowaty. W tych warunkach jest to ciecz kwantowa, która poniżej 2,17 K ujawnia nowe właściwości, które cechują się między innymi praktycznie zanikiem lepkości, co umożliwia przepływ przez ośrodek porowaty. Naukowcy, [Hamaguchi S., Maekawa R., 2006] przeprowadzając swoje badania, zauważyli, że dla takiego samego strumienia masy przepływu, wraz ze zwiększeniem grubości filtru entropowego (badali go w przedziale od 2 do 10 mm grubości), zwiększa się różnica temperatur przed i za filtrem entropowym (o około 0,1-0,3 K). Oznacza to, że przeprowadzone modele empiryczne są odpowiednie dla stosunkowo małych przepływów przede wszystkich opisanych prawem Darcy'ego, Grubość filtru entropowego ma zasadnicze znaczenie dla czasu filtracji. Obserwacje przeprowadzone przez zespół amerykańskich [Allain H., Quintard M, 2010], a wcześniej japońskich specjalistów [Nakai H., Kimura N., 1996] wskazują, że możliwe jest zastosowanie prawa Darcy'go do badań nad filtrami entropowymi w małym zakresie przepływów.

Eksperymenty takie realizuje się w sposób empiryczny, określając dla każdego filtru współczynniki filtracji oraz przepuszczalności w temperaturze pokojowej, a także porowatość z uwzględnieniem średniej średnicy kanałów porowatych. Wprowadzając do obliczeń filtrów entropowych współczynnik krętości (definiowany jako stosunek rzeczywistej drogi pokonywanej przez nadciekły czynnik do grubości filtra entropowego) oraz zmodyfikowane prawo Darcy'ego, zespół badawczy [Dalban-Canassy M., Van Sciver S.W., 2010] otrzymał bardzo dobrą zgodność wyników teoretycznych z pomiarami w zakresie niskich przepływów strumieni ciepła - q od 0,1 do 0,6 kW/m² dla temperatur przed filtrem entropowym wynoszących 1,7 oraz 1,9 K. Inny zespół [Baudouy B., Allain H., 2004] przeprowadził badania na filtrze entropowym z użyciem obiektów o różnych wymiarach i właściwościach, jak np. porowatości na poziomie 32, 58 i 62% oraz grubości w zakresie od 2 do 4 mm. W przypadku małych przepływów uzyskali oni wyniki zbliżone z teoretycznymi danymi (do momentu, gdy gradient temperatury wynosił około 20 K/m). Przy wyższych wartościach gradientu, wykorzystanie wzoru Londona okazało się niewłaściwe, ponieważ otrzymane wyniki były rozbieżne z teorią. Z powyższych rozważań wynika, że modele empiryczne pozwalają obliczyć filtry entropowe w zakresie małych przepływów strumienia masy, a tym samym niewielkiego przenieszonego strumienia mocy.

■ Wnioski

Zajmując się tematyką separacji izotopu He-3, powstaje wiele pytań, głównie jeśli chodzi o optymalność i sprawność procesu, a także możliwość przeskalowania badań laboratoryjnych w celu uzyskania instalacji do zastosowań przemysłowych. Problem wiązał się z zapasami He-3, który zaczął być szczególnie widoczny przy redukcji zbrojeń atomowych. Stany Zjednoczo-

ne przez ponad dekadę (początek lat 60. oraz końcówka 70.) miały w swoich zasobach olbrzymie zapasy He-3. Przypadło to na szczyt utrzymywania arsenałów nuklearnych (w 1968 r. około 30 tys. głowic). W 2006 r. stan ten oceniano na około 8 tys., podczas gdy w chwili obecnej USA posiada zaledwie 1600 głowic. Szacuje się także, że do 2018 r., liczba ta ma dodatkowo zmaleć do niecałych 700.

Sam proces oddzielenia atomów He-3 od He-4 jest jeszcze niezbyt dobrze poznany, ze względu na kwantowe właściwości nadciekłego He-4, jednak ze względu na złożoność procesu (efekty kwantowe ujawniające się podczas nadciekłości) opis jest zasadniczo trudny i skomplikowany. W szczególności istnieje problem przeskalowania procesu filtracji dla przepływów większych niż laminarne, co ma miejsce w zastosowaniach przemysłowych. Opis przy użyciu prawa Darcy'ego jest nieprecyzyjny i empiryczny, stąd trudno jest porównywać dwa filtry entropowe o różnej budowie, strukturze porów, rozmiarach i grubości. Niemożliwe staje się więc poznanie parametrów większych filtrów, poprzez przeskalowanie wartości uzyskanych na dużo mniejszym modelu. Brakuje tutaj zależności podobnej do badania turbin wodnych lub przepływów rzek. W tym przypadku buduje się mniejszy model, który przy użyciu odpowiednich współczynników: wymiarowego i bezwymiarowego współczynnika szybkości pozwala po badaniach laboratoryjnych na budowę znacznie większego odpowiednika. □

■ Literatura

- [1] Allain H., Quintard M., Upscaling of superfluid helium flow in porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 53, 2010, str. 4852-4864.
- [2] Baudouy B., Allain H., Heat transfer through porous media in static superfluid helium, *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the*

Cryogenic Engineering Conference, vol 49, 2004, str. 409-416.

[3] Baudouy B., Allain H., Investigation of transient heat transfer in porous media in He II, *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference*, vol 53, 2008, str. 207-214.

[4] Dalban-Canassy M., Van Sciver S.W., Steady counter flow He II heat transfer through porous media, *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference*, vol 55, 2010, str. 1327-1333.

[5] Hamaguchi S., Maekawa R., Experimental and numerical studies on thermal hydraulic characteristic of He II through porous media, *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference*, vol 51, 2006, str. 105-112.

[6] Hendry P.C. Continuous flow apparatus for preparing isotopically pure ⁴He, *Cryogenics* 1987 vol 27 str. 131-138. [3] Nakai H., Kimura N., Superfluid helium flow through porous media, *Cryogenics* 36, 1996, str. 667-663.

[7] Niechciał J. Izotop przyszłości, *Zeszyty energetyczne I*, 2014, str. 239-257.

[8] Maekawa R., Baudouy B., Heat transfer through porous media in the counterflow regime of He II, *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference*, vol 49, 2004, str. 983-990.

[9] Van Sciver W. S., *Helium Cryogenics*, Plenum Press, New York 1986.

[10] Produkcja i zużycie energii <http://www.eia.gov/> dostęp 10.11.2014.