

DOI:10.5604/20830157.1109376

# OPTIMALIZACJA GEOMETRII GŁOWICY TNĄCEJ OBRABIARKI WATER-JET Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

**Maciej Szczepanik**

Politechnika Śląska, Katedra Budowy Maszyn

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono proces optymalizacji postaci geometrycznej głowicy tnącej obrabiarki water-jet z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Workbench. Celem badań było sprawdzenie jaki wpływ mają zmiany poszczególnych wymiarów na zmianę parametrów przepływu strugi wodno-ścierniej. Analiza statystyczna wyników pozwoli ograniczyć stopień skomplikowania modelu w późniejszych badaniach zbiorczych poprzez pominięcie nieistotnych parametrów.

**Słowa kluczowe:** Optymalizacja, MES, obróbka wodno-ścierna, parametry geometryczne

## GEOMETRY OPTIMIZATION OF WATER-JET MACHINE CUTTING HEAD USING FINITE ELEMENT METHOD

**Abstract.** The article presents optimization process of water-jet cutting head geometry using ANSYS Workbench software. The aim of study was to examine influence of specific dimensions on output abrasive stream flow parameters. Statistical analysis of the results will help to reduce the complexity of the model in the later studies by omitting irrelevant parameters.

**Keywords:** Optimization, FEM, water-jet machining, geometry parameters

### Wstęp

Obróbka metodą wodno-ścierną wykorzystywana jest w przemyśle przez prawie 20 lat. Jest to niekonwencjonalna metoda obróbki, w której ziarna materiału ściernego w wysoko ciśnieniowym strumieniu wody uderzają w przedmiot obrabiany powodując jego erozję. W procesie tym cząstki ścierniwa, takiego jak granat lub krzemionka są porywane przez strumień wody pod wysokim ciśnieniem i przyspieszane do osiągnięcia pożądanych parametrów obróbki.

### 1. Założenia modelu

Modelem wykorzystanym w trakcie badań jest dysza wodna, w skład której wchodzi korpus, kamień śpiętrzający wraz z mocowaniem oraz fragment kanału doprowadzającego i dodatkowa przestrzeń reprezentująca powietrze.

#### 1.1. Analiza przepływu

Większość podobnych badań zakłada uproszczenie polegające na zmianie własności płynu na uśrednione udziały proporcjonalne wody oraz ścierniwa. Generalnie najprostszą metodą jest zmiana masy molowej oraz gęstości wody, aby symulowała ona zawartość cząstek ściernych. W ramach analiz zastosowano odmienne podejście polegające na modelowaniu 3 faz:

- Wody – faza ciągła (główna i najważniejsza faza odpowiedzialna za transport materiału),
- Ścierniwa – faza rozproszona cząstek stałych. Przyjęto, że ścierniwem jest granat (almandyn –  $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ) o masie molowej 497,6 g/mol oraz gęstości 4 g/cm<sup>3</sup>. Twardość w skali Mohsa wynosi 7 - 7,5 ale w badaniach przepływowych nie jest ona specjalnie istotna. Wartość ta jest jedną z podstawowych parametrów podczas modelowania erozji. Cząstki ścierniwa mają określoną średnicę 0,07 mm oraz współczynniki kształtu równym 0,
- Powietrza – faza rozproszona cząstek płynu. W oprogramowaniu ANSYS CFX niemożliwe jest zasymulowanie ruchu cząstek stałych używając dwóch faz ciągłych. Przyjęto więc, że po wyjściu z dyszy, struga wodno-ścierna znajduje się w przestrzeni wypełnionej cząsteczkami powietrza o średnicy 1 μm.

Jako, że w analizach tych nie uwzględniamy zmian temperatur wszystkie fazy posiadają jednakową temperaturę 25°C, a parametry wody jak i powietrza ustalone zostały właśnie dla tej temperatury odniesienia. Pomiędzy fazami woda – powietrze

zadano także istnienie napięcia powierzchniowego równego  $72 \cdot 10^{-3}$  N/m, czyli wartości napięcia w temperaturze 25 °C.

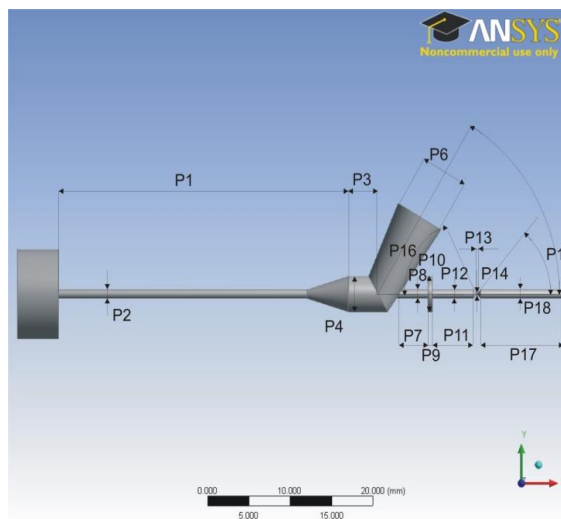
Najważniejsze warunki brzegowe przyjęte podczas analizy oparte są na rzeczywistych parametrach obróbki, tj:

- Woda podawana pod ciśnieniem 500 MPa, z założoną turbulencją na poziomie 5%,
- Ścierniwo podawane z prędkością 158,1 m/s, natężeniem przepływu na poziomie 15 g/s, liczba podanych cząstek ścierniwa – 250 z jednorodnym rozkładem na całej powierzchni warunku brzegowe. Liczba ta w analizie w stanie ustalonym jest ogólną liczbą podanych cząstek, a w stanie nieustalonym liczbą cząstek podawanych na sekundę.
- Na wyjściu panuje ciśnienie odniesienia 1 atmosfery.
- Sama analiza została wykonana dla 50 iteracji.

Warunki brzegowe, ustawienia siatki oraz założenia analizy zostały dobrane w oparciu o wcześniej wykonane prace badawcze [2, 4, 5].

#### 1.2. Parametryzacja geometrii

Geometria głowicy została wykonana w module ANSYS Geometry. Jako, że w przypadku przeprowadzonych badań nie zajmujemy się analiza wytrzymałościową lecz przepływową wystarczające jest zamodelowanie wewnętrznej części kanałów głowicy. Przedstawione zostało to na rysunku 1.



Rys. 1. Geometria głowicy tnącej z zaznaczeniem analizowanych parametrów

Wszystkie wymiary geometryczne zostały sparametryzowane, ich wykaz oraz dopuszczalne zakresy zmienności zostały przedstawione w tabeli 1. W kolumnie uwagi zostały zdefiniowane dodatkowe ograniczenia poszczególnych wymiarów, zapobiegają one powstaniu błędów geometrii, a w szczególnych przypadkach przerwaniu obliczeń. Parametry te można podzielić na 4 podgrupy:

- P1 – P2 – parametry związane z rurką skupiającą,
- P3 – P6 – parametry związane z komorą mieszania,
- P7 – P10 – parametry związane z kanałami doprowadzającymi,
- P11 – P18 – parametry związane z dyszą wodną.

Tabela 1. Tabela zdefiniowanych parametrów oraz ich ograniczeń

Nr	Nazwa parametru	Zakres zmienności	Uwagi
P1	Długość rurki skupiającej	20 – 100 mm	-
P2	Promień rurki skupiającej	0,25 – 1,95 mm	P2 ≠ P4
P3	Długość komory mieszania	1,5 – 10 mm	1,5 ≤ P3
P4	Promień komory mieszania	1,4 – 6 mm	1,3 < P4 ≤ 6
P5	Kąt komory mieszania	45 – 90°	45 ≤ P5 ≤ 90
P6	Promień wlotu ścierniwa	1 – 6 mm	P6 ≤ 6
P7	Długość kanału do komory mieszania	3 – 10 mm	3 ≤ P7
P8	Promień kanału do komory mieszania	0,1 – 1,9 mm	0,1 ≤ P8 < 2 P8 ≠ P10, P8 < P4
P9	Długość szczeliny powietrznej	0,2 – 4 mm	0,2 ≤ P9
P10	Promień szczeliny powietrznej	0,2 – 4,4 mm	P10 < 4,5 P10 ≠ P8
P11	Długość dyszy wodnej	1 – 10 mm	-
P12	Promień dyszy wodnej	0,25 – 1 mm	P12 ≥ P14
P13	Długość kryzy	0,1 – 1 mm	-
P14	Promień kryzy	0,1 – 0,49 mm	P14 < 0,5
P15	Kąt wejścia do kryzy	10 – 90°	-
P16	Kąt wyjścia z kryzy	10 – 90°	-
P17	Długość kanału dolotu wody	5 – 20 mm	-
P18	Promień kanału dolotu wody	0,2 – 1 mm	P18 ≥ P14

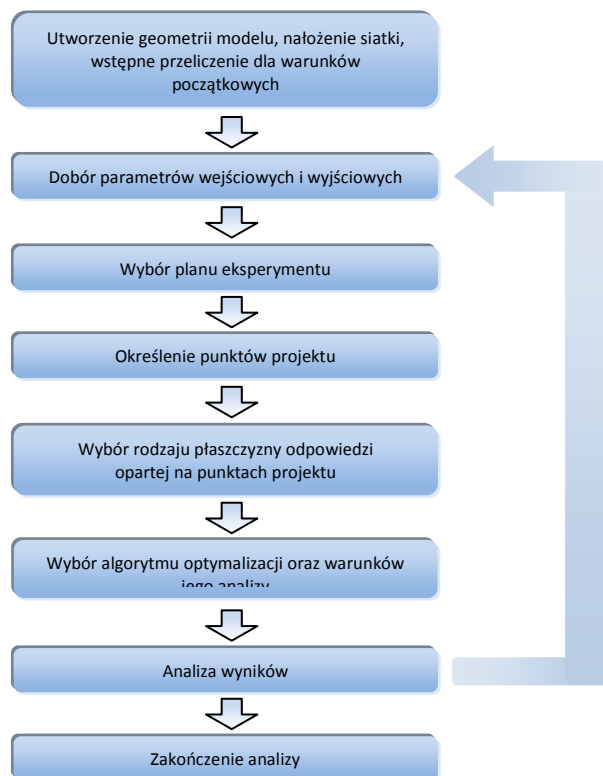
Pomiar wartości wyjściowej dokonywany jest na granicy rurki skupiającej oraz przestrzeni reprezentującej powietrze. Reprezentuje to prędkość strugi wodno-ścierniej po wyjściu z głowicy, a co za tym idzie jej zdolność cięcia materiału.

### 1.3. Algorytm optymalizacji

Niezależnie od użytego planu eksperymentu poszukiwanie ekstremum dokonywane jest w dwóch etapach. Najpierw w oparciu o zakresy zmienności parametrów wejściowych utworzone zostają punkty projektu, w których dokonywane jest przeliczenie matematyczne modelu. W kolejnym kroku na wyliczonych punktach projektu generowana jest płaszczyzna odpowiedzi która zostaje wypełniona punktami pareto będącymi potencjalnymi rozwiązaniami (rysunek 2). Wzoruując się na wcześniejszych pracach badawczych [3] stwierdzono, że najlepsze wyniki uzyskiwane są przy wykorzystaniu płaszczyzny odpowiedzi stworzonej za pomocą metody Kriging'a oraz optymalizacji wykorzystującego algorytm genetyczny wielu celów. Algorytm genetyczny MOGA stosowany w optymalizacji jest odmianą algorytmu opartego na kontrolowanej elitarności.

Dokonano rozpoznania wpływu poszczególnych parametrów geometrycznych na otrzymywane wyniki. Podczas wszystkich rozpatrywanych przypadków przyjęto następujące założenia optymalizacji:

- maksymalizacja parametru wyjściowego (prędkości wody po wyjściu z głowicy) z najwyższym priorytetem,
- brak konkretnego celu dla wszystkich parametrów wejściowych z niskim priorytetem.



Rys. 2. Schemat blokowy działania algorytmu optymalizacji w oprogramowaniu ANSYS Workbench

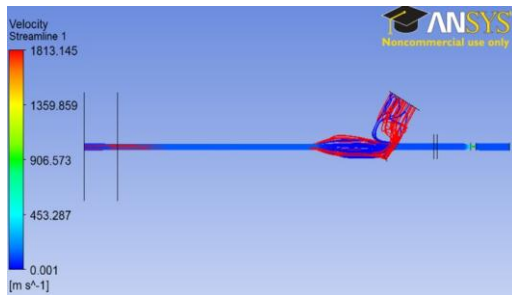
## 2. Otrzymane wyniki

Moduł optymalizacji w oprogramowaniu ANSYS po zakończeniu obliczeń sugeruje trzech kandydatów najlepiej spełniających założone kryteria, w tabeli 2 przedstawiono tylko najlepszego kandydata.

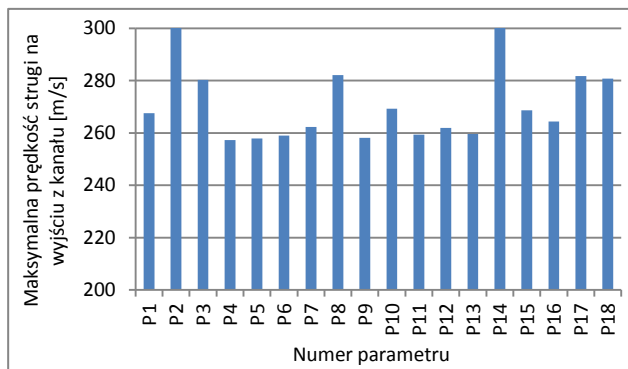
Tabela 2. Wartości parametrów po optymalizacji oraz otrzymana prędkość strugi wodno-ścierniej.

Nr	Wartość parametru	Maksymalna prędkość strugi na wyjściu z głowicy [m/s]
P1	20,265 [mm]	267,490
P2	0,251 [mm]	393,957
P3	9,989 [mm]	280,207
P4	1,218 [mm]	257,233
P5	55,770 [°]	257,904
P6	4,926 [mm]	258,986
P7	9,992 [mm]	262,258
P8	1,997 [mm]	282,095
P9	0,207 [mm]	258,067
P10	0,051 [mm]	269,254
P11	1,004 [mm]	259,388
P12	0,863 [mm]	261,891
P13	0,105 [mm]	259,545
P14	0,499 [mm]	305,547
P15	89,899 [°]	268,601
P16	82,386 [°]	264,325
P17	19,616 [mm]	281,779
P18	0,999 [mm]	280,761

Rysunek 3 przedstawia przepływ strugi wodno-ścierniej dla danych początkowych. Kolorem niebieskim zaznaczono ruch wody, natomiast czerwonym cząstek ścierniwa. Legenda pokazuje maksymalne wartości prędkości strugi wodno-ścierniej wewnątrz kanału. Zgodnie z prawem ciągłości strugi osiągnięta jest w kanale o najmniejszym przekroju czyli wewnątrz kryzy. Rysunek 4 obrazuje dane zawarte w tabeli 2, przedstawia on uzyskaną prędkość maksymalną dla konkretnych parametrów. Jak widać największą prędkość uzyskujemy przez zmianę parametrów będących promieniami. Jest to zgodne z równaniem ciągłości strugi.



Rys. 3. Przepływ strugi wodno-ścierniej wewnątrz kanałów głowicy dla warunków początkowych



Rys. 4. Maksymalna prędkość strugi dla poszczególnych parametrów

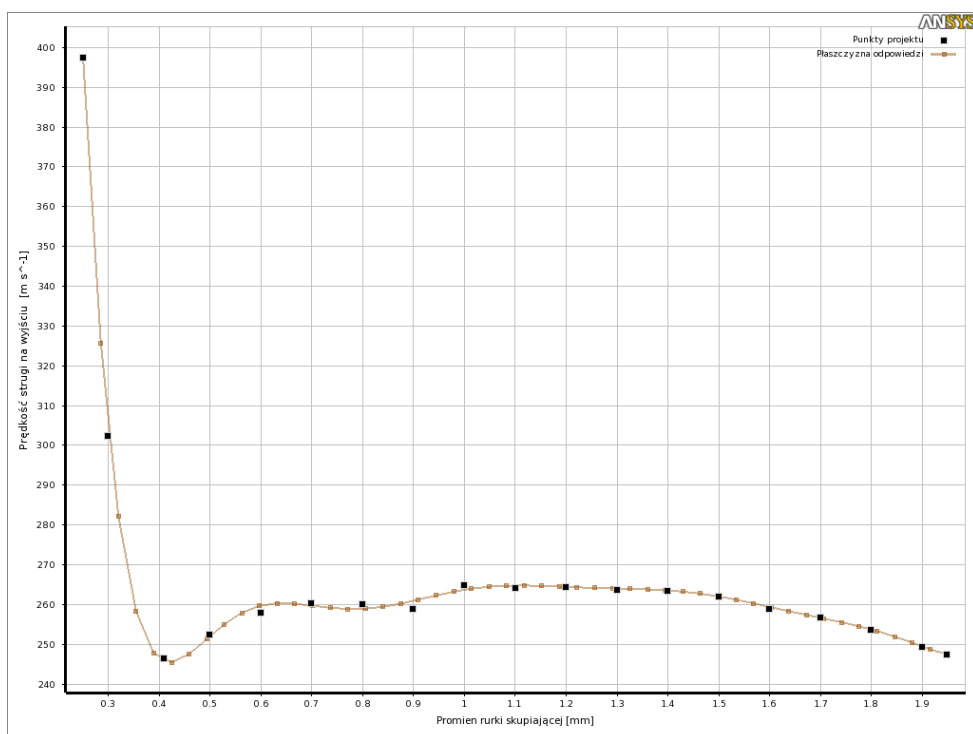
## 2.1. Analiza korelacji otrzymanych wyników

Aby móc porównać ze sobą poszczególne parametry wyznaczono wartości średnie oraz odchylenia standardowe, a także dokonano oceny korelacji parametrów dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ . Korelacja odnosi się do stopnia powiązania między jedną zmienną, a drugą, dlatego współczynnik korelacji jest ilościową miarą tego powiązania. Mówi on o istnieniu powiązań pomiędzy zmiennymi, ale nie mówi nic o istocie tego związku. Współczynnik korelacji  $r$  przybiera wartości  $\pm 1,0$  do  $0,0$ . Ujemne wartości współczynnika  $r$  oznaczają ujemny współczynnik nachylenia prostej. Dla pełnej korelacji zmiennych  $r = \pm 1$ , natomiast dla braku korelacji  $r = 0$  [1].

Wyliczone dane przedstawiono w tabeli 3. Od razu wyróżniają się parametry P2 oraz P12. W pierwszym przypadku pomimo stosunkowo niewielkiej wartości współczynnika korelacji hipoteza zerowa (brak związku pomiędzy zmiennymi) zostaje odrzucona dla przedziału istotności  $\alpha = 0,05$ . Wynika to z faktu, że parametr ten (promień rurki skupiającej) definiuje ostatni element modelu. Co za tym idzie, zmniejszenie promienia ostatniego kanału dla bardzo małych wartości powoduje powstanie dodatkowej kryzy przed punktem pomiarowym. Dla bardzo niewielkich wartości prędkość rośnie wykładniczo na skutek zmniejszenia przekroju kanału, a później wartość wyjściowa stabilizuje się. Przedstawia to rysunek 5. W praktyce nie jest stosowane używanie mniejszych promieni niż  $0,5$  mm ze względu na zużycie rurek skupiających – transportuje ona wodę już ze ścierniwem co powoduje ściernienie się ścianek kanału. Co za tym idzie zmniejszenie przekroju zmniejsza jednocześnie żywotność elementu. Jednak w celach badawczych dokonano analizy także mniejszych wartości promienia. Ujęcie dwóch pierwszych punktów powoduje zaburzenie wyników, a co za tym idzie sugeruje istnienie korelacji.

Tabela 3. Otrzymane wyniki dla poszczególnych parametrów

Nr	Wartość średnia $\mu$ [m/s]	Odchylenie standardowe $\sigma$ [m/s]	Wsp. korelacji $r$	Sprawdzenie wg. poziomu istotności $\alpha$	Wartość współczynnika nachylenia prostej regresji
P1	223,940	27,687	-0,997	istnieje korelacja	-0,230
P2	267,731	33,538	-0,477	istnieje korelacja	-0,140
P3	262,945	14,734	0,947	istnieje korelacja	0,115
P4	224,459	21,851	-0,977	istnieje korelacja	-0,184
P5	251,683	7,032	-0,432	brak	0,022
P6	253,985	5,247	-0,302	brak	-0,012
P7	257,030	3,518	0,806	istnieje korelacja	0,023
P8	272,152	11,012	0,479	brak	0,037
P9	250,024	7,637	0,041	brak	0,003
P10	254,993	8,590	-0,030	brak	-0,002
P11	254,641	3,795	-0,050	brak	-0,002
P12	244,514	23,102	0,829	brak	0,047
P13	251,346	12,045	0,165	brak	0,017
P14	256,219	44,383	0,477	brak	0,174
P15	260,036	6,853	0,773	istnieje korelacja	0,044
P16	251,002	15,521	0,819	istnieje korelacja	0,106
P17	262,588	9,078	0,576	istnieje korelacja	0,047
P18	253,375	27,729	0,977	istnieje korelacja	0,181



Rys. 5. Analiza parametru P2. Czarne punkty określają konkretne obliczone punkty projektu, natomiast brązowa linia to wygenerowana płaszczyzna odpowiedzi. Dwa pierwsze punkty sugerują istnienie korelacji

W przypadku parametru P12 natomiast pomimo stosunkowo dużego współczynnika korelacji nie możemy odrzucić hipotezy zerowej dla przyjętego poziomu istotności. Spowodowane jest to faktem, że parametr ten posiada niewielki zakres zmienności, a co za tym idzie punktów projektu jest zaledwie 4 (liczba stopni swobody jest niewielka,  $n - 2$ ). W efekcie niewielka zmienność wartości prędkości powoduje powstanie zależności sugerującej istnienie korelacji.

## 2.2. Analiza regresji liniowej otrzymanych wyników

Jako, że korelacja mówi nam jedynie o istnieniu bądź braku zależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi dokonano analizy regresji liniowej korzystając z metody najmniejszych kwadratów. Należy tutaj zwrócić uwagę, że istnieją szczególne przypadki, gdzie model liniowy nie sprawdza się najlepiej, parametry P2 i P14 ze względu na wartości o silnym odchyleniu od średniej. Jednak użyto go aby możliwe było porównanie wyników. Współczynnik nachylenia prostej regresji  $a$  wyliczono ze wzoru 1.

$$a = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2} \quad (1)$$

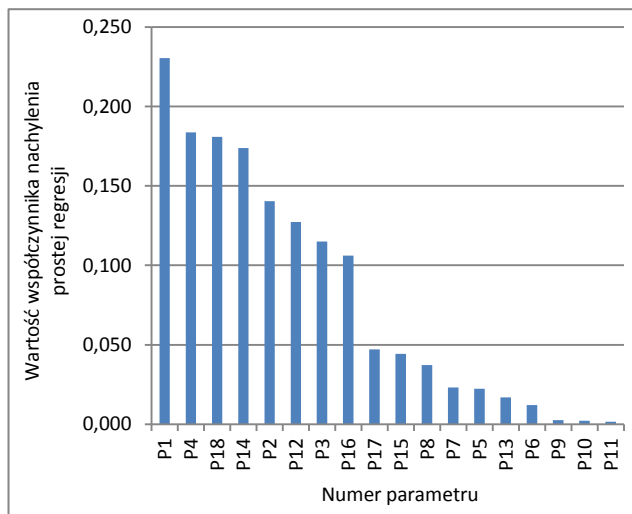
gdzie:  $x, y$  – wartości zmienne,  $\bar{x}, \bar{y}$  – wartości średnie.

Dodatkowo aby móc porównać dane między sobą dokonano normalizacji zmiennych poszczególnych parametrów do przedziału  $<0, 1>$  używając metody normalizacji min-max opisanej wzorem 2.

$$f(x) = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (2)$$

gdzie:  $x$  – zmienna,  $\min(x)$  – wartość minimalna zmiennej  $x$ ,  $\max(x)$  – wartość maksymalna zmiennej  $x$ .

Otrzymane współczynniki nachylenia prostej regresji zostały przedstawione w tabeli 3. Podobnie jak w przypadku korelacji ujemny znak oznacza spadek wartości  $y$  wraz ze wzrostem wartości  $x$ . Natomiast rysunek 6 przedstawia wykres istotności parametrów według wartości współczynnika regresji  $a$ . Dane w tym przypadku zostały posegregowane oraz wyrażone w wartości bezwzględnej w celu łatwiejszej ich analizy.



Rys. 6. Wykres istotności wpływu parametrów na uzyskaną prędkość strugi wodno-ścierniej

## 3. Wnioski

Analizując poszczególne parametry można wyciągnąć szereg wniosków.

- 1) Niektóre wymiary geometryczne mają znikomy wpływ na prędkość strugi wodno-ścierniej na wyjściu. Nie znaczy to jednak, że są one zupełnie nieistotne. Parametry te mogą zmieniać zachowanie się strugi wewnątrz dyszy, co będzie szczególnie istotne w komorze mieszania.
- 2) Największą prędkość strugi na wyjściu z głowicy uzyskano poprzez zmianę parametrów reprezentujących promienie kanałów. Jest to uzasadnione gdyż spełniony zostaje warunek o ciągłości strugi.
- 3) Zwiększenie ilości punktów projektu podczas obliczeń zdecydowanie zwiększy dokładność rozwiązania, a więc płaszczyzna odpowiedzi będzie lepiej odwzorowywać rzeczywistość. Jest to jednak problematycznie ze względu na znacząco rosnący czas obliczeń.
- 4) W przypadku niektórych parametrów pojawiają się wartości znacznie odbiegające od reszty. Wynika to z powstającego specyficznego układu wymiarów, który będzie zmieniał tor ruchu strugi wodnej co będzie powodowało powstawanie dodatkowych turbulencji oraz wirów.
- 5) Analizując współczynniki regresji można zauważyć, że największy wpływ na parametr wyjściowy mają wymiary położone najbliżej punktu pomiarowego. Jest to logiczne, gdyż im dalej od wyjścia z głowicy tym więcej czasu ma struga wodno-ścierna na unormowanie się.

## Literatura

- [1] Kosmol J.: Wybrane zagadnienia metodologii badań, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [2] Momber Andreas W., Kovacevic R.: Principles of Abrasive Water Jet Machining, Springer, London 1998.
- [3] Szczepanik M., Sokołowski A.: Porównanie metod optymalizacji dostępnych w oprogramowaniu ANSYS Workbench, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice 2011.
- [4] Szczepanik M.: Modelowanie ruchu ścierniwa w komorze mieszania z wykorzystaniem metody elementów skończonych, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice 2012.
- [5] Szuta K.: Praca dyplomowa, Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice 2012.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Śląskie.  
Pozytywna energia



DoktoRIS



UNIWERSYTET ŚLĄSKI  
W KATOWICACH



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPÓJNOŚCI

Autor otrzymał stypendium w ramach projektu *DoktoRIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska* współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

**Mgr inż. Maciej Szczepanik**

e-mail: maciej.szczepanik@polsl.pl

Absolwent Automatyki i Robotyki na wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od roku 2009 uczestnik studiów doktoranckich.

Główny zakres badań obejmuje badania modelowe MES przepływu, analizę zjawisk występujących podczas cięcia strumieniem wodno-ściernym, optymalizację.

Stypendysta projektu DoktoRIS - Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska



otrzymano/received: 06.06.2013

przyjęto do druku/accepted: 16.02.2014