

## KONSTRUKTYWISTYCZNA PERCEPCJA WIEDZY CHEMICZNEJ. IMPLIKACJE W ASPEKCIE UKŁADÓW ELEKTROLITYCZNYCH

**Tadeusz Michałowski**

*Politechnika Krakowska*

**Słowa kluczowe:** konstruktywizm, obliczenia komputerowe, termodynamika, układy elektrolityczne.

### **Streszczenie:**

Wiedza naukowa, pojmowana z fizykalnego punktu widzenia, może być otrzymywana na gruncie ujednoczonej teorii, bazującej na matematycznych podstawach, korespondujących z podstawowymi prawami zachowania: fizycznymi (bilanse) i chemicznymi (wyrażenia dla stałych równowagi). Odpowiednie procedury obliczeniowe, przeprowadzone za pomocą programów komputerowych, umożliwiają uzyskanie obiektywnej wiedzy, stwarzają możliwości pobudzenia inicjatywy studentów, działają heurystycznie, realizują konstruktywistyczny model nauczania i pozwalają śledzić to, co niewidzialne w realnym doświadczeniu. Zagadnienie to odniesiono do termodynamicznej analizy układów równowagowych i metastabilnych, przedstawionych szczegółowo w innych artykułach, zamieszczonych w materiałach konferencyjnych. Odnosne zajęcia komputerowe, po odpowiednim przygotowaniu merytorycznym, można realizować w ramach zajęć z chemii ogólnej i analitycznej.

### **I. Wstęp**

W ostatnich latach podejmuje się próby restrukturyzacji programów nauczania chemii pod kątem zwiększenia efektywności procesu kształcenia, realizowanego za pomocą sprzętu komputerowego. Wiąże się z tym zrewidowanie charakteru i treści kursów chemicznych tak, by bardziej odpowiadały one zainteresowaniom studentów, a zdobyta przez nich wiedza okazała się przydatna w ich późniejszej działalności zawodowej, w tym naukowej. Aktualna jest także kwestia umiejętnego włączenia do procesu edukacyjnego tego, co dostarczają np. Internet czy multimedia.

Praktyka pokazuje, iż wiedza oferowana przez nauczyciela nie zawsze odpowiada aktualnym standardom danej nauki. Pojawia się więc potrzeba i możliwość zastąpienia wiedzy subiektywnej wiedzą obiektywną w tych zakresach, gdzie to zobiektywizowanie jest możliwe. Do takich dziedzin nauczania należy chemia, a w szczególności wiedza o układach elektrolitycznych, stanowiąca przedmiot rozważań niniejszego artykułu.

Opanowanie wiedzy i umiejętne posługiwanie się nią w praktyce, połączone z rozwijaniem zainteresowań i kompetencji – to podstawowe cele działalności edukacyjnej, dotyczącej zarówno nauczyciela jak i nauczanych przezeń jednostek: uczniów lub studentów. Obecnie najbardziej znaczącym trendem w edukacji jest konstruktywizm [1,2], zakładający nauczanie polegające na konstruowaniu wiedzy, a nie na transmisji informacji przekazywanej w gotowej postaci [1]. Nauczyciel jest tu organizatorem zajęć edukacyjnych, a wiedza jest konstrukcją, testowaną aktywnie przez umotywowaną w swym działaniu jednostkę [1,3]. Jednostka ta buduje struktury

wiedzy z dostępnych jej informacji cząstkowych, na bazie nabytej uprzednio i indywidualnie przetworzonej wiedzy. Zakłada się przy tym, że wiedza nabyta wcześniej jest kompatybilna z aktualnie przyswajaną, a konstruowanie wiedzy rozpatruje się jako proces adaptacyjny [4], realizowany indywidualnie lub w grupie (konstruktywizm społeczny) [5,6]. Zasady konstruktywizmu są realizowane m.in. w zakresie matematyki i nauk przyrodniczych [7]. Powodzenie procesu nauczania konstruktywistycznego zależy od akceptacji, osobistego zaangażowania, zaufania i zadowolenia zaangażowanych w nim stron; tych to zagadnień dotyczył wprowadzony przez F. Kellera [8] model motywacyjny, zwany później Planem Kellera (*Personalized System of Instruction*, PSI) [9].

Według konstruktywistów (J. Dewey, J. Piaget, J. Bruner, L. Wygotski), każda czynność poznawcza prowadzi do swoistego przekształcania napływających informacji – co oznacza, że wiedza jest konstrukcją testowaną w działaniu. Opanowanie umiejętności rozwiązywania problemów, w połączeniu z interpretacją otrzymanych wyników i refleksją, są ważniejsze od posiadanego zasobu wiedzy. Innymi słowy, największą wartość ma wiedza zdobyta na drodze poszukiwania, tj. osiągana dzięki działaniu i osobistemu doświadczeniu. Wg Piageta, fundamentalną podstawą nauki jest odkrywanie; „rozumieć” znaczy „odkrywać”, a „odtworzyć” oznacza „odkrywać na nowo”. Rozumienie jest budowane, krok po kroku, przez czynne uczestnictwo w rozwiązywaniu problemów.

Konstruktywizm traktuje się także jako filozofię nauki, zapoczątkowanej przez G. Vico (1668–1744) [10], który utrzymywał, że „ludzie mogą jasno rozumieć tylko to, co sami sobie stworzą”. Immanuel Kant (1724–1804) twierdził natomiast, że „w każdej wiedzy jest tyle prawdy, ile w niej matematyki”. Już dawno fizycy zawłaszczyli matematykę na swoje potrzeby, mając niejednokrotnie istotny udział w jej tworzeniu (np. Newton i rachunek różniczkowy). Fizykalne podejście do zagadnień z obszarów różnych nauk polega na ilościowym określaniu obserwowanych zjawisk oraz na precyzyjnym, matematycznym opisie rzeczywistości za pomocą modelu, który pozwala poprawnie przewidywać wyniki doświadczalne [11]. Gdy te warunki są spełnione, zagadnienie to uważa się za podlegające kryteriom naukowym.

## II. Paradygmat naukowy i jego weryfikowalność

Pojęcie paradygmatu, wprowadzone przez T. Kuhna [12], obejmuje pojęcia i teorie tworzące podstawy danej nauki. Paradygmat naukowy powinien: (a) być spójny logicznie i pojęciowo; (b) zawierać tylko pojęcia i teorie niezbędne dla danej nauki; (c) umożliwiać tworzenie teorii szczegółowych, zgodnych z faktami empirycznymi. Paradygmat jest twórczy poznawczo, jeśli za jego pomocą można tworzyć teorie szczegółowe zgodne z danymi doświadczalnymi.

Formalno-logiczna poprawność paradygmatu naukowego i jego wewnętrzna niesprzeczność są weryfikowalne na gruncie matematyki i logiki. Jeśli jakaś teoria ma mieć sens faktyczny, to musi być weryfikowalna.

Z punktu widzenia pozytywizmu logicznego, wymóg weryfikowalności empirycznej zakłada milcząco realność świata materialnego oraz jego racjonalnej, przewidywalnej struktury. Postulat weryfikowalności można odnieść w szczególności do specjacji dynamicznych układów elektrolitycznych redoks, w których wielkościami mierzonymi są:  $pH$  i potencjał  $E$  roztworu, odpowiadające różnym objętościom  $V$  titranta dodanego w trakcie miareczkowania. W układach równowagowych i metastabil-

nych jest to możliwe do przeprowadzenia na drodze obliczeń, bez potrzeby stosowania jonoselektywnych elektrod pomiarowych. Stosowanie takich elektrod jest zresztą ograniczone brakiem elektrod wskaźnikowych względem poszczególnych składników roztworu oraz ograniczoną selektywnością (specyficznością) istniejących elektrod. Stosowanie matryc elektrodowych w połączeniu z chemometryczną obróbką danych stanowi tu częściowe, na ogół niezbyt miarodajne rozwiązanie. W układach kinetycznych, nieznaną fakt, że odpowiednie elektrody reagują na zmiany zachodzące w układzie ze zróżnicowanym opóźnieniem. Na drodze obliczeń symulacyjnych, dotyczących układów metastabilnych, można – przez uwolnienie różnych możliwych ścieżek reakcji – wywołać efekt zmian wielkości mierzalnych, tj.  $E$  oraz  $pH$  roztworu. Przez konfrontację otrzymanych zależności  $E = E(V)$  i  $pH = pH(V)$  z przebiegami odpowiednich zależności, otrzymanymi na drodze doświadczalnej, można wyeliminować z rozważań niektóre ścieżki reakcji oraz związane z nimi składniki. Na tej drodze można również wskazać tworzenie się (względnie nieobecność) określonych form kompleksowych [13]. Są to przykłady adaptacji pojęcia falsyfikowalności [14], wprowadzonego przez Poppera w miejsce weryfikowalności. Przykłady te spełniają ogólne wymogi stawiane przez empiryków, a więc:

- oparcie całej wiedzy na danych empirycznych i odrzucenie wszystkiego co nie znajduje potwierdzenia w faktach empirycznych;
- opisanie tej wiedzy językiem matematyczno-logicznym;
- sprowadzenie wszystkich nauk do fizyki lub przynajmniej zastosowanie w nich technik badawczych i opisu matematycznego, zaczerpniętych z fizyki.

Należy uznać za fakt, że chemia jest nauką ścisłą w obszarze zapożyczonym od fizyków; dotyczy to m.in. termodynamiki chemicznej i chemii kwantowej. Termodynamika chemiczna stosuje metody matematyczne do badania różnych zagadnień chemicznych, np. równowag w roztworach elektrolitów.

Wykresy odpowiednich krzywych  $E = E(V)$  i  $pH = pH(V)$  nie zawsze pokrywają się z punktami doświadczalnymi w stopniu pozwalającym na jednoznaczną ocenę faktograficzną. Źródła ewentualnych rozbieżności tkwią w ograniczonej dokładności, z jaką są wyznaczone wartości użytych stałych równowagi, a z drugiej strony – niedoskonałością wyników otrzymywanych w trakcie pomiarów  $E$  i  $pH$  – zwłaszcza wtedy, gdy podstawowe wymogi dotyczące procedury doświadczalnej nie są spełnione. W tym można doszukiwać się źródeł krytyki falsyfikacji przez Kuhna, który uważał, że niekompletność i niedoskonałość w dopasowaniu danych doświadczalnych do teorii są spowodowane błędami doświadczalnymi, jako immanentnymi właściwościami nauk doświadczalnych.

### III. Teoria schematów

Konstruktywistyczny sposób edukacji odwołuje się m.in. do teorii schematów (*scheme theory*) – pojęcia będącego współczesnym językiem geometrii algebraicznej [15]. Teoria ta zakłada, że wiedza jest zorganizowana, tj. złożona z faktów tworzących spójną całość, o zróżnicowanej strukturze powiązań wewnętrznych. Na gruncie chemii, teoria ta może również pełnić rolę niezwykle skutecznego narzędzia, opartego na schematyzmie percepcji i interpretacji obiektywnych faktów naukowych. Wynika to stąd, że rzeczywistość, pojmowana epistemologicznie, istnieje niezależnie od podmiotu poznającego.

Wiedza, podana w sposób konstruktywistyczny, ma wykształcić zdolność doboru i wykorzystania dostępnych informacji cząstkowych w racjonalny sposób. Wiedzę tę można traktować jako samoregulujący się proces, zachodzący w warunkach redundancji (obfitości) informacji dostarczanej z różnych źródeł. Niezbędne jest tu zastosowanie wstępnej selekcji danych fizykochemicznych oraz ekonomii myślenia, zwanej brzytwą Ockhama (\*). Nie oznacza to bynajmniej upraszczania modelu, gdyż stosowana w odnośnych obliczeniach metoda GATES [16] odnosi się do układów elektrolitycznych o dowolnym stopniu złożoności i nie wymaga żadnych uproszczeń.

Wyniki otrzymane na bazie wypracowanego modelu mogą być skonfrontowane z danymi doświadczalnymi, co w dalszym ciągu stanowi podstawę oceny przyjętego wstępnie modelu. W tym zawiera się również aspekt adaptacyjny w procesie kształcenia.

W rozważanym temacie, konstruktywistyczne nauczanie wspomagane komputerowo wymaga od nauczyciela chemii większej znajomości przedmiotu nauczania niż przy nauczaniu transmisyjnym. Przy realizacji takich zajęć wkracza się bowiem w dziedziny matematyki i informatyki, jednak – z punktu widzenia użytkownika odpowiednich programów – to dodatkowe *quantum* wiedzy jest stosunkowo niewielkie. W obliczeniach dotyczących układów elektrolitycznych przygotowuje się programy, uwzględniające zmiany składu fazowego, co ma istotne znaczenie w odniesieniu do układów dynamicznych, realizowanych np. w trakcie miareczkowania lub rozpuszczania osadu. Jednostka nauczana nie skupia się na procedurze obliczeniowej, sprawdza tylko efekty obliczeń i porządkuje dane, otrzymane, z reguły, przy użyciu iteracyjnych programów komputerowych. Interpretacje danych dokonuje się po ich graficznej obróbce, polegającej na konstruowaniu wykresów na diagramach logarytmicznych lub półlogarytmicznych (\*\*). Następujące po tym formułowanie równań reakcji, będące nieobowiązkowym, ale dydaktycznie pożądanym etapem procesu edukacyjnego, przebiega według określonego schematu, związanego z analizą specjacyjną (specjacja dynamiczna). Korzysta się przy tym z oczywistego faktu, że stężenia składników zużywanych w reakcji maleją, a stężenia powstających produktów reakcji rosną. Na tej podstawie można określić względną efektywność odpowiednich reakcji.

#### IV. Redukcjonizm

Redukcjonizm [17] polega na rozkładaniu skomplikowanych zjawisk na elementy składowe. Oznacza to, że złożone zjawisko rozważa się jako kombinację (superpozycję) zjawisk elementarnych. Przykładem jest rozkładanie złożonych drgań w cząsteczkach na tzw. drgania normalne, tj. dowolne drganie jest superpozycją drgań normalnych. W pracy [18] wykazano, że obowiązujące w układach elektrolitycznych prawa zachowania, wyrażone przez bilanse: ładunkowy, stężeniowe i elektronowy, wynikają z elementarnych praw zachowania, dotyczących elektronów, protonów i pierwiastków chemicznych. Ogólnie, redukcjonizm zakłada, że wszystkie złożone zjawiska (chemiczne, biologiczne), można opisać językiem teorii dotyczącej zjawisk elementarnych.

(\*) sformułowana stwierdzeniem "Istnień nie należy mnożyć ponad potrzebę".

(\*\*) W procesach dynamicznych, diagram półlogarytmiczny zazwyczaj określa zależność logarytmu stężeń odpowiednich składników  $X_i$  od objętości  $V$  lub ułamka zmiareczkowania  $\Phi$ . W diagramach logarytmicznych na obu osiach są logarytmy stężeń,  $pH$  lub  $E$ .

Zjawiska w bardziej złożonych układach, w których występują sprzężenia zwrotne, nie dają się wyrazić jako liniowa kombinacja zjawisk elementarnych; stosuje się wtedy nieliniowe modele kinetyczne.

W filozofii nauki, redukcjonizm polega na badaniu złożonego układu jako realizacji sekwencji następujących czynności, które w odniesieniu do układów elektrolitycznych przedstawiają się następująco [19]:

- (a) wyróżnienie jego fragmentów – tu: wyszczególnienie składników układu (specjacja);
- (b) określenie mechanizmów i sposobu w jaki owe fragmenty się zachowują – tu: sformułowanie wyrażeń na stałe równowagi, które można uważać za atrybuty odpowiednich składników układu;
- (c) opis złożonego z nich układu jako konsekwencji własności wcześniej wydzielonych fragmentów oraz sposobu ich złożenia, stanowiącego strukturę tak utworzonego systemu – tu: sformułowanie bilansów materiałowych: ładunkowego, stężeniowych i elektronowego (ten ostatni formuluje się dla układów redoks) oraz przeprowadzenie stosownych obliczeń z użyciem komputera.

Powstający system, utworzony ze składników wraz z ich atrybutami i nałożoną nań strukturą, wykazuje nowe właściwości, odnoszące się do systemu jako całości.

Stale równowagi rozważane w (b) tworzą bazę dotyczącą wartości stałych fizykochemicznych, otrzymanych na drodze empirycznej. Tylko część z nich jest określona liczbowo z zadowalającą dokładnością i precyzją oraz aktualizowana. Tworzone na ich bazie modele zachowań układów elektrolitycznych (zwłaszcza wielofazowych) są weryfikowalne. Wynikające stąd sądy formalno-logiczne cechuje wewnętrzna niesprzeczność.

Dane fizykochemiczne należy rozpatrywać w kontekście historycznym; modele w tym względzie konstruowano początkowo stosownie do możliwości obliczeniowych. W okresie 'przedkomputerowym', były to często metody ekstrapolacyjne, w których błąd w wyznaczeniu jednej stałej przenosił się na błąd w ocenie innej stałej. Później jednak, gdy metody obliczeniowe nie stanowiły podstawowego problemu, pojawiły się modele nie zawsze akceptowalne ze zdroworozsądkowego punktu widzenia. W ten sposób nagromadziły się dane liczbowe wymieszane ze sobą, z reguły niespójne, odnoszące się do różnych warunków doświadczalnych (temperatura, moc jonowa), wykonywanych różnymi technikami, przy użyciu aparatury o zróżnicowanej jakości. Rodzi to niepewność (nieokreśloność), przekładającą się m.in. na wartości wielkości mierzalnych i współzależności pomiędzy nimi.

W filozofii stosuje się pojęcie zwulgaryzowanych postaci redukcjonizmu. Jego przykładem jest potraktowanie układu (1) metastabilnego lub (2) kinetycznego (w tym układu oscylacyjnego) jako układu równowagowego. W pierwszym przypadku oznacza to, że wszystkie lub część spośród funkcjonujących w procesie rzeczywistym barier aktywacyjnych jest usunięta przez wprowadzenie do bilansów wszystkich (lub części) składników oddzielonych barierami aktywacyjnymi od składników wnoszonych przez substraty. Inną, przeciwną formą zwulgaryzowania problemu jest pominięcie, niekiedy dominujących, składników rozważanego układu. Postępowaniu tego rodzaju przyświeca najczęściej uzyskanie zależności funkcyjnej pomiędzy zmiennymi.

O solidności (*robustness*) przyjętego modelu stanowią tkwiące w nim rezerwy, dopuszczające dokonywanie 'wariacji na temat'. Na przykład, model GATES [16] dopuszcza możliwość włączenia do rozważań efektów związanych ze zmianą mocy jonowej (I) czy temperatury (T), od których zależą wartości stałych równowagi,  $K_i$  –

pod warunkiem, że kształt matematyczny odpowiednich zależności  $K_i = K_i(I, T)$  jest znany. Możliwe jest również sprawdzanie efektów związanych z niepełną lub wątpliwą wiedzą fizykochemiczną o danym układzie [13], czy efektów związanych ze stanem metastabilnym danego układu elektrolitycznego [18]. W programach opracowanych wg GATES zakłada się, że rozważany proces jest *quasi*-statyczny i przebiega w warunkach izotermicznych, w układzie doskonale mieszanym, w nieobecności zewnętrznego pola elektrycznego.

## V. Uwagi końcowe

Informatyka jest postrzegana jako ważny instrument inspirujący konstruktywistyczne podejście do kształcenia w zakresie chemii – zwłaszcza wtedy, gdy komputer jest narzędziem, za pomocą którego realizuje się procedury obliczeniowe. W szczególności, obliczenia matematyczne dotyczące układów elektrolitycznych polegają na sformułowaniu odpowiedniej funkcji i poszukiwaniu jej miejsc zerowych, określanych jako pierwiastki równania. W praktyce obliczeniowej, dotyczącej równań układów, istnieje tylko jeden rzeczywisty pierwiastek takiego równania, określony przez skalar (w przypadku funkcji jednej zmiennej) lub przez wektor o składowych rzeczywistych (\*). Odpowiednie obliczenia realizuje się za pomocą iteracyjnych programów komputerowych. Wspieranie procesu kształcenia przez technologię informacyjną spowodowało powrót zainteresowania problematyką przebiegu procesów poznawczych i rozwój prac nad metodyką nauczania. Zainteresowanie to wzięło się z poszukiwań odpowiedzi na pytanie: jak włączyć komputer do dydaktyki przedmiotowej i wykorzystać go dla podniesienia skuteczności kształcenia.

Twierdzi się, że wprowadzenie komputerów do praktyki pedagogicznej zależy od teorii pedagogicznej, którą wyznaje nauczyciel; są to jednak tylko słowa. Z reguły, nauczyciele traktujący nauczanie jako pedagogicznie uwarunkowany proces transmisji informacji, wykorzystują komputery tak, jak szkolną tablicę o rozbudowanej funkcjonalności. Takie ogólne wrażenie daje ogląd stron internetowych ze slajdami wykonanymi w Power Point. Ich wykonanie można oceniać różnie; wszystko zależy od osobistych uzdolnień prowadzącego zajęcia, od jego inwencji, staranności. Niebagatelne jest również i to, że – z konieczności – wykład taki jest prowadzony w lekko zaciemnionym pomieszczeniu, co zniechęca do notowania, powoduje u słuchaczy stan znużenia i 'odpływania'.

Narzędziami transmisyjnymi są również proponowane w ostatnich latach nowe technologie informatyczne, znane jako nauczanie elektroniczne (*e-learning*, *m-learning*), czyli proces nauczania wspomagany technologią informatyczną (internetową, multimedialną) oraz komplementarne (*b-learning*). Ideę konstruktywistycznego nauczania dostarczają *WebQuest'y* [20], gdzie większość lub całość informacji uzyskanych przez uczące się jednostki pochodzi z Internetu. W aspekcie nauczania chemii, *WebQuest'y* znajdują zastosowanie w opisowych zagadnieniach chemicznych, przedstawianych w różnych opracowaniach w różny sposób. Konstruktywizm wprowadza atmosferę poznawania, wątplenia, a w konsekwencji prowadzi do niezależności po-

---

(\* Idea ta jest o wiele prostsza niż rozwiązywanie równań Schrödingera, których się *de facto* nie rozwiązuje na studiach chemicznych (może poza przypadkami szczególnymi, jak np. cząstka w pudle), ale jakimi epatuje się już uczniów szkół średnich, którzy rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych nie doświadczali.

znawczej

i wypracowywania własnego punktu widzenia na dane zagadnienie. Przede wszystkim jednak może przyczynić się do świadomego uczenia się, bo świadome uczenie się może się wyłonić tylko z aktywności (działania). Wypracowany tu punkt widzenia może być, w niektórych aspektach, konfrontowany z wiedzą uzyskiwaną na podstawie obliczeń komputerowych ('wariacje na temat'), co stanowi podstawę dalszych refleksji. Zdobywana wiedza jest trwała, w odróżnieniu od wiedzy polegającej na zapamiętywaniu faktów.

#### Bibliografia:

- [1] F.C. Lunenburg, *Journal of Instructional Psychology*; **25**(2) (1998), 75-81.
- [2] K.C. de Berg, *Foundations of Chemistry*, **8**(2) (2006), 153-176.
- [3] O.R. Anderson, *Science Education*, **81**(1), (1997), 67-89.
- [4] Z. Own, *International Journal of Science and Mathematics Education*, **4**(1) (2006), 73-96.
- [5] R. DeVries, *New Ideas in Psychology*, **18**(2-3), (2000), 187-213.
- [6] D.R. Geelan, *Science & Education*, **6**(1-2), (1997), 15-28.
- [7] C.T. Fosnot (ed.), *Constructivism: Theory, Perspectives, and Practice*, New York: Teacher's College Press, Columbia University, 1996.
- [8] F.S. Keller, *Journal of Applied Behaviour Analysis*, **83** (1968), 179-189.
- [9] R. Silberman, *J.Chem.Educ.*, **55** (1978), 97-98.
- [10] J. Mali, *History of European Ideas* **21**(2), (1995), 287-290.
- [11] A. Białas, *Medycyna Praktyczna*, 6 (100)/99.
- [12] T. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1962.
- [13] T. Michałowski, A. Lesiak, *Chem.Anal.(Warsaw)*, **39** (1994), 623-637.
- [14] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_naukowa](http://pl.wikipedia.org/wiki/Metoda_naukowa)
- [15] D. Eisenbud, J. Harris, *The Geometry of Schemes*, GTM, Springer 2000.
- [16] T. Michałowski, *Obliczenia w chemii analitycznej z elementami programowania komputerowego*, Wyd. PK, Kraków 2001.
- [17] H. Andersen, *Endeavour*, **25**(4), (2001). 153-156.
- [18] T. Michałowski, A. Pietrzyk, w: *Chemometrics: Methods and Applications* (ed. D. Zuba, A. Parczewski), Kraków 2006, pp. 415-422.
- [19] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Redukcjonizm>
- [20] <http://en.wikipedia.org/wiki/WebQuest>