

Łódź, 20 września 2016 roku

prof. dr hab. inż. Krzysztof Jóźwik
Instytut Maszyn Przepływowych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Łódzka

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Gila p.t. „*Wpływ parametrów geometrycznych generatora strugi syntetycznej na efektywność chłodzenia w aspekcie zastosowań w urządzeniach technicznych*”

wykonanej pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Piotra Strzelczyka, prof. PRz
oraz promotora pomocniczego dr inż. Zygmunta Szczerby

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki
Rzeszowskiej z dnia 18.07.2016 r. (pismo RM-530-04-02-2016)

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została oceniona według pięciu kryteriów:

1. Wybór tematu, cel i zakres rozprawy.
2. Teza naukowa i oryginalność rozprawy.
3. Metodyka badań.
4. Krytyczna analiza treści rozprawy.
5. Ocena formalnej strony rozprawy.

Wybór tematu, cel i zakres rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Gila poświęcona jest badaniom generatora strugi syntetycznej, w szczególności mającym na celu określenie możliwości zastosowania takiego generatora do chłodzenia w urządzeniach technicznych. Struga syntetyczna, najprościej ujmując, powstaje w efekcie oddziaływania drgającej powierzchni w ograniczonej objętości na płyn, wywołując jego ruch w przestrzeni poza obszarem tejże ograniczonej objętości. Generatory strugi syntetycznej to urządzenia, w których wywoływane są drgania membran, a to w efekcie wywołuje strugę akustyczną. Istotnym, a właściwie podstawowym zagadnieniem wpływającym na parametry strugi syntetycznej jest geometria i właściwości generatora. W przedstawionej do recenzji rozprawie podjęto się określenia wpływu parametrów geometrycznych generatora strugi syntetycznej na właściwości strugi syntetycznej i parametrów funkcjonalnych, które można wykorzystać w technice. W tym wypadku skupiono się na określeniu wpływu parametrów geometrycznych na efektywność

chłodzenia i możliwość wykorzystania generatorów strugi syntetycznej, a właściwie wygenerowanej w nich strugi syntetycznej do chłodzenia w urządzeniach technicznych.

Podjęta w rozprawie tematyka wydaje się istotna z punktu widzenia poprawności pracy różnych układów elektronicznych, w których ograniczenia przestrzeni utrudniają efektywność chłodzenia przy zastosowaniu, można nazwać, tradycyjnych metod. Jest to więc zagadnienie aktualne i istotne ze względów poznawczych i aplikacyjnych, a jego poprawna realizacja umożliwi konstruowanie generatorów strug syntetycznych efektywnych dla zastosowań chłodniczych.

Do sformułowanego na stronie 22 celu pracy – jakim jest zbadanie wpływu parametrów geometrycznych i eksploatacyjnych generatora strugi syntetycznej na sprawność generatora strugi syntetycznej, efektywność chłodzenia oraz współczynnik przejmowania ciepła przy chłodzeniu uderzeniowym – Autor podał zakres niezbędnych prac koniecznych zrealizowania celu i weryfikacji tez dysertacji. Zakres ten obejmował:

- wykonanie modułowego generatora strugi syntetycznej wraz z zasilaczem,
- opracowanie programu komputerowego generującego sygnał sinusoidalny,
- opracowanie programu komputerowego do akwizycji i analizy danych pomiarowych z karty pomiarowej i multimetrów,
- zaprojektowanie i wykonanie stanowiska do pomiaru prędkości płynu, współczynników przejmowania ciepła oraz wizualizacji strugi syntetycznej,
- opracowanie metodyki badań pól prędkości w bliskim i dalekim polu oraz wymiany ciepła strugą syntetyczną,
- opracowanie metody wizualizacji strugi syntetycznej.

Podjęta przez Doktoranta problematyka badawcza mieści się w aktualnym obszarze zainteresowania przemysłu i jest interesująca również pod względem poznawczym. Tym samym stwierdzam, że problematyka jest dysertabilna i można ją zakwalifikować do dyscypliny Budowa i eksploatacja maszyn.

Teza naukowa i oryginalność rozprawy

Po krótkim omówieniu zjawiska generowania strugi syntetycznej i zaprezentowaniu przeglądu literatury w zakresie badań strugi syntetycznej, Autor sformułował dwie tezy naukowe pracy o następującej treści:

- Przy wykorzystaniu strugi syntetycznej do rozpraszania ciepła, generator strugi syntetycznej powinien pracować przy częstotliwości rezonansowej głośnika lub Helmholtza, ponieważ powinien wówczas osiągać lokalne maksimum liczby Nusselta i efektywności chłodzenia;
- Liczba Reynoldsa strugi syntetycznej jest jedynym parametrem, od którego zależy konwekcyjna wymiana ciepła.

Należy założyć i uznać, że druga z podanych tez jest ściśle związana z zakresem realizowanej pracy i nie ma charakteru tezy uogólnionej. W tym miejscu należy podkreślić także, że dokonany przegląd literatury nie jest podsumowany wnioskami, a także nie wynika z niego potrzeba kontynuacji badań i w jakim zakresie taka kontynuacja powinna być prowadzona. W podrozdziale omawiającym cel i tezy pracy wspomina się o kontynuacji

i rozszerzeniu badań Chaudhariego i jego zespołu. W tym też miejscu pojawia się dokładne rozróżnienie zakresu badań realizowanych w dysertacji od innych opisanych w literaturze.

Tezy pracy budzą nadzieje i poprawna jej realizacja stanowić będzie oryginalny wkład zarówno w obszar aplikacyjny, jak i poznawczy dyscypliny Budowa i eksploatacja maszyn.

Metodyka badań

Doktorant w pracy przeprowadza serie badań eksperymentalnych wykorzystując do tego skonstruowane i wykonane stanowiska badawcze. Dla realizacji zakresu pracy skonstruowano i wykonano model generatora strugi syntetycznej, który umożliwia modyfikację geometrii komory i dyszy generatora. Do zasilania generatora użyto układu przetwarzającego sygnał cyfrowy na sygnał analogowy. Po stronie cyfrowej wykorzystano środowisko LabVIEW, w którym przygotowano program generujący sygnał sinusoidalny o zmiennej częstotliwości. Po stronie analogowej wykorzystano także wzmacniacz sygnału, aby uzyskać odpowiedni poziom napięcia zasilającego układ głośnika (membrana głośnika stanowi element wymuszający ruch płynu).

Podstawą realizacji pracy jest eksperyment. To niezwykle cenne, że w dobie modelowania i symulacji realizuje się jeszcze prace eksperymentalne. Jest tym bardziej cenne, że zakres badań przedstawiony w opisie dotyczy wielu parametrów i określenia ich wpływu na wielkości określające skuteczność i funkcjonalność badanego układu. Biorąc pod uwagę możliwości eksperymentu, można byłoby spodziewać się większej liczby punktów pomiarowych w celu ustalenia wpływu poszczególnych parametrów badanych na obserwowane zjawiska. Sprowadzenie w wielu przypadkach liczby punktów pomiarowych do trzech nie pozwala skutecznie (najczęściej) na wyznaczenie trendów. Co więcej, zarejestrowane zmiany nie pozwalają na wieloparametrową modyfikację układu i przewidywanie skutków takich zmian.

Proponowana metodyka nie budzi większych zastrzeżeń, choć można zadać dlaczego przyjęto $1/\sqrt{3}$ w celu określenia niepewności przyrządów pomiarowych, a nie $1/3$. Brakuje także wyraźnego uzupełnienia o słowo „względne” dla odchylenia standardowego. Zwyczajowo, odchylenie standardowe określane jest w jednostkach miary identycznych z jednostkami wielkości, której odchylenie dotyczy. W recenzowanej pracy brakuje rozróżnienia tych pojęć i stosuje się zamiennie to samo określenie dla odchylenia standardowego i względnego odchylenia standardowego.

Krytyczna analiza treści rozprawy

W wykazie stosowanych oznaczeń, a konsekwentnie w pracy, podano zwyczajowo używany dla dowolnej wielkości fizycznej symbol przyrostu Δ jako oznaczenie amplitudy drgań membrany. W tym samym wykazie podano symbol odchylenia standardowego bez przypisania wielkości fizycznej, choćby w postaci ogólnego jej symbolu. Nie podano jednostki, ani też przypisania jednostki z jednostką wielkości fizycznej, dla której odchylenie jest wyznaczane. W konsekwencji, o czym wspomniałem powyżej, symbol ten użyto w pracy zarówno dla wartości bezwzględnych, jak i względnych odchylenia standardowego. W pracy użyto symbolu S_r dla określenia liczby Strouhala. Zwyczajowo używa się oznaczeń Sh lub St .

W recenzowanej pracy ten ostatni mógłby stanowić niejasność w obliczu użycia oznaczenia Stk dla liczby Stokesa.

Rozdział 1

W podrozdziale 1.2 (str. 12) mówi się o równym polu powierzchni użytych dysz, ale nie wskazano, jakiego pola dotyczą rozważania. Oczywiście, domyślnie należy przyjąć pole przekroju poprzecznego, przez który przepływa czynnik. Ponownie brak wyraźnego zdefiniowania pola powierzchni występuje na stronie 17, a dotyczy to omawiania prac Jing-Zhou i innych. W tym samym podrozdziale na stronie 13 omawiając pracę Crook'a i innych podano trzy wartości bezwymiarowej długości dysz, a określa się to jako zakres. Na stronie 19 podrozdziału (dotyczy prac Lee i innych) mówi się o szerokości dyszy i podaje się jej wartość. Czy była to dysza o przekroju poprzecznym w kształcie kwadratu?

Rozdział 2

W podrozdziale 2.1 w pierwszym zdaniu mówi się o modelu generatora. Wydaje się, że skonstruowano generator modelowy, a nie jego model. Na stronie 25 w opisie geometrii dysz widnieje „... wszystkie dysze w tej pracy zostały wykonane jako proste (ostre) o promieniu krawędzi, 0,2 mm.” Zaokrąglenie wyklucza stwierdzenie dotyczące ostrości krawędzi, chyba że doktorant miał w tym miejscu na myśli inny fragment konstrukcji dyszy.

Autor nie odnosi się w tekście do rysunków 2.2.3 oraz 2.2.5 – czy są więc istotne dla pracy?

W podrozdziale 2.3 na stronie 31 podaje się wpływ zmiany temperatury o $1^{\circ}C$ na błąd pomiaru i wyraża się go w procentach. Oczekiwałbym, aby podczas publicznej obrony Doktorant odniósł się do pojęć błędu, błędu względnego, wartości rzeczywistej wielkości mierzonej i relacji pomiędzy błędami a tą wartością.

Na stronach 32 i 33 podaje się wartość częstotliwości próbkowania wyrażając ją jako np. 36 próbek na 1 Hz. Nie bardzo rozumiem taki sposób podawania częstotliwości próbkowania. Czy dla podanego przykładu oznacza to próbkowanie co 36 s?

Przy omawianiu stanowiska do wizualizacji (podrozdział 2.6, strona 41) stwierdzono „W przypadku płynów nieściśliwych wykorzystuje się przede wszystkim elementy znaczone, natomiast ...”. Co Autor miał na myśli pisząc o elementach znaczonych?

W podrozdziale 2.7 dotyczącym analizy niepewności pomiaru stwierdza się „... wynik pomiaru jest zawsze różny od prawdziwej jej wartości”. Trudno się zgodzić z ostrością stwierdzenia, a szczególnie z ostrym wykluczeniem równości wartości będącej rezultatem pomiaru i wartości rzeczywistej wielkości mierzonej. Ta druga jest wielkością nieznaną, więc może się zdarzyć, że zachodzi równość pomiędzy tymi dwoma.

Prosiłbym o wytłumaczenie, co dla Doktoranta oznacza stwierdzenie maksymalna niepewność, które pojawia się na stronie 45.

Rozdział 3

Na stronie 50 w podrozdziale 3.1 pojawia się stwierdzenie „Sprawność generatora strugi syntetycznej jest to moc kinetyczna (mechaniczna) strugi syntetycznej obliczona z prędkości po pędzie odniesiona do mocy elektrycznej dostarczonej do generatora strugi syntetycznej.” Język zdania jest raczej slangiem, a określenia mocy z podziałem na kinetyczną (mechaniczną) i elektryczną dość zaskakujące.

W podrozdziale 3.2 na stronie 51 podaje się wartość wynoszącą około, a definiuje się przedział zmian wartości – dotyczy to wartości radiacyjnego współczynnika przejmowania ciepła.

Rozdział 4

Na stronie 58 znajduje się zdanie „*W tej pracy morfologię strugi syntetycznej wykonano dla zmiennej liczby Reynoldsa i stałej liczby Stokesa.*” Proszę o wyjaśnienie możliwości wykonania morfologii i co Doktorant ma na myśli używając pojęcia morfologia.

Rozdział 5

Na stronie 59 mówi się o porównaniu wyników pomiarów i obliczeń z danymi literaturowymi. Jako jeden z celów takiego porównania wyróżnia się sprawdzenie poprawności pomiaru danej wielkości fizycznej na nowym stanowisku pomiarowym. Jak Doktorant wyobraża sobie możliwość weryfikacji poprawności pomiaru poszczególnych wielkości fizycznych w oparciu o wyniki uzyskane na innym stanowisku i przy użyciu najprawdopodobniej innych przyrządów pomiarowych.

W podrozdziale 5.2 na stronie 67 pojawiają się dość dziwne jednostki: 200 S/Hz oraz 20 kS/s. Jak podane jednostki uzyskać z iloczynu potęgowego jednostek podstawowych układu SI?

W podrozdziale 5.3 na stronie 69 mówi się o niepewności pomiaru strumienia objętościowego wyrażonej w procentach. Proszę, aby Doktorant wyjaśnił to pojęcie i jego jednostkę. W tytule podrozdziału 5.3 mówi się o pomiarach liczby Nusselta (traktując, że to jest pomiar pośredni określenie to można uznać za poprawne), ale na stronie 69 czytelnik zostaje przekierowany do rozdziału 8 w celu uzyskania informacji o zmienności liczby Nusselta w funkcji bezwymiarowej odległości od dyszy. Powoduje to nieuporządkowanie w pracy i prezentacji wyników.

Na stronie 70 stwierdzono „*Dane eksperymentalne własne porównano z danymi eksperymentalnymi innych autorów i uzyskano zbieżność $\pm 10\%$. Można zatem wnioskować o poprawności pomiaru współczynnika przejmowania ciepła oraz liczby Nusselta.*” Wniosek powyższy jest nieuprawniony, a sposób wyznaczenia zbieżności zakłada jedynie postać funkcji liniowej tylko ze współczynnikiem kierunkowym.

Rozdział 6

Zamieszczone na rysunku 6.1.3 (podrozdział 6.1, strona 73) proste ograniczające zbiór danych pomiarowych, wskazujące na różnicę w wartościach współczynnika kierunkowego $\pm 20\%$ nie obejmują wszystkich punktów pomiarowych. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego przyjęto jako poprawną właśnie tę wartość.

W podrozdziale 6.2 na stronie 80 (od góry) podaje się wartość maksymalną współczynnika przejmowania ciepła wynoszącą $h_o = 132 \text{ W/m}^2\text{K}$, natomiast dwie linijki dalej podaje się wartość $h_o = 133 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dość trudno zgodzić się z takim stwierdzeniem, chyba że Autor używa skrótów myślowych niezrozumiałych dla jasnego i pełnego wyjaśnienia zjawisk.

Również niejasne wydaje się być uzasadnienie osiągnięcia maksymalnej wartości liczby Nusselta dla większych wartości bezwymiarowej długości walca (strona 81, pierwszy akapit pod rysunkiem 6.2.14). W takiej sytuacji dotyczyłoby to także dyszy o średnicy 15 mm.

Na rysunkach 6.2.16 oraz 6.2.17 pokazano wyniki pomiarów dla trzech wartości średnicy dyszy. Na tej podstawie wyciągnięto wnioski wskazujące na zachowanie liczby Reynoldsa i sprawności generatora strugi w funkcji tejże średnicy dyszy. Wobec tak małej liczby

zbadanych średnic dysz wnioskowanie wydaje się nieuprawnione i obarczone niepewnością. Podobnie wnioskuje się dla dalszych wielkości (strona 83).

W podrozdziale 6.3 (strona 85) podaje się, że nie jest oczywisty wpływ średnicy dyszy i/lub niepewności pomiaru na uzyskane różnice w wartościach prędkości skutecznej. Wydaje się, że oszacowane wartości niepewności mogą jednoznacznie wykluczyć lub wskazać wpływ średnicy dyszy.

Na tej samej stronie podaje się wartości przyrostów względnych prędkości skutecznej przy względnej zmianie wartości średnicy dyszy. Łatwo zauważyć, że jest to zależność liniowa. Jednakże, operacje na wartościach procentowych nie powinny wskazywać na charakter zjawisk.

W dalszych rozważaniach na tej samej stronie mówi się o maksymalnych wartościach prędkości maksymalnej i mówi się o konkretnych wartościach w dziedzinie częstości jako maksimach lokalnych. Przytoczone w pracy wartości dotyczą wartości maksymalnych w całym badanym obszarze, a dodatkowo występują kolejne lokalne piki wartości prędkości maksymalnej.

Trudno również zgodzić się z wnioskiem dotyczącym analizy rysunku 6.3.6 (strona 87). Zmiany poziomu turbulencji zachodzą dla różnych częstości w zależności od średnicy dyszy.

Rysunek 6.3.10 (strona 89) nie został omówiony w tekście pracy.

W podrozdziale 6.4 na stronie 94 wskazuje się dwie różne wartości częstości rezonansowej Helmholtza dla komory o największej głębokości (225 Hz i 222 Hz).

Rysunki 6.4.2 oraz 6.4.3 przywołuje się w pracy, ale nie są one poddane jakiegokolwiek analizie.

W podrozdziale 6.5 na stronie 104 zamieszczono rysunek 6.5.3, który nie został w jakikolwiek sposób wzmiankowany w tekście.

Podana na stronie analiza danych zamieszczonych na rysunku 6.5.11 i wnioski zamieszczone na stronie 107 wydają się błędne. Widoczny jest wyraźny wpływ wartości napięcia zasilającego na wartości współczynnika przejmowania ciepła, a Autor podaje niezależność tej wartości od napięcia.

Na stronie 109 (w dziewiątej linijce od dołu strony) podaje się odniesienie do wykresów znajdujących się poniżej. Do końca strony nie ma jakiegokolwiek wykresów.

Wniosek ... *trzecie lokalne maksimum współczynników przejmowania ciepła pojawia się, gdy iloraz długości walca i odległości osiowej wynosi około 0,4.*” Wniosek ten wydaje się nieuzasadniony i trudno go sformułować na podstawie uzyskanych wyników (patrz rys. 6.6.3).

We wnioskach do podrozdziału 6.7 (strona 117) podaje się, że występuje dla stałej liczby Reynoldsa wpływ liczby Stokesa na współczynniki przejmowania ciepła. Czy wpływ ten jest jakościowo podobny dla różnych wartości liczb Reynoldsa?

W rozważaniach dotyczących modelowania zmiennego w czasie przepływu powietrza w długim kanale o przekroju kołowym należałoby uwzględnić prace prof. Z. Kazimierskiego i prof. J. Ciepluchy (dotyczy rozważań ze strony 118, podrozdział 6.8).

Rozdział 7

Na stronie 132 wskazano, że nie uwzględnia się kilku punktów, które zaliczono do obszaru, w którym nie ma strugi syntetycznej, a wskazują one na konwekcję wymuszoną. Jak zauważył Autor, granica została określona jako umowna, a więc może to być wartość

przybliżona. Może w takiej sytuacji lepiej mówić o obszarze przejściowym, podobnie jak ma to miejsce przy turbulizacji przepływu.

Na stronie 134 stwierdza się, że dokonano ubezwymiarowania liczby Nusselta. Liczba Nusselta jest liczbą bezwymiarową, a zastosowany w pracy zabieg można nazwać normalizowaniem.

Rozdział 9

We wnioskach stwierdza się, że generatory strugi syntetycznej dają porównywalną efektywność chłodzenia do stosowanych obecnie wentylatorów (stosowanych do chłodzenia elementów elektronicznych, np. w komputerach), a jedynie ich ciężar i gabaryty, będące dużo większymi, nie dają możliwości ich stosowania. A czy sprawność tych generatorów nie jest znacząco mniejsza?

Rozdział 10

Na stronie 147 mówi się o „*opracowaniu morfologii*”. Jak można opracować morfologię?

W dalszej części na tej stronie podaje się efektywność chłodzenia wynoszącą maksymalnie około 1141%. Jak można mówić około i podawać wartość z tak dużą liczbą miejsc znaczących?

Sformułowanie na stronie 148 mówiące o częściowym potwierdzeniu drugiej tezy pracy jest niefortunnie zapisane i wskazuje raczej na brak potwierdzenia tej tezy.

Należy dodać jeszcze jedną uwagę uogólniającą przedstawiony sposób analizy uzyskanych wyników. W dużej mierze ogrom wykonanej pracy, zbiór danych eksperymentalnych i wyników opracowania zrealizowanych pomiarów mogłyby być podstawą głębszej analizy. Wielokrotnie w pracy można znaleźć raczej sprawozdawczy charakter opisu uzyskanych wyników niż analityczne podejście do ich prezentacji, bez próby wyjaśnienia zachodzących zjawisk i przyczyn określonego wpływu badanych parametrów na badane zjawiska.

Ocena formalnej strony rozprawy

Licząca 161 stron praca składa się z 10 rozdziałów, spisu literatury, spisu oznaczeń i zawiera 137 pozycji cytowanych źródeł literaturowych oraz stron internetowych (w znamienitej mniejszości). Praca napisana jest językiem często kolokwialnym, a nawet slangowym. Występują bardzo liczne błędy interpunkcyjne i stylistyczne, a także struktury zdań (np. brak orzeczenia). W wielu miejscach występują tzw. „wdowie” tytuły rozdziałów (tytuł rozdziału i bez jakiegokolwiek tekstu, podrozdział). Występuje wiele miejsc pustych, które mogłyby być wypełnione tekstem po przeniesieniu go z dalszych stron. Praca zawiera powtórzenia tekstu lub jego części w podrozdziałach omawiających wpływ poszczególnych parametrów. W wielu miejscach pracy użyto słowa własność zamiast właściwość.

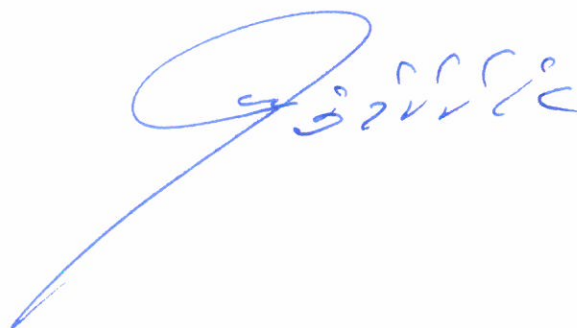
Podsumowanie

Pomimo mankamentów i braku analitycznego sposobu przedstawienia wyników pracy uznaję, że mgr inż. Paweł Gil w Swojej rozprawie doktorskiej zawarł istotne osiągnięcia wynikające ze zrealizowanych badań. Zaliczam do nich opis struktury przepływu strugi

syntetycznej i weryfikacji warunku jej powstawania. Niezwykle istotne jest także wykazanie przez Doktoranta, że struga syntetyczna może w wyznaczonych przez Niego granicach intensyfikować wymianę ciepła. Bardzo duży materiał zgromadzony podczas badań pozwoliłby pewnie na wyznaczenie większej liczby wniosków, jak i pytań do wyjaśnienia, aby można precyzyjnie określić możliwości i sposoby konstruowania generatorów strugi syntetycznej do konkretnego zastosowania.

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska posiada istotny ładunek wiedzy praktycznej. Temat pracy odpowiada zawartej w niej treści. Na podstawie analizy treści pracy doktorskiej uważam, że cel naukowy został osiągnięty, a tezy naukowa zostały udowodnione w stopniu wystarczającym.

Biorąc pod uwagę całość pracy stwierdzam, że Autor rozwiązał problem naukowy związany z budową i eksploatacją maszyn. Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Gila spełnia kryteria określone Ustawą¹ w sprawie trybu i warunków przeprowadzania przewodów doktorskich i może być dopuszczona do publicznej obrony.



¹ Ustawa „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz.U. nr 65 poz. 595 z dn. 14 kwietnia 2003 r. z późniejszymi zmianami)