

DARIUSZ BRADŁO, SYLWESTER ŻELAZNY, WITOLD ŻUKOWSKI*

KONCEPCJA ELEKTROWNI TERMOJĄDROWEJ

FUSION POWER PLANT CONCEPT

Streszczenie

Kontrolowana synteza termojądrowa odnosi się do takiej reakcji syntezy jąder atomowych, która zachodzi w temperaturach rzędu milionów K, a energia uzyskana z fuzji wystarcza do podtrzymania dalszej reakcji i można ją wykorzystać do celów energetycznych. W niniejszym artykule zaprezentowano koncepcję przyszłej elektrowni termojądrowej DEMO opartej na modelu AB PPCS. Zamieszczono symulację działania systemu zamiany energii cieplnej w elektryczną wykonaną w programie CHEMCAD 6.2. Dokonano także porównania różnych typów elektrowni poprzez obliczenie ilości potrzebnego paliwa dla elektrowni o mocy 1500 MW w ciągu roku.

Słowa kluczowe: fuzja, kontrolowana synteza termojądrowa, elektrownia termojądrowa

Abstract

The controlled nuclear fusion refers to reaction of synthesis of atomic nuclei, which proceed in temperature of millions K and energy released in the process could support further reactions and also might be used as a source of electric energy. The paper comprises concept of future thermonuclear power plant DEMO based on model AB PPCS. The system of power conversion of thermal energy into electric energy was accomplished and simulated in program CHEMCAD 6.2. A comparison of different type of power plant was made by calculation of amount of fuel needed for 1500 MW plant, during one year.

Keywords: fusion, controlled nuclear fusion, fusion power plant

* Inż. Dariusz Bradło, dr inż. Sylwester Żelazny, dr hab. inż. Witold Żukowski, prof. PK, Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

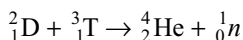
Poważnym problemem dzisiejszych czasów o zasięgu globalnym jest wyczerpywanie się surowców energetycznych przy jednoczesnym ciągłym wzroście zapotrzebowania na energię, przede wszystkim elektryczną. Jednym z alternatywnych źródeł energii elektrycznej może być energia pochodząca z syntezy jądrowej lekkich jąder atomowych. Badania nad kontrolowaną syntezą termojądrową są prowadzone równoległe z badaniami nad reakcjami rozszczepienia od ponad 60 lat, jednak z powodu złożoności kontrolowanej fuzji jądrowej nie udało się do tej pory opanować syntezy w sposób zadowalający.

Termin „kontrolowana synteza termojądrowa” odnosi się do takiej reakcji syntezy jądrowej, która zachodzi w temperaturach rzędu kilkunastu do kilkuset milionów K, a energia uzyskana z fuzji wystarcza do podtrzymania dalszej reakcji i można ją wykorzystać do celów energetycznych. Oczywiście dotyczy to przebiegu reakcji w ściśle kontrolowanych warunkach, w przeciwieństwie do niekontrolowanej syntezy, jaką jest wybuch bomby wodorowej [1].

Obecnie przeprowadzenie kontrolowanej syntezy jest możliwe jedynie w urządzeniach badawczych. Co więcej, dotychczas nie udało się osiągnąć dodatniego bilansu energetycznego w żadnym eksperymencie. Rekordowo udało się uzyskać stosunek energii otrzymanej do dostarczonej równy 0,7 [2]. Dlatego też nie ma pewności, czy fuzja termojądrowa stanie się źródłem energii przyszłości. Jednak nie oznacza to, że nie powinno się w dalszym ciągu prowadzić badań w tym kierunku. Aktualnie w fazie budowy są trzy duże projekty badawcze – ITER [3], Wendelstein 7-X [4] oraz HiPER [5]. Nadrzędnym celem tych projektów jest stworzenie prototypu elektrowni termojądrowej.

2. Przedmiot badań

Obecnie najczęściej wykorzystywaną reakcją fuzji jądrowej jest synteza jąder deuteru i trytu prowadząca do powstania jądra helu ${}^4_2\text{He}$ i neutronu. Podczas syntezy z izotopów wodoru, wg poniższego schematu:

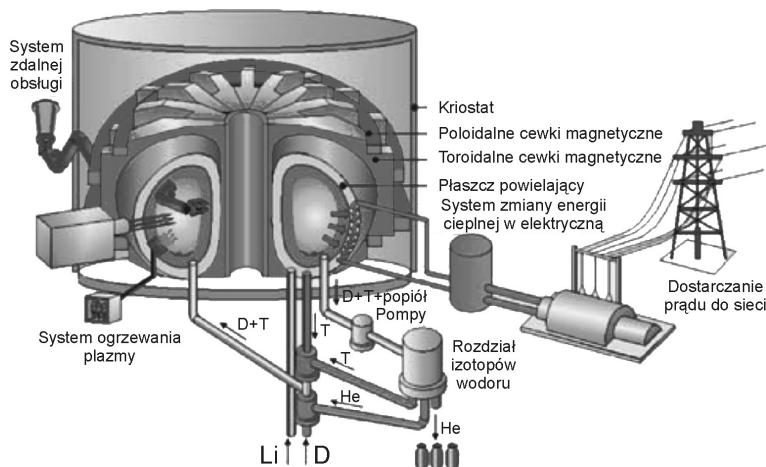


wydziela się 17,59 MeV [1].

Z kolei najważniejsze i dające największą nadzieję prototypy elektrowni oparte są na metodzie magnetycznego utrzymania plazmy z wykorzystaniem tokamaka. TOKAMAK to skrót od rosyjskiej nazwy TOroidalna KAMiera s MAGnitnymi Katuszkami, co oznacza toroidalną komorę z cewkami magnetycznymi. Koncepcję tokamaka opracowali Igor J. Tamm i Andriej D. Sacharow. W 1950 roku w Instytucie Energii Atomowej w Moskwie powstało pierwsze takie urządzenie pod kierunkiem profesora Lwa Arcymowicza [6].

Zasadę działania elektrowni termojądrowej opartej na koncepcji tokamaka można przedstawić w uproszczeniu w następujący sposób. Promieniowanie plazmy pada na pierwszą warstwę komory próżniowej, która pochłania promieniowanie elektromagnetyczne oraz naładowane cząstki. Druga warstwa, tzw. płaszcz powielający (ang. *breeding blanket*), jest wypełniona m.in. ciekłym litem (surowiec) i służy do pochłaniania neutronów, a także do

wytwarzania trytu w reakcji neutronów z litem. Deuter, drugi z surowców, jest wprowadzany do reaktora w formie gazowej lub zamrożonych kropeł. Po reakcji fuzji produkty ulegają separacji, a produkt, czyli He, jest odprowadzany z obiegu. Ciepło reakcji jest oddawane ciekłemu litowi w płaszczu reaktora (ang. *blanket*) lub jest odbierane ze strumienia plazmy w dolnej części komory próżniowej (ang. *divertor*). Czynnikiem chłodzącym w obu kluczowych komponentach jest zazwyczaj hel. Hel z kolei wymienia ciepło z wodą, która tak jak w konwencjonalnej elektrowni służy do wytworzenia energii elektrycznej [7].



Rys. 1. Schemat elektrowni termojądrowej na bazie tokamaka [8]

Fig. 1. Scheme of thermonuclear power plant based on tokamak concept [8]

Na tej samej zasadzie działania będzie oparty reaktor wykorzystywany w projekcie badawczym ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Wyniki uzyskane w ten sposób pomogą w budowie tokamaka czwartej generacji – elektrowni termojądrowej, która ma powstać kilka lat po uruchomieniu projektu ITER. Pierwszą demonstracyjną elektrownię termojądrową określa się mianem DEMO (*Demonstration Power Plant*). Kolejną fazą rozwoju idei tokamaków i kontrolowanej syntezy ma być konstrukcja prototypu pierwszej elektrowni – PROTO, która mogłaby stać się już elektrownią komercyjną. Kolejne etapy tworzą szybką ścieżkę rozwoju (ang. *fast track*) opracowaną przez organizację EFDA (*European Fusion Development Agreement*), jedną z najważniejszych organizacji międzynarodowych w dziedzinie kontrolowanej fuzji [9].

W 2005 roku EFDA opracowała cztery koncepcje elektrowni termojądrowych nazwanych od PPCS A do PPCS D (*Power Plant Conceptual Study*). Poszczególne modele różnią się przede wszystkim sposobem przemiany energii, rodzajem czynnika chłodzącego i wielkością, a co za tym idzie także mocą elektrowni i sprawnością przemiany energii termicznej w elektryczną. Nieco później powstał model AB elektrowni, który stanowi połączenie koncepcji A oraz B. Jest to obecnie optymalny model i istnieje duże prawdopodobieństwo, że elektrownia DEMO będzie wykorzystywała właśnie tę koncepcję.

W badaniach wybrano model PPCS AB w celu sporządzenia uproszczonego bilansu energetycznego i materiałowego przyszłej elektrowni termojądrowej.

3. Badania własne

3.1. Uproszczony bilans energii w elektrowni przyszłości

Bilans sporządzono dla modelu AB na podstawie danych opracowanych przez EFDA – [10] oraz CEA (Atomic Energy Commission) [11]. Opracowano także schemat technologiczny systemu zamiany energii cieplnej w energię elektryczną w programie CHEMCAD 6.2 oraz dokonano symulacji tego procesu, uzyskując dobrą zbieżność z danymi EFDA.

Schemat technologiczny składa się z trzech zamkniętych obiegów:

- obieg helu – *blanket*: $T_O = 301,49 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_O = 78,50 \text{ bar}$ $\dot{m} = 4070,18 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$
- obieg helu – *divertor*: $T_O = 540,28 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_O = 100,00 \text{ bar}$ $\dot{m} = 1009,66 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$
- obieg wody/pary: $T_O = 244,00 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_O = 117,00 \text{ bar}$ $\dot{m} = 2068,01 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$

Obiegi helu są podobne. Najpierw ciepło fuzji (i ogrzewania plazmy) jest przekazywane gazowemu helowi (*blanket/divertor*). Na schemacie to ciepło jest reprezentowane przez podgrzewacze o ustalonym cieple dostarczonym. W dalszej kolejności znajdują się wymienniki ciepła, które służą wytworzeniu i przegrzaniu pary wodnej. Ostatni etap to sprężanie helu w kompresorach pracujących z podaną sprawnością n .

Obieg wody zaczyna się od wytwornicy i przegrzewacza pary. Dalej następuje trójstopniowe rozprężanie powstałej pary w turbinach (ekspandery): WT – wysokociśnieniowej, ST – średnociśnieniowej oraz NT – niskociśnieniowej. Turbiny napędzają następnie generator prądu. Część strumienia pary po pierwszym i drugim stopniu rozprężania ulega rozdzielaniu. Po ostatnim stopniu para kierowana jest do skraplacza (kondensator). Następnie woda jest pompowana do miksera i dalej do wymiennika ciepła wody, gdzie wymienia ciepło z rozdzielonym strumieniem po pierwszej turbinie. W ten sposób woda, kończąc obieg, ma parametry niemal identyczne jak na początku. Jedyną różnicą to temperatura wyższa o ok. $2,7^\circ\text{C}$, co powodowało kłopoty z symulacją działania całego schematu. Aby pokonać ten problem, zastosowano dodatkowe urządzenie pomocnicze – Stream Reference, które przekazało strumieniowi początkowemu jedynie wartości przepływu i ciśnienia, zaniebując temperaturę. W praktyce dla rzeczywistego obiegu tak niewielka różnica temperatur nie będzie stanowiła problemu, gdyż należy się liczyć ze spadkami zarówno temperatury, jak i ciśnienia.

Otrzymana w turbinach energia jest zamieniana w generatorze prądu ze sprawnością 98,7% na energię elektryczną (2 384,98 MWe), która dzieli się na:

- założoną moc elektrowni: 1 500,00 MWe,
- moc pomp i kompresorów: 399,56 MWe,
- podgrzewanie plazmy: 338,31 MWe,
- inne urządzenia pomocnicze elektrowni: 147,11 MWe (można tę wartość traktować częściowo także jako straty ciepła i masy, np. w komorze próżniowej).

Wyjaśnienia wymaga występujący na schemacie termin „multiplikacja”. Oznacza on powielanie neutronów związane z koniecznością zachowania bilansu neutronów. Wykorzystuje się do tego celu związki berylu (BeTi , BeV) lub sam Be oraz Pb, podobnie będzie w reaktorze DEMO. Blanket w DEMO ma być wypełniony ciekłym eutektykiem o wzorze $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$, przez co może zachodzić reakcja opisana w skrócie jako: $\text{Pb}(n, 2n)$, w której zostaje podwojona liczba neutronów oraz wydzielona dodatkowa energia – energia multiplikacji.

3.2. Uproszczony bilans materiałowy elektrowni

Na podstawie danych początkowych zawartych w bilansie energii sporządzono uproszczony bilans materiałowy paliwa termojądrowego. Porównano również ilości paliwa dostarczonego do elektrowni termojądrowej z elektrowniami konwencjonalnymi o tej samej mocy. Dla elektrowni jądrowej można obliczyć konieczną ilość rudy uranu, natomiast dla powszechnej w kraju elektrowni węglowej ilość miału węglowego.

3.2.1. Elektrownia termojądrowa

Założenia do bilansu:

Reakcja zachodząca w reaktorze:



Moc elektrowni: 1500,00 MWe

Całkowita energia uzyskana z fuzji: 4920,22 MW

Energia uzyskana z fuzji dla reakcji (1): 17,59 MeV

Czas pracy elektrowni: 365 dni

Deuter można uzyskać z wody morskiej, przy czym założono, że ${}^m\text{D} = \frac{1}{6760} \cdot {}^n\text{H}$, czyli tak jak wynika to z naturalnej zawartości deuteru w przyrodzie. Dodatkowo do obliczenia objętości wody morskiej, założono jej gęstość $1030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Tryt nie jest surowcem dostarczonym do elektrowni termojądrowej. Powstaje on w zewnętrznym płaszczu reaktora w reakcji:



Jak widać z reakcji (2), stosunek molowy litu do trytu wynosi 1:1, stąd łatwo wyznaczyć masę ${}^6\text{Li}$ konieczną do otrzymania żądanej ilości trytu.

${}^6\text{Li}$ stanowi tylko 7,5% masy naturalnego litu, dlatego musi być poddany wzbogacaniu. Założono zawartość ${}^6\text{Li}$ w koncentracji równą 90,0% oraz zawartość ${}^6\text{Li}$ w frakcji zubożonej 1,0%.

Tabela 1

Bilans ilości surowca i produktu w elektrowni termojądrowej

Przychód		Rozchód	
Surowiec	Masa [g]	Produkt	Masa [g]
D	160 582	He	319 124
T	240 466	<i>n</i>	80 420
Suma	401 049	Suma	399 543
Deficyt masy	1 505	0,38%	

Lit otrzymuje się w wyniku termoelektrolizy stopionych soli LiCl-KCl. LiCl można uzyskać z minerału litu – spodumenu, w którym zawartość Li_2O wynosi 8%. Stąd można obliczyć ilość minerału potrzebną do otrzymania żądanej ilości litu, przy założeniu wydajności prądowej elektrolizy 60%.

3.2.2. Elektrownia jądrowa

Założenia do bilansu:

Moc elektrowni: 1500,00 MWe

Sprawność przemiany energii: 35%¹

Czas pracy elektrowni: 365 dni

Wartość wypalenia²: 55 MWd · kgU⁻¹

Zawartość uranu w rudzie: 1% $\left\{ \begin{array}{l} 99,3\% \text{ U} - 238 \\ 0,7\% \text{ U} - 235 \end{array} \right.$

Zawartość U-235 w koncentracji: 3,3%

Zawartość U-235 w frakcji zubożonej: 0,25%

Uran jest dostarczany w postaci tlenku UO₂, co nie ma wpływu na bilans materiałowy paliwa. Po zajściu reakcji rozszczepienia masa wypalonego paliwa ulega nieznacznej zmianie, a jego skład przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Zestawienie składu wypalonego paliwa

Produkt	[%] ³	[kg]
U-238	95	27 019
U-235	0,8	228
Pu-239	0,9	256
Produkty rozszczepienia	3,1	882
Ciężkie aktynowce	0,1	28
Masa zamieniana na energię	0,1	28
Suma	100	28 442

3.2.3. Elektrownia węglowa

Założenia do bilansu:

Moc elektrowni: 1500,00 MWe

Sprawność przemiany energii: 39%⁴

Czas pracy elektrowni: 365 dni

Wartość opałowa mialu węglowego: 23 MJ · kg⁻¹

Tabela 3

Skład elementarny mialu węglowego⁵

Skład elementarny	c	h	s	o	n	w	p	Suma
[kg/kg _{paliwa}]	0,67	0,02	0,01	0,01	0,01	0,11	0,17	1

¹ Dla elektrowni PWR według [12].

² Ilość uzyskanej energii z jednostki paliwa, liczona w megawatodniach na 1 kg paliwa dla elektrowni PWR według [12].

³ Procentowy udział w wypalonym paliwie na podstawie [12].

⁴ Dla elektrowni skojarzonej z wytwarzaniem ciepła według danych elektrowni „Kozienice” [13].

⁵ Według danych kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” [14].

Współczynnik nadmiaru powietrza: $\lambda = 1,5$

Skład powietrza: $\%_{\text{obj}} \text{O}_2 = 21$

$\%_{\text{obj}} \text{N}_2 = 79$

Tabela 4

Zestawienie bilansu materiałowego spalania mialu węglowego

Przychód		Rozchód	
związek	masa [t]	związek	masa [t]
C	3 533 298	SO ₂	105 488
H ₂	105 472	CO ₂	12 949 536
S	52 736	H ₂ O	1 520 461
O ₂	52 736	N ₂	50 699 448
N ₂	52 736	O ₂	5 125 576
H ₂ O	580 094	popiół	896 508
Popiół	896 508		
O ₂ z powietrza	15 376 727		
N ₂ z powietrza	50 646 712		
Suma	71 297 017	suma	71 297 017

3.2.4. Zestawienie otrzymanych wyników

Tabela 5

Roczne zużycie paliwa w elektrowni o mocy 1500 MW

Typ	Surowce		Koncentrat		Produkty	
Termojądrowa	woda morską	4 712 m ³	D	160 582 g	He	319 124 g
	ruda litu	353 689 kg	T	240 466 g	n	80 420 g
			suma	401 049 g	suma	399 543 g
			deficyt masy		1505 g	0,38%
Jądrowa	ruda uranu	19 283 t	²³⁵ U	996 kg	²³⁵ U	228 kg
			²³⁸ U	27 446 kg	²³⁸ U	27 020 kg
					pozostałe	1166 kg
			suma	28 442 kg	suma	28 414 kg
		deficyt masy		28 kg	0,1%	
Węglowa	miał węglowy	5 273 579 t	miał pęglowy	5 273 579 t	gazy	70 400 509 t
	powietrze	60 km ³	powietrze	66 023 439 t	popiół	896 508 t
			suma	71 297 017 t	suma	71 297 017 t

3.2.5. Wnioski

Z powyższego zestawienia wynika, że jest ogromna różnica w ilości paliwa dostarczonego dla różnych typów elektrowni w ciągu roku. Elektrownia węglowa zużywa ok. 5 mln t miału węglowego i 60 km³ powietrza (ok. 15 mln t O₂, produkując ok. 13 mln t CO₂). Elektrownia jądrowa potrzebuje już tylko ok. 28 t koncentratu w przeliczeniu na uran, czyli prawie 190 tys. razy mniej paliwa stałego. Najmniej paliwa wymaga elektrownia termojądrowa, bo nieco ponad 400 kg, czyli ponad 70 razy mniej niż elektrownia jądrowa i aż 13 mln razy mniej niż elektrownia węglowa.

Ilość paliwa to tylko jeden z wielu elementów, które decydują o opłacalności budowy danego typu elektrowni. Jednak w dobie zmniejszającej się ilości naturalnych surowców energetycznych ten czynnik może stać się kluczowy.

4. Podsumowanie

Nigdy dotychczas nie istniała potrzeba budowania elektrowni termojądrowej, ponieważ ludzie uważali, że paliwa kopalne są i będą dostępne także w perspektywie następnych pokoleń, a ewentualny kryzys energetyczny będzie dotyczył odległej przyszłości. Obecnie zmienia się społeczna świadomość i rośnie poczucie bliskości kryzysu energetycznego.

Fuzja nie może być przeprowadzana w małej skali, aby stała się wydajna energetycznie. Jeżeli dodatkowo weźmie się pod uwagę bardzo zaawansowaną technologię budowy i eksploatacji reaktorów syntezy, okaże się, że koszty inwestycyjne są zbyt duże. Nikt nie podejmuje się finansowania kosztownych projektów badawczych, których szanse na powodzenie nie są wystarczająco udokumentowane. Dlatego poziom finansowania badań nad fuzją jest dziś największym problemem, z którym muszą się borykać badacze kontrolowanej syntezy.

Mimo tych przeciwności badania nad fuzją stanowią dziś prawdziwe wyzwanie. W ciągu ostatnich lat nastąpił gwałtowny postęp i prognozy na przyszłość są obiecujące. Kontrolowana synteza termojądrowa ma szanse stać się najważniejszym źródłem energii w przyszłości, jednak wymaga jeszcze prowadzenia wielu kosztownych badań.

Literatura

- [1] K a m y s B., *Reakcje termojądrowe – wykład fakultatywny*, http://users.uj.edu.pl/~ufkamys/BK/reakcje_tj.pdf (dostęp: 1 września 2011).
- [2] W o ź n i c k a U., *Synteza termojądrowa – źródło energii dla elektrowni przyszłości*, http://www.ifj.edu.pl/publ/reports/rep_pop/4.pdf?lang=pl (dostęp: 1 września 2011).
- [3] G a ł k o w s k i A., *Od JET-a do ITER-a. Ważny krok na drodze do energii taniej, bezpiecznej i przyjaznej środowisku*, *Postępy Fizyki*, 59, 3, 102, http://www.cen.edu.pl/cen_serwis/userfiles/file/link2/Postepy_Fizyki_Od_JET-a_do_ITER-a.pdf (dostęp: 1 września 2011).
- [4] <http://www.iter.org/> (dostęp: 1 września 2011).
- [5] <http://www.hiper-laser.org/index.asp> (dostęp: 1 września 2011).
- [6] <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/forschung/w7x/index.html> (dostęp: 1 września 2011).
- [7] European Fusion Development Agreement, *A conceptual study of commercial fusion power plants*, www.efda.org/eu_fusion_programme/downloads/scientific_and_technical_publications/PPCS_overall_report_final.pdf (dostęp: 1 września 2011).

- [8] Maisonnier D., *Fusion Power Plant Studies in Europe*, <http://www.djs.si/proc/port2007/hm/pdf/003.pdf> (dostęp: 1 września 2011).
- [9] Dobrzyński L., *Energia jądrowa i jej wykorzystanie*, http://alpha.uwb.edu.pl/ludwik/energia_jadrowa/11_en_termojadr.pdf (dostęp: 1 września 2011).
- [10] Sardain P., *Japan-US Workshop on Fusion Power Plants and Related Advanced Technologies with participation of EU*, <http://www-ferp.ucsd.edu/LIB/MEETINGS/0501-USJ-PPS/Sardain.pdf> (dostęp: 1 września 2011).
- [11] Farabolini W., Giancarli L., *PPCS Model AB. Power distribution assumptions and design status*, <http://www.elytt.com/fusion/HCLLABStatusofdesignAL.pdf> (dostęp: 1 września 2011).
- [12] Jezierski G., *Energia jądrowa wczoraj i dziś*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [13] *Wyniki techniczno-ekonomiczne elektrowni „Kozienice” S.A. za 2004 rok*, http://www.elko.com.pl/elkoweb/upload/FILE_7_bf1e04eb21ad442c13ec7064242e3e57.pdf (dostęp: 1 września 2011).
- [14] Taras M., *Perspektywy podaży oraz prognozowania jakości węgla dla celów energetycznych w planach rozwoju Lubelskiego Węgla „Bogdanka” S.A.*, http://www.min-pan.krakow.pl/se/pelne_teksty22/czII/k22_taras_z.pdf (dostęp: 1 września 2011).