

Karolina ADAMCZUK¹, Wojciech WOLAŃSKI², Wojciech KASPERA³

¹Koło Biokreatywni przy Katedrze Biomechatroniki, Politechnika Śląska, Zabrze

²Katedra Biomechatroniki, Politechnika Śląska, Zabrze

³Katedra i Oddział Kliniczny Neurochirurgii, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach, Wojewódzki Szpital Specjalistyczny nr 5, Sosnowiec

ANALIZA PRZEPIYU KRWI W TĘNICACH MÓZGOWYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę numeryczną przepływu krwi (CFD) w tętnicach mózgowych środkowych. Symulacja komputerowa została przeprowadzona z wykorzystaniem modeli tętnic, które wysegmentowano na podstawie obrazów tomografii komputerowej dla dwóch odmiennych fizjologicznie przypadków: tętnicy: prawidłowej oraz tętnicy patologicznej z tętniakiem. Przeprowadzone komputerowe symulacje przepływu umożliwiły uzyskać rozkład ciśnienia, naprężenia ścinającego WSS oraz prędkości przepływu krwi w naczyniach. Wyniki obliczeń umożliwiły porównanie wyznaczonych czynników hemodynamicznych pod kątem patofizjologii naczynia z tętniakiem. Dodatkowo symulacje przepływu mogą uzupełnić wiedzę z zakresu mechanizmów powstawania tętniaków oraz stratyfikacji ryzyka ich uszkodzenia.

Słowa kluczowe: przepływ krwi, CFD, tętnica środkowa mózgowa, tętniak

1. WSTĘP

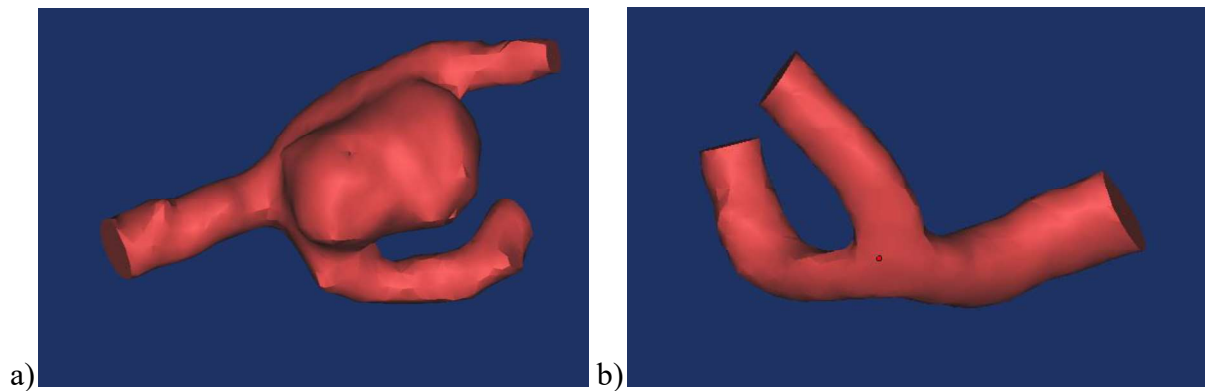
Tętnice są naczyniami, które wyprowadzają krew z serca. Prędkość przepływu oraz ciśnienie w nich panujące jest wyższe niż w naczyniach żylnych, ze względu na to, że krew jest pompowana do kolejnych naczyń. Ściany tętnic są grubsze i zawierają dużo włókien sprężystych i kolagenowych w porównaniu do żył [6, 7]. Dużym zagrożeniem uszkodzenia tętnic są coraz to częściej spotykane tętniaki. Częstość ich występowania nie jest dokładnie znana. Szacuje się, że wynosi ona 0,2-7,9% populacji ludzkiej i aż 88% zmian tętniakowych objawia się krwawieniem podpajęczynówkowym, 8% daje objawy guza mózgu, a 4% wykrywana jest przypadkowo. Tętniak powstaje na skutek osłabienia ściany tętnicy, które może być spowodowane w głównej mierze nadciśnieniem tętniczym lub miażdżycą, ale również na skutek palenia papierosów, otyłości czy wad wrodzonych. Tętnice mózgowe charakteryzują się cienkimi ścianami w porównaniu do innych tętnic obecnych w organizmie człowieka, co powoduje że naczynia mózgowe są mało odporne na wysokie ciśnienie krwi. O tętniaku mówimy w momencie, gdy średnica zmiany jest przynajmniej dwukrotnie większa niż prawidłowa średnica naczynia, w którym tętniak powstaje. Tętniaki tętnicy mózgowej są o tyle niebezpieczne, że w przypadku ich uszkodzenia krew wylewa się do płynu mózgowo rdzeniowego niszcząc strukturę mózgu [1].

Dzięki postępowi, jaki dokonał się w medycynie w zakresie metod obrazowych, a także pomiarów hemodynamicznych w połączeniu z rozwojem technologii numerycznej mechaniki

płynów (ang. Computational Fluid Dynamics – CFD) otworzyły się nowe perspektywy badawcze umożliwiające wirtualne obrazowanie przepływu w układzie naczyniowym [1,2]. Własności krwi w literaturze opisywane są za pomocą różnych równań i praw, a podczas analizy jej przepływu przyjmuje się różne uproszczenia. Zakłada się, że prędkość krwi jedynie występuje wzdłuż osi naczynia i jest różna od zera, a pozostałe składowe są znikome i przyjmuje się, że wynoszą zero. W celu uproszczenia w czasie analizy przepływu krwi pomija się również siły ciężkości oraz zakłada się nieodkształcalność ścian naczyń krwionośnych [5]. Czynniki hemodynamiczne odgrywają ważną rolę w patologii naczyń. Przyjmuje się, że fizjologiczne wartości naprężeń ścinających na ścianie (WSS – Wall Shear Stress) znajdują się w przedziale od 1,5 Pa do 7 Pa. Naprężenia ścinające wynoszące powyżej 7 Pa sprzyjają powikłaniom zakrzepowym czy powstawaniu tętniaków, które zazwyczaj występują przy przepływie krwi w naczyniach zwężonych wskutek miażdżycy [5].

2. SYMULACJE NUMERYCZNE

Celem przygotowanych symulacji przepływu krwi przez tętnice mózgowe było określenie zmian czynników hemodynamicznych powiązanych z patofizjologią naczynia z tętniakiem. Do przeprowadzenia analizy przepływu krwi zostały opracowane modele tętnicy mózgowej środkowej fizjologicznie prawidłowej oraz tętnicy patologicznej z występującym na niej tętniakiem. Modele sformułowano dla trzech odmiennych przypadków: i) tętnicy prawidłowej oraz z tętniakiem pochodzących od różnych pacjentów, ii) dwóch tętnic prawidłowych pochodzących od tego samego pacjenta, iii) tętnicy prawidłowej i z tętniakiem pochodzących od jednego pacjenta. Tętnice opracowano w programie Mimics na podstawie zdjęć z tomografii komputerowej (TK). Przykłady wysegmentowanych modeli tętnic przedstawiono na rysunku poniżej (Rys.1).



Rys. 1. Model tętnicy: a) z tętniakiem, b) fizjologicznie prawidłowej

Symulacje przepływu krwi w tętnicach mózgowych zostały przeprowadzone przy warunkach i własnościach krwi, które przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry przepływu i własności krwi [5,6,9,10]

Prędkość przepływu krwi na wlocie tętnicy	0,45 m/s
Prędkość przepływu krwi na wylocie tętnicy	0 m/s
Masa molowa krwi	18,02 kg/mol·K
Gęstość krwi	1050 kg/m ³
Pojemność cieplna krwi	4181,7 J/ kg·K
Temperatura krwi	37°C
Ciśnienie referencyjne	1 bar
Współczynnik lepkości krwi	0,0035 Pa·s

3. ANALIZA WYNIKÓW

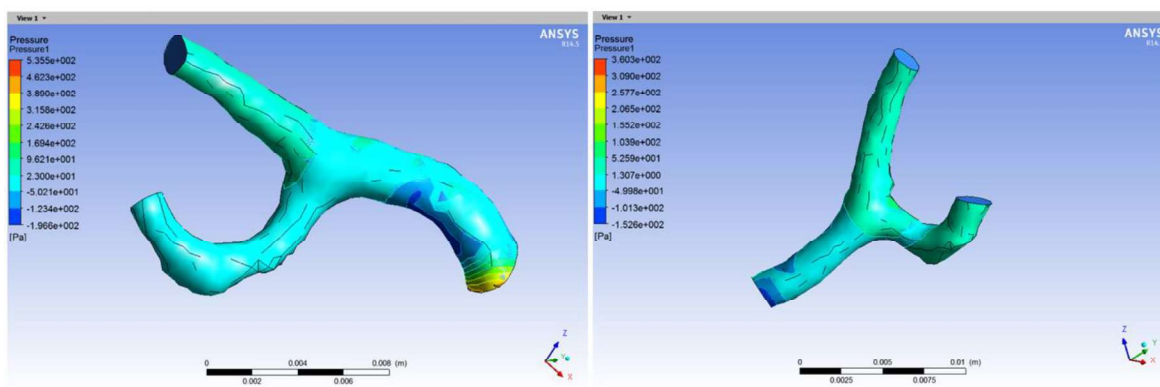
Analizę numeryczną przepływu krwi przeprowadzono w programie Ansys CFX. Obliczenia komputerowe umożliwiły uzyskać rozkład ciśnienia, naprężenia ścinającego WSS oraz prędkości przepływu krwi w naczyniach. Uzyskane czynniki hemodynamiczne zostały porównane dla różnych wariantów modeli tętnic mózgowych pod kątem identyfikacji zmian i oceny wpływu tętniaków na przepływ krwi. Dodatkowo wykonane symulacje dostarczają informacji, które mogą pomóc określić mechanizmy powstawania tętniaków oraz ryzyko ich uszkodzenia. W tabeli 2 zostały zebrane wyniki dla różnych wariantów symulacji, które przedstawiają ekstremalne wartości analizowanych parametrów hemodynamicznych.

Tabela 2. Otrzymane wartości ciśnienia, naprężenia oraz prędkości przepływu krwi

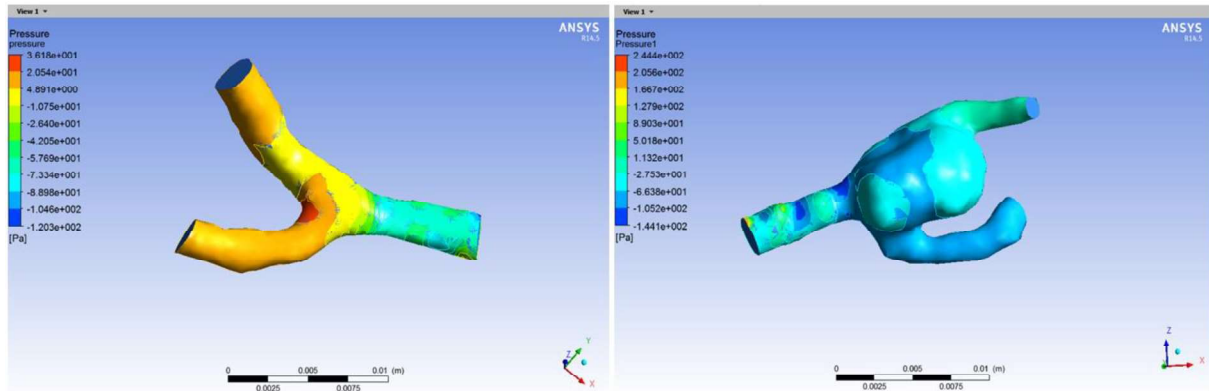
Wariant symulacji	Rodzaj modelu tętnicy	Ciśnienie [Pa]	Naprężenie WSS [Pa]	Prędkość przepływu [m/s]
Przypadek 1: Tętnice pochodzące od różnych pacjentów	Tętnica prawidłowa	Min: -80,27 Max: 199,00	Min: 0,00 Max: 10,58	Min: 0,003 Max: 0,572
	Tętnica z tętniakiem	Min: -144,10 Max: 244,40	Min: 0,00 Max: 2,80	Min: 0,001 Max: 0,611
Przypadek 2: Tętnice pochodzące od jednego pacjenta	Tętnica lewa prawidłowa	Min: -196,60 Max: 535,50	Min: 0,00 Max: 3,91	Min: 0,002 Max: 0,896
	Tętnica prawa prawidłowa	Min: -152,60 Max: 360,30	Min: 0,00 Max: 2,83	Min: 0,0012 Max: 0,756
Przypadek 3: Tętnice pochodzące od jednego pacjenta	Tętnica lewa prawidłowa	Min: -120,30 Max: 36, 18	Min: 0,00 Max: 1,15	Min: 0,0005 Max: 0,507
	Tętnica prawa z tętniakiem	Min: -144,10 Max: 244,40	Min: 0,00 Max: 2,80	Min: 0,001 Max: 0,611

Porównanie i analiza wartości liczbowych czynników hemodynamicznych dostarcza cennych informacji o ekstremalnych/maksymalnych parametrach, które mogą przyczynić się do powstawania tętniaków i ryzyka ich uszkodzenia. Jednakże są one pozbawione informacji o miejscu ich występowania. Dlatego na poniższych rysunkach (Rys.2÷Rys.7) pokazano przykładowe mapy rozkładu ciśnienia, naprężenia WSS oraz prędkości przepływu krwi w tętnicach mózgowych dla analizowanych przypadków.

Na rysunkach 2 oraz 3 można zauważyć, że nie tylko występują różnice w maksymalnych wartościach ciśnienia pomiędzy tętnicą prawidłową (360Pa) a z tętniakiem (244Pa), ale również w ich występowaniu. Dodatkowo zauważalne są zmiany maksymalnych wartości i rozkładu ciśnienia między prawidłowymi tętnicami tego samego pacjenta (535Pa – lewa, 360Pa – prawa).

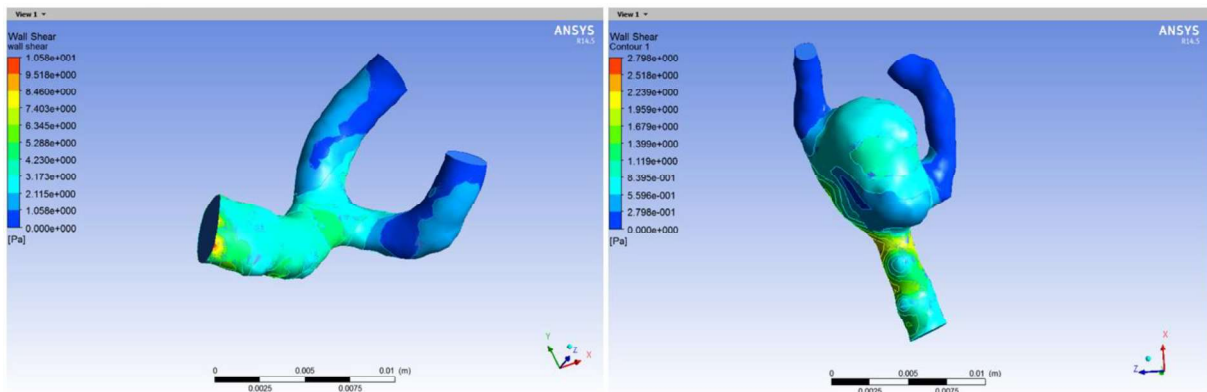


Rys. 2. Rozkład ciśnienia dla lewej i prawej tętnicy fizjologicznie prawidłowych pochodzących od jednego pacjenta

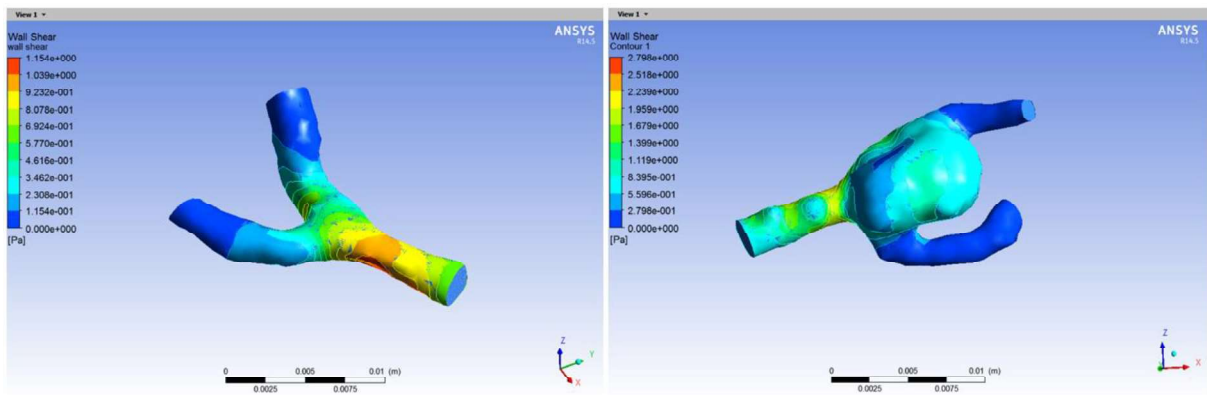


Rys. 3. Rozkład ciśnienia dla lewej fizjologicznie prawidłowej tętnicy i prawej tętnicy z tętniakiem pochodzących od jednego pacjenta

W miejscu rozwidlenia się tętnicy fizjologicznie prawidłowej występują obszary podwyższonego ciśnienia i naprężenia, co może powodować powstawanie tętniaków. U osoby posiadającej jedną tętnicę z tętniakiem zauważa się w niej występowanie wyższych wartości naprężenia niż dla tętnicy prawidłowej (Rys.5). Te różnice mogą wynikać z faktu, że tętniak zaburza przepływ krwi w tętnicy. Jednakże maksymalne wartości naprężeń WSS mieszczą się w przedziale $1,5 \div 7$ Pa, który w literaturze uznawany jest za prawidłowy.

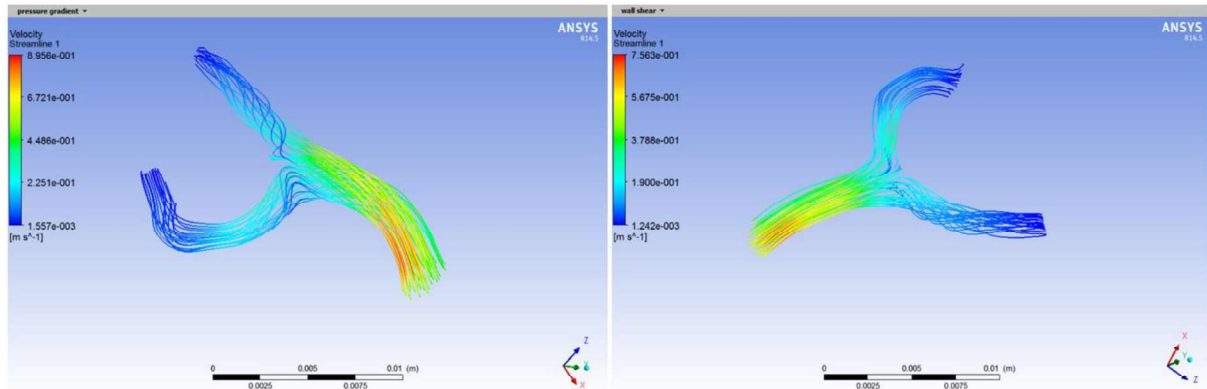


Rys. 4. Rozkład naprężenia WSS dla lewej tętnicy fizjologicznie prawidłowej i prawej tętnicy z tętniakiem pochodzących od różnych pacjentów

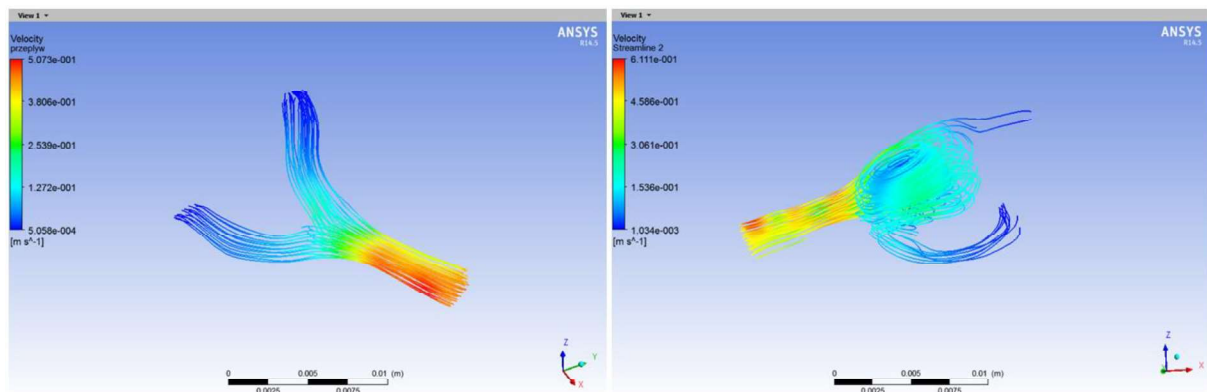


Rys. 5. Rozkład naprężenia WSS dla lewej tętnicy fizjologicznie prawidłowej i prawej tętnicy z tętniakiem pochodzących od jednego pacjenta

Rozkład prędkości przepływu krwi jest podobny dla tętnicy prawidłowej oraz z tętniakiem pochodzących od jednego pacjenta (Rys.6), ale charakteryzuje się innymi wartościami prędkości przepływu. Natomiast znacząca różnica przepływu krwi występuje pomiędzy tętnicą prawidłową a patologicznie zmienioną (Rys.7). W tętnicy prawidłowej wartość maksymalna prędkości krwi wynosi 0,507 m/s, zaś w tętnicy z tętniakiem 0,611 m/s.



Rys. 6. Rozkład prędkości przepływu krwi dla lewej i prawej tętnicy fizjologicznie prawidłowej pochodzących od jednego pacjenta



Rys. 7. Rozkład prędkości przepływu krwi dla lewej tętnicy fizjologicznie prawidłowej i prawej tętnicy z tętniakiem pochodzących od jednego pacjenta

4. WNIOSKI

W pracy dokonano analizy przepływu krwi przez tętnicę mózgową środkową dla różnych wariantów (fizjologicznie prawidłowych oraz patologicznych). Przeprowadzone badania potwierdziły przypuszczenia występowania różnic w rozkładzie przepływu krwi w tętnicy fizjologicznie prawidłowej a patologicznie zmienionej. W pierwszym przypadku przepływ przebiega równomiernie w porównaniu do tętnicy z tętniakiem, który w obszarze tętniaka jest turbulentny i charakteryzuje się bardzo dużymi zawirowaniami. Te zmiany przepływu mogą wpływać na niszczenie elementów krwi, uszkodzenie śródbłonka oraz rozwarstwianie się ściany tętnicy. W przypadku tętnicy fizjologicznie prawidłowej przepływ krwi jest jednostajny i ustalony, który wykazuje drobne turbulencje w okolicy rozwidlenia się tętnicy. Zarówno w przypadku tętnicy prawidłowej i patologicznej zauważyć można tendencje spadkową wartości prędkości przepływu w kierunku wylotu. Dodatkowo występowanie tętniaka ogranicza przepływ krwi w tętnicach, zmniejszając go do niewielkich strumieni, jak

również zaburza przepływ krwi w jego gałęziach. W pracy wykazano zmianę czynników hemodynamicznych przepływu krwi przez tętnice mózgowe, które powiązane są z patofizjologią naczyń – tętniakiem. Jednak do uzyskania wyczerpujących informacji o patogenezie tętniaków przewiduje się dalsze prace na większej ilości przypadków, które umożliwią identyfikację mechanizmów powstawania tętniaków oraz czynników hemodynamicznych odpowiadających za ich powstawanie.

LITERATURA

- [1] Bit A., Chattopadhyay H.: Numerical investigations of pulsatile flow in stenosed artery, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, vol. 16, no. 4, 2014, p. 33-44.
- [2] Blagojević M., Nikolić A., Živković M., Živković M., Stanković G.: Influence of blocks' topologies on endothelial shear stress observed in CFD analysis of artery bifurcation, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, vol. 15, no. 1, 2013, p. 97-104.
- [3] Ciszek B., Ząbek M.: Anatomia tętnicy środkowej mózgu a obraz angiograficzny jej tętniaków, *Neurologia i Neurochirurgia Polska*, 1992, Supl.1.
- [4] Hołyst J., Tokarz F.: Tętniaki tętnicy środkowej mózgu, *Neurochirurgia naczyniowa mózgowia*, PZWL, Warszawa 1977.
- [5] Józwik K., Obidowski D., Reorowicz P., Kłosiński P.: Wykorzystanie metod numerycznych w konstrukcji układu pozaustrojowego pompy wspomaganie pracy serca ReligaHeart EXT
- [6] Kurowska-Nouyrigat W., Szumbariski J., Modelowanie przepływu krwi przez naczynie wieńcowe ze stentem, *Aktualne Problemy Biomechaniki*, nr 3, 2009, s. 116-120.
- [7] Liebert W., Nowak S., Smól S., Majewski T., Dobrzycki Z.: Tętniaki tętnicy środkowej mózgu, *Neuroskop*, 1999, tom I, nr 1.
- [8] Nolte J.: Mózg człowieka. Tom 1. Anatomia czynnościowa mózgowia, wyd. I, Wydawnictwo Medyczne Urban & Partner, 2012.
- [9] Obidowski D.: Symulacja przepływu krwi w tętnicach kręgowych człowieka, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2007.
- [10] Peryt-Stawiarska S., Wasilewski J.: Możliwości zastosowania numerycznej mechaniki płynów (CFD) do symulacji przepływu krwi przez tętnice wieńcowe. Przykłady segmentacji obrazów tomografii komputerowej i budowy modelu do obliczeń CFD, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, vol. 53, no. 6, 2014, s. 403-405.

ANALYSIS OF BLOOD FLOW IN CEREBRAL ARTERIES

Abstract: The article presents the analysis of blood flow in cerebral central arteries. On the basis of the images from the CT scan a few models of cerebral arteries were created. Models include: physiologically correct arteries and pathological arteries with aneurysm. Computer simulations were carried out for all models, which enabled to obtain a distribution of pressure, shear stress WSS and the velocity of blood flow in vessels. The results of calculations allowed the comparison of the hemodynamic factors for the correct and pathologic artery with aneurysm. In addition, flow simulations can complement the knowledge of the mechanisms and the risk of aneurysm damage.