

TOMASZ KURASIŃSKI
CZESŁAW KUNCEWICZ

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Charakterystyka struktur wirowych generowanych przez mieszadło samozasysające

W przepływie turbulentnym następuje kaskadowy transport energii od wirów największych do najmniejszych, aż do całkowitego lepkościowego rozproszenia kinetycznej energii burzliwości. Oznacza to, że każdemu rozmiarowi pojedynczego wiru odpowiada określona część energii całkowitej ruchu burzliwego. Energia wszystkich wirów uczestniczących w przepływie tworzy tak zwane widmo energii turbulencji. W zależności od rozmiarów liniowych struktur wirowych wyróżnia się trzy teoretyczne zakresy [1]:

- *Kołmogorowa*, który charakteryzuje najmniejsze wiry uczestniczące w kaskadzie przekazywania energii,
- *Taylor*, który charakteryzuje struktury wirowe z początku zakresu dyssypatywnego trójwymiarowego spektrum energii, oraz
- *Brodkey'a*, który charakteryzuje największe stabilne wiry uczestniczące w kaskadzie transportu energii.

Każdy z wymienionych zakresów charakteryzuje się trzema skalami turbulencji [2]:

- *skalę długości*, którą najczęściej interpretuje się jako rozmiar liniowy (średnicę) wiru;
- *skalę czasu*, którą łączy się z czasem „życia” wiru,
- *skalę prędkości*, którą odnosi się do prędkości liniowej odpowiadającej energii ruchu postępowego struktur wirowych.

Wartości liczbowe wymienionych wyżej skal turbulencji w poszczególnych zakresach są podstawowymi parametrami określającymi strukturę turbulencji. Stąd celem prezentowanej pracy było doświadczenie wyznaczenie rozkładu lokalnych wartości dziewięciu skal turbulencji w mieszalniku cieczy. Badania te mogą być podstawą do opracowywania nowych numerycznych modeli burzliwości oraz parametryzacji dotychczasowych równań uwzględniających zjawisko turbulencji, na przykład modelu $k-\varepsilon$.

Najmniejsze skale liniowe wirów będą występowały w przypadku, kiedy siły bezwładności będą tego samego rzędu co siły lepkości. Sytuację tę prezentuje model *Kołmogorowa*, który na podstawie szybkości dyssypacji energii ε i lepkości kinematycznej ν określa odpowiednio: skalę długości l_η , czasu τ_η i prędkości v_η

$$l_\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}; \quad \tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2}; \quad v_\eta = \frac{l_\eta}{\tau_\eta} \quad (1)-(3)$$

Lokalną wartość szybkości dyssypacji energii ε występującą w równaniach (1) i (2) można określić na podstawie średniego kwadratu prędkości fluktuacyjnej $\overline{w_i^2}$ [3].

Skale turbulencji z zakresu *Taylor* (skalę długości l_λ , skalę czasu τ_λ oraz skalę prędkości v_λ) wyznacza się w oparciu o przekształcenia prędkości chwilowych. W oparciu o staty-

styczną teorię burzliwości skale te można określić na podstawie pochodnych prędkości fluktuacyjnych według poniższych trzech relacji

$$\frac{1}{\tau_\lambda^2} = \frac{1}{2\overline{w_i^2}} \left(\overline{\frac{\partial w_i'}{\partial t}} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{1}{l_\lambda^2} = \frac{1}{2\overline{w_i^2}} \left(\overline{\frac{\partial w_i'}{\partial x_k}} \right)^2 \quad (5)$$

$$v_\lambda = \frac{l_\lambda}{\tau_\lambda} \quad (6)$$

Podstawą statystycznej teorii burzliwości jest badanie związku probabilistycznego pomiędzy poszczególnymi prędkościami chwilowymi mierzonymi zarówno w różnych punktach przestrzeni, jak i różnych chwilach czasu. Oznacza to, że można określić znormalizowane funkcje korelacyjne: funkcję czasową $R(\tau)$ oraz funkcję przestrzenną $R(r)$ zdefiniowane odpowiednio równaniami (7) i (8)

$$R_{ii}(\tau) = \frac{\overline{w_i'(t)w_i'(t+\tau)}}{\overline{w_i'^2}} \quad (7)$$

$$R_{ii}(r) = \frac{\overline{w_i'(x)w_i'(x+r)}}{\overline{w_i'^2}} \quad (8)$$

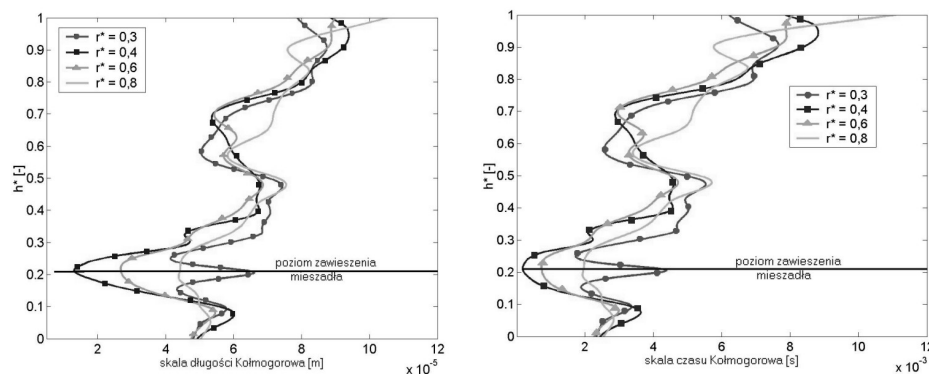
Wartości całkowite wyżej wymienionych funkcji będą wyznaczały skale z zakresu *Brodkey'a*: skalę czasową τ_Λ , skalę długości l_Λ oraz skalę prędkości v_Λ odpowiednio według poniższych trzech zależności

$$\tau_\Lambda = \int_0^\infty R_{ii}(\tau) d\tau \quad (9)$$

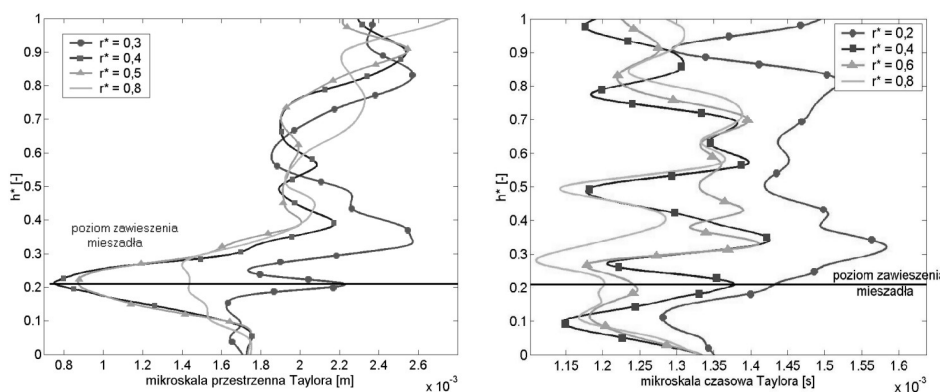
$$l_\Lambda = \int_0^\infty R_{ii}(r) dr \quad (10)$$

$$v_\Lambda = \frac{l_\Lambda}{\tau_\Lambda} \quad (11)$$

Przestrzenne parametry turbulencji określone równaniami (5) oraz (10) można również wyznaczyć na podstawie przebiegów czasowych. Szeroki opis związku skal czasowych ze skalami przestrzennymi w oparciu o hipotezę *Taylor* (hipoteza o zamrożonej strukturze wirowej) znajduje się w monografiach *Elsnera* [1, 2]. W niniejszej pracy zastosowano tę hipotezę do wyznaczenia skal przestrzennych z zakresu *Taylor* oraz *Brodkey'a* trójwymiarowego spectrum kinetycznej energii turbulencji.



Rys. 1. Rozkład skali długości l_η [m] oraz czasu τ_η [s] z zakresu Kołmogorowa w funkcji bezwymiarowej wysokości $h^* = h/H$ oraz bezwymiarowego promienia $r^* = r/R$



Rys. 2. Rozkład skali długości l_λ [m] oraz czasu τ_λ [s] z zakresu Taylora w funkcji bezwymiarowej wysokości $h^* = h/H$ oraz bezwymiarowego promienia $r^* = r/R$

Głównym elementem stanowiska pomiarowego był szklany, płaskodenny, cylindryczny zbiornik o średnicy $D = 292$ mm z osiowo zamontowanym samozasysającym mieszadłem tarczowym [3] o średnicy $d = 125$ mm umieszczonym w odległości $h = 62$ mm od dna. Mieszalnik z czterema standardowymi przegrodami o szerokości $1/10 \cdot D$ wypełniony był cieczą do wysokości $H = D$. Pomiarów prędkości chwilowych dokonano za pomocą dopplerowskiego anemometru laserowego firmy DANTEC[®] wyposażonego w laser o mocy 100 mW (długość fali 514,7 nm) i procesor sygnału BSA T58N10. Pomiarów prędkości chwilowych dokonano w płaszczyźnie promiennowo-osiowej wyznaczonej przez dwusieczną konta pomiędzy sąsiadującymi przegrodami w około 180 jej punktach. Częstotliwość próbkowania wynosiła od 0,5 kHz w pobliżu lustra cieczy do 4 kHz w obszarze bliskim mieszadła.

Na podstawie pomiarów i przekształceń prędkości chwilowych uzyskano odpowiednie rozkłady skal turbulencji w poszczególnych zakresach spektrum energii.

W przypadku rozkładu skali długości z zakresu Kołmogorowa (Rys. 1) największe zmiany obserwuje się na wysokości zawieszenia mieszadła. W obszarze końca łopatki mieszadła występuje znaczny spadek wartości skali długości Kołmogorowa l_η ($1,3 \cdot 10^{-5}$ m).

Oznacza to, że kosztem energii dostarczanej bezpośrednio przez łopatki mieszadła wytworzone jest i podtrzymane szerokie spektrum struktur wirowych. Dla obszaru wewnątrz łopatki obserwuje się dodatkowo minimum skali czasowej

τ_η ($1,68 \cdot 10^{-4}$ s), konsekwencją czego jest wystąpienie maksimum skali prędkości v_η (0,077 m/s). Oznacza to, że najmniejsze struktury wirowe powstają za obracającą się łopatką (w odległości około 2 mm od krawędzi). Wnioski te potwierdzają również dane prezentowane w pracy [4].

Na rozkładzie skali długości z zakresu Taylora l_λ (Rys. 2) obserwuje się wyraźny wpływ łopatki mieszadła, gdzie w obszarze jej krawędzi występuje minimum (0,72 mm) przy średniej wartości w całym mieszalniku wynoszącym 2,01 mm. Wartości lokalne skali l_λ są rzędu od 0,7 mm do 3,2 mm i można je zinterpretować jako średnicę wiru. W przypadku rozkładu skali czasu τ_λ niezauważalny jest wpływ łopatki mieszadła. Oznacza to, że omawiana skala turbulencji stanowi jedynie pewien parametr pola burzliwości. Tłumaczenie tej wielkości pojęciem czasu „życia” wiru z początku zakresu dyssypatywnego nie jest poprawne, ponieważ jest to wielkość wynikająca jedynie z przekształceń funkcji autokorelacyjnej. Dane prezentowane w innych pracach [5, 6] również potwierdzają powyższe wnioski.

Obliczenia z równań (9+11) rozkładu wartości całkowitych skal l_Λ z zakresu Brodkey'a wzdłuż wysokości i promienia mieszalnika nie jest tak jednoznaczny jak rozkład skali długości l_λ . Wartości l_Λ wskazują, że rozmiary liniowe największych struktur wirowych uczestniczących w kaskadowym transporcie energii [7] są nawet większe od rozmiaru mieszalnika ($l_\Lambda \approx 0,35$ m przy średnicy mieszalnika $D = 0,292$ m). Przyczyn tego stanu rzeczy należy szukać w zjawisku maskowania [2], które wynika z analizowanych w prezentowanej pracy jednowymiarowych spektrów gęstości energii. Oznacza to, że nie ma w tym przypadku możliwości dokładnego określenia rozkładu energii w zależności od wszystkich rozmiarów wirów uczestniczących w przepływie.

LITERATURA

1. J. Elsner: Turbulencja przepływów, Warszawa, PWN, 1987.
2. J. Elsner, S. Drobnik: Metrologia turbulencji przepływów, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Warszawa, 1995.
3. H.D. Lauffhütte, A. Mersmann: 5ht European Conference on Mixing, Würzburg, 1985.
4. E. Stihl Wernersson, C. Trägårdh: Experiments in Fluids, 28, 532, (2000).
5. J. Costes., J. Coudrec: Chem. Eng. Sci., 43, nr 10, 2765, (1988).
6. H.W. G. Patterson: Chem. Ing. Sci., 44, nr 10, 2207, (1989).
7. T. Kurasiński: Wpływ parametrów pola turbulentnego na szybkość transportu masy dla mieszadeł samozasysających, Praca doktorska, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2007.

Praca wykonana w ramach działalności statutowej W-10/1/2008/Dz.St.