

**Odpowiedź na uwagi krytyczne prof. dr. hab. in. Zbyszko
Kazimierskiego, dotyczące pracy pt. „Wpływ parametrów
konstrukcyjnych rozpylaczy strumieniowo-wirowych na ich właściwości”**

Rozpylacz strumieniowo-wirowy [9] – będący funkcjonalnym połączeniem dyspergatora strumieniowego i wirowego – stanowi odrębny rodzaj urządzeń rozpylających, chociaż niekiedy zaliczany jest do wtryskiwaczy wirowych [2]. Spotykane są różne odmiany konstrukcyjne rozpylaczy strumieniowo-wirowych. Największe zastosowanie praktyczne ma dyspergator tego typu z wkładką z ukośnymi kanałami zawirującymi, których przekrój poprzeczny scharakteryzowany jest wymiarami a i b – Rys. 1 [6]. Kanały te wywołują ruch obrotowy zewnętrznej strugi cieczy o średnim promieniu zawirowania R_z .

Publikacja [6] – będąca rozprawą habilitacyjną, do której swoje uwagi krytyczne przedstawił prof. dr. hab. inż. Zbyszko Kazimierski – dotyczy takich właśnie rozpylaczy. Stanowi ona podsumowanie prac doświadczalnych i teoretycznych z zakresu rozpylania cieczy, prowadzonych z udziałem jej autora od 25 lat w Instytucie Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej (IMP PŁ).

Uwagi przedstawione przez prof. dr. hab. inż. Zbyszko Kazimierskiego wynikają z faktu, że jest On znanym i cenionym w kraju autorytetem naukowym w dziedzinie numerycznej mechaniki płynów, natomiast nie jest specjalistą z zakresu zagadnień związanych z rozpylaniem cieczy. Wszystkie te uwagi można sprowadzić do czterech zagadnień, a mianowicie:

- nieoparcia rozprawy habilitacyjnej na współczesnych metodach numerycznej mechaniki płynów;
- założonego w modelu teoretycznym przedstawionym w dysertacji [6] rozkładu składowej obwodowej prędkości cieczy w kanale wylotowym rozpylacza strumieniowo-wirowego, spełniającego równanie wiru swobodnego (potencjalnego);
- nieprzeniesienia rezultatów uzyskanych w trakcie doświadczalnych badań mieszalnika strumieniowego na rozpylacz strumieniowo-wirowy;
- korelacji wyników badań eksperymentalnych rozpylacza strumieniowo-wirowego zamieszczonych w rozprawie [6].

projektowania rozpylaczy strumieniowo-wirowych o założonych parametrach makro- i mikroskopowych strugi oraz wyznaczania tych wielkości eksperymentalnie i analitycznie dla istniejących już dyspergatorów tego typu i cieczy o określonych parametrach. Opublikowanie wyników prac w postaci rozprawy habilitacyjnej [6] opóźniło się o kilka lat z powodu moich licznych obowiązków zawodowych, w tym wynikających z zatrudnienia od 1990 r. na stanowisku Dyrektora Administracyjnego Politechniki Łódzkiej.

W numerycznej mechanice płynów bardzo istotnym zagadnieniem jest przyjęcie właściwych – to jest odpowiadających rzeczywistości – warunków brzegowych, bowiem tylko wówczas otrzyma się poprawne rozwiązanie danego zagadnienia. Do sformułowania właściwych warunków brzegowych pomocne są wyniki badań doświadczalnych. W dysertacji [6] zamieszczone są rezultaty obszernego programu badań eksperymentalnych. Mogą one być wykorzystane przy weryfikacji wyników uzyskanych metodami numerycznymi.

Istotnym elementem rozprawy było badanie widma rozpylenia kropeł w strudze. Ze względu na specyfikę badanego obiektu jest to złożone zagadnienie z zakresu techniki pomiarowej i tylko nieliczne ośrodki w kraju są w stanie przeprowadzić tego typu badania. Obecnie żaden model numeryczny nie daje nawet przybliżonej informacji na temat rozkładu średnic kropeł w stożku rozpylenia.

Ad. 2.

Rozpylacz strumieniowo-wirowy jest zmodyfikowanym wtryskiwaczem wirowym, w którym na miejsce rdzenia gazowego wprowadzona zostaje osiowa struga cieczy. Ma to na celu usunięcie podstawowej wady rozpylaczy wirowych, tj. nierównomierności promieniowego rozkładu gęstości zraszania. Struga osiowa może być niezawierana lub wstępnie zawierana. Wyniki badań eksperymentalnych przedstawione w pracy [6] dotyczą przypadku niezawieranej strugi osiowej.

W dyspergatorze strumieniowo-wirowym istotnym zagadnieniem jest efektywność wzajemnego oddziaływania na siebie zewnętrznej pierścieniowej strugi zawieranej i wewnętrznej strugi osiowej. Do oceny tej efektywności wprowadzone zostało pojęcie stopnia oddziaływania strug λ , zdefiniowane następującą zależnością (Rys. 1):

$$\lambda = \frac{r_o^2 - r_r^2}{r_c^2},$$

gdzie: r_o – promień strugi osiowej, r_r – promień rdzenia gazowego (powietrznego) w przypadku braku strugi osiowej, r_c – promień kanału wylotowego rozpylacza strumieniowo-wirowego.

Rozkład prędkości cieczy w kanale wylotowym rozpylacza tego typu powstaje w wyniku łączenia się obu tych strug (zewnętrznej i wewnętrznej), a więc zależy on od parametru λ .

Badania eksperymentalne omówione w rozprawie [6] obejmowały odmiany konstrukcyjne rozpylacza strumieniowo-wirowego, dla których stopień oddziaływania $\lambda < 0$ (a więc przy $r_o < r_r$, czyli gdy nie dochodzi do kontaktu strug), $\lambda = 0$ (a więc przy $r_o = r_r$) i $\lambda > 0$ (a więc przy $r_o > r_r$, czyli gdy następuje zderzenie strug połączone ze stratą energii).

W teorii rozpylaczy uwzględniane są dwa przypadki rozkładu składowej obwodowej prędkości cieczy w ich kanałach wylotowych, a mianowicie:

- rozkład spełniający równanie prostej, czyli równanie wiru sztywnego,
- rozkład spełniający równanie hiperboli, czyli równanie wiru swobodnego.

W rozważaniach dotyczących modelu teoretycznego rozpylacza strumieniowo-wirowego przedstawionych w moich pracach [7] i [8] uwzględnione zostały oba w/w przypadki tego rozkładu prędkości.

Przy rozkładzie spełniającym równanie wiru swobodnego wyprowadzone zależności określające wskaźnik geometryczny rozpylacza strumieniowo-wirowego K_g i współczynnik wypływu μ – po założeniu braku w tym dyspergatorze strugi osiowej, czyli gdy $r_o = 0$ (a więc powstaje wówczas wtryskiwacz wirowy) – przekształcają się w znane z literatury związki określające te wielkości dla rozpylaczy wirowych. Natomiast w przypadku wiru sztywnego zależności określające wskaźnik K_g i współczynnik μ dyspergatora strumieniowo-wirowego przy braku strugi osiowej są inne niż związki je opisujące dla rozpylaczy wirowych.

Mając więc do wyboru dwa przypadki rozkładu składowej obwodowej prędkości cieczy w kanale wylotowym dyspergatora strumieniowo-wirowego zdecydowałem się zamieścić w rozprawie [6] ten, który umożliwił powiązanie z teorią rozpylaczy wirowych. Dlatego przedstawiony w niej został tylko model oparty na równaniu wiru swobodnego. Na podkreślenie zasługuje fakt, że dotychczas tylko dla wtryskiwaczy wirowych istnieje metoda obliczeń, która oparta jest na teorii Abramowicza. Zakłada się w niej właśnie rozkład składowej obwodowej prędkości cieczy w kanale wylotowym rozpylacza spełniający równanie wiru swobodnego. Wprowadzenie w dyspergatorze strumieniowo-wirowym osiowej strugi cieczy w miejsce rdzenia gazowego występującego w rozpylaczach wirowych nie może na krótkiej drodze oddziaływania strug na siebie (zawieranej i osiowej) w komorze wirowej i kanale wylotowym całkowicie zmienić charakter wiru. Ponieważ dyspergator strumieniowo-wirowy zachowuje główne cechy rozpylacza wirowego więc przemawia to za słusznością przyjęcia także w jego kanale wylotowym rozkładu składowej obwodowej prędkości cieczy spełniającego równanie wiru swobodnego. Postacie wzorów, których dotyczą uwagi prof. dr. hab. inż. Zbyszko Kazimierskiego wynikają z założeń przyjętych w rozprawie [6], w tym rozkładu składowej obwodowej prędkości cieczy w kanale wylotowym rozpylacza strumieniowo-wirowego. Należy również zauważyć, że obliczenia rozpylaczy strumieniowo-wirowych oparte na wirze sztywnym zamieszczone w pracy [4] spotkały się z krytyczną oceną w publikacji [1].

Do rozkładu składowej obwodowej prędkości cieczy zamieszczonego w uwagach prof. dr. hab. inż. Zbyszko Kazimierskiego trudno się ustosunkować, gdyż brak jest pełnych informacji o tym przy jakich założeniach został on wyznaczony. Jedyne, które są podane mówią, iż dotyczy on skojarzenia K7/W7 (wersja korpusu/wersja wkładki rozpylacza) przy przepływie strumienia objętości 0,1 l/s. Na podstawie danych zamieszczonych w tab. 7.3 rozprawy [6] można wyliczyć, że dla tego zestawu rozpylanie takiego strumienia masy cieczy ($\dot{m} = 360$ kg/h) będzie występowało przy spadku ciśnienia w dyspergatorze $\Delta p = 0,3875$ MPa.

Ad. 3.

Publikacja [10] (poz. [55] bibliografii zamieszczonej w rozprawie) dotyczy mieszalnika strumieniowego, w którym co prawda występują – podobnie jak w rozpylaczu strumieniowo-wirowym – dwie koncentryczne strugi cieczy, ale w inny sposób wytwarzana jest w tym mieszalniku struga zawirowana i występuje niewspółmierność wymiarów kanałów przepływowych obu tych urządzeń. W mieszalniku długość komory cylindrycznej wynosi ~ 380 mm, a jej średnica $r = 25$ mm. W badanych rozpylaczach natomiast długość kanału wylotowego zmieniała się od 2.00 mm do 3.60 mm (tylko w jednym przypadku wynosiła 6.00 mm) oraz jego średnica najczęściej miała wartość 2.70 mm (najmniejsza wynosiła 1.50 mm, a największa 5.20 mm). Z przytoczonych danych wynika, że kanał przepływowy mieszalnika ma objętość o cztery rzędy wielkości większą od objętości kanału wylotowego rozpylacza. Ponadto oba te urządzenia pracują w innym zakresie prędkości przepływu cieczy (w mieszalniku maksymalnie wynosiła ona ~ 6.5 m/s, zaś warunki dobrego rozpylania powstają przy prędkościach wypływu powyżej 100 m/s).

Przepływ cieczy przez kanał wylotowy rozpylacza strumieniowo-wirowego przy parametrze $L_c/d_c < 2$ (Rys. 1) można w przybliżeniu traktować jako jej wypływ przez otwór ostrokrawędziowy, natomiast przy parametrze $L_c/d_c \geq 2$ należy traktować jako przepływ przez zewnętrzną przystawkę. Wskutek ssącego działania przystawki strumień czynnika przepływającego przez nią jest większy od strumienia przepływającego przez równoważny otwór ostrokrawędziowy. Za kanałem wylotowym dyspergatora struga cieczy ulega gwałtownemu rozszerzeniu. We wtryskiwaczach stosowanych w praktyce parametr $L_c/d_c < 2$, gdyż kanał wylotowy nie powinien być zbyt długi, aby nie powodować zmniejszenia kąta rozpylenia ϕ . Z poleceń zamieszczonych w pracy [3] wynika, że w rozpylaczach wirowych parametr L_c/d_c nie powinien przekraczać jedności. Większość z badanych dyspergatorów, których rezultaty przedstawiono w rozprawie [6] ma korpusy charakteryzujące się tym stosunkiem o wartości od 0.692 do 1.737. Tylko dla jednego z nich (K15) parametr $L_c/d_c = 3.0$. W mieszalniku strumieniowym, którego wyniki badań przedstawione zostały w pracy [10], iloraz ten wynosi natomiast 15.2. Taka wartość parametru L_c/d_c w mieszalniku wynikała z faktu, że w tym przypadku badania eksperymentalne dotyczyły wyznaczenia długości drogi na jakiej nastąpi zmieszanie się dwóch koncentrycznych strug cieczy, zawirowanej i niezawirowanej.

Z różnic w budowie, wymiarach i przeznaczeniu mieszalnika strumieniowego i rozpylacza strumieniowo-wirowego oraz innym zakresie parametrów cieczy przez nie przepływającej wynika, że porównywanie obu tych urządzeń, a zwłaszcza wyciąganie wniosków co do rozkładu składowej obwodowej prędkości cieczy w kanale wylotowym wtryskiwacza na podstawie rozkładu tej prędkości w mieszalniku strumieniowym, jest nieuzasadnione, gdyż kryteria podobieństwa zachodzących zjawisk nie są spełnione.

Ad. 4.

Wyznaczone eksperymentalnie parametry rozpylacza strumieniowo-wirowego przedstawione zostały w rozprawie [6] głównie w funkcji bezwymiarowego zmodyfikowanego wskaźnika geometrycznego K'_g . Wskaźnik ten uwzględnia siedem wymiarów charakteryzujących wkładkę rozpylacza tego typu oraz pięć wymiarów opisujących jego korpus. Dwa z nich dotyczące wkładki (jej wysokość h_w i średnica d_w –

Rys. 1) i korpusu (wewnętrzna jego średnica D i wysokość części współpracującej z wkładką h_k) są ze sobą powiązane. Pozostałych osiem wymiarów może zmieniać się niezależnie. Taka sama wartość wskaźnika $K'_g = \text{const}$ może być więc uzyskana dla różnego zestawu liczbowego wymiarów charakteryzujących dyspergator tego typu. Wpływa to na rozrzut wyników danego parametru przy stałej wartości wskaźnika K'_g .

W badaniach rozpylaczy strumieniowo-wirowych, których rezultaty przedstawiono w dysertacji [6], dwa wymiary wkładki (średnice wkładki d_w i jej kanału osiowego d_o) oraz jeden korpusu (wewnętrzna jego średnica D) były stałe.

Pomimo tego w przypadku gdy na dany parametr rozpylacza strumieniowo-wirowego wpływ miała tylko geometria jego kanałów przepływowych współczynniki korelacji funkcji aproksymujących rezultaty badań są dość wysokie. Wynika to z danych zawartych w tabelach zamieszczonych w rozprawie [6]. I tak dla współczynnika c charakterystyki przepływowej zmieniają się one od 0.931 do 0.970 (tab. 7.4 i tab. 7.5), a dla współczynnika wypływu μ – od 0.811 do 0.878 (tab. 7.8). Natomiast w przypadku gdy parametr charakteryzujący dyspergator zależał dodatkowo także od spadku ciśnienia cieczy Δp w rozpylaczu, to współczynniki korelacji były na ogół niższe. Wówczas przy typowych odmianach konstrukcyjnych rozpylacza strumieniowo-wirowego, tzn. przy parametrze $L_c/d_c < 2$, dla zredukowanej znamionowej liczby przepływu współczynniki korelacji zmieniają się od 0.670 do 0.886 (tab. 7.10), natomiast dla kąta stożka rozpylenia ϕ – od 0.749 do 0.906 (tab. 7.12). Dla średniej średnicy Sautera D_s przy wkładkach o stałej powierzchni przekroju poprzecznego ukośnych kanałów zawirowujących wzdłuż wysokości wkładki współczynniki korelacji funkcji aproksymującej zmieniały się od 0.746 do 0.808 (tab. 7.17), a przy zmniejszającej się w kierunku przepływu tej powierzchni – od 0.958 do 0.978 (tab. 7.17). Dla maksymalnej średnicy arytmetycznej kropeł D_{10max} przy obu w/w przypadkach powierzchni przekroju poprzecznego ukośnych kanałów zawirowujących współczynniki korelacji zmieniały się odpowiednio od 0.778 do 0.841 (stała powierzchnia – tab. 7.19) oraz od 0.822 do 0.854 (powierzchnia zmniejszająca się w kierunku przepływu – tab. 7.19). Niskie wartości współczynników korelacji otrzymano dla parametru opisującego równomierność promieniowego rozkładu gęstości zraszania J . Dla typowych warunków pracy rozpylacza strumieniowo-wirowego, tzn. przy stopniu oddziaływania strug $\lambda > 0$, zmieniały się one wtedy od 0.247 do 0.468 (tab. 7.15). Należy jednak zaznaczyć, że badania równomierności J – zgodnie z tym co podane zostało w rozprawie [6] – prowadzone były w skromniejszym zakresie.

W celu zmniejszenia rozrzutu wyników eksperymentalnych badań dyspergatorów strumieniowo-wirowych, a tym samym podwyższenia współczynników korelacji należy – podobnie jak przy wtryskiwaczach wirowych – ustalić wzajemne relacje pomiędzy niektórymi wielkościami określającymi ich konstrukcje. Dla rozpylaczy wirowych relacje takie – ustalone na podstawie prac wielu autorów – podane są w monografii [3].

Zgodnie z tytułem rozprawy [6] określony w niej został – na podstawie obszernego programu badawczego 201 wersji – wpływ parametrów konstrukcyjnych rozpylaczy strumieniowo-wirowych na ich właściwości, tzn.:

- charakterystykę przepływową,

- współczynnik wypływu,
- zredukowaną znamionową liczbę przepływu,
- kąt stożka rozpylenia,
- promieniowy rozkład gęstości zraszania,
- średnią średnicę Sautera,
- maksymalną średnicę arytmetyczną kropeł.

Powyższe parametry dyspergatorów tego typu przedstawione zostały na wykresach oraz opisane zależnościami aproksymującymi przede wszystkim w funkcji zmodyfikowanego wskaźnika geometrycznego K'_g . Materiał ten stanowi niezbędne narzędzie dla konstruktorów wtryskiwaczy, niezależnie od tego jaki charakter ma rzeczywisty rozkład składowej obwodowej prędkości cieczy w kanale wylotowym rozpylaczy strumieniowo-wirowych.

Na podkreślenie zasługuje również fakt, że przeprowadzone badania eksperymentalne jednoznacznie wykazały, iż na promieniowy rozkład zredukowanej gęstości zraszania rozpylaczy strumieniowo-wirowych z ukośnymi kanałami zawirowującymi oprócz wielkości charakteryzujących kanały przepływowe wkładki – co podaje literatura – wpływ wywierają także te, które opisują jego korpus (rys. 7.46 z dysertacji [6]).

Model teoretyczny służący do analitycznego wyznaczania współczynnika wypływu μ i kąta rozpylenia ϕ dyspergatorów strumieniowo-wirowych opracowywałem w pierwszej połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Wiadczą o tym prace [7] i [8]. Znany on był prof. dr. hab. inż. Zbyszko Kazimierskiemu zarówno z referowania w trakcie seminariów instytutowych, jak i z bezpośrednio przekazywanych opracowań, a wszystkie Jego ówczesne spostrzeżenia zostały uwzględnione. Za przekazywane wtedy uwagi i sugestie jeszcze raz w/w dziękuję. Wybrana wersja tego modelu została opublikowana w ogólnodostępnym piśmie PAN. Zawarta jest ona w pracy [5]. Jak wynika z notki zamieszczonej na końcu tej publikacji artykuł ten wpłynął do redakcji 05.04.1999 r. Mogę przypuszczać, że obecne uwagi prof. dr. hab. inż. Zbyszko Kazimierskiego wynikają – jak sam mówi – ze zmiany w ostatnim okresie Jego zdania na niektóre zagadnienia przedstawione w dysertacji [6].

Za wszystkie uwagi przekazywane mi w trakcie opracowywania rozprawy habilitacyjnej bardzo serdecznie dziękuję ich autorom, a w szczególności prof. dr. inż. Zdzisławowi Orzechowskiemu i prof. dr. hab. inż. Janowi Krysińskiemu.

References

- [1] **Burenkow, DK, Derewiç, IW, Maksimow, WI, Rabçuk, TV**: Rasçet i eksperimentalnoe issledowanie plotnosti orošenija w fazele centrobežno-strujnych forsunok bolšoj proizvoditelnosti, (1996), *Teploenergetika*, **3**, 58-63.
- [2] **Lefebvre, AH**: *Atomization and sprays*, (1989), Hemisphere Publishing Co., New York-Washington-Philadelphia-London.
- [3] **Orzechowski, Z, Prywer J**: *Rozpylanie cieczy*, (1991), Wydanie II, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.

- [4] **Paži, DG, Gałustow, WS:** *Osnovy techniki raspyliwanija židkostiej*, (1984), Izdatielstwo Chimija, Moskwa.
- [5] **Prywer, J:** Obliczanie podstawowych makroparametrów rozpylaczy strumieniowo-wirowych, (2000), *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, Wrocław, **21**, 587-611.
- [6] **Prywer, J:** Wpływ parametrów konstrukcyjnych rozpylaczy strumieniowo-wirowych na ich właściwości, (2003), *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, **916**, seria Rozprawy Naukowe, Łódź, **317**.
- [7] **Prywer, J:** Teoria rozpylaczy strumieniowo-wirowych, (1991), *Arch. Prac IMP PL*, **IMP-1211**, Łódź.
- [8] **Prywer, J:** Rozpylanie cieczy, (1994), *Arch. Prac IMP PL*, **IMP-1300**, Łódź.
- [9] **Prywer, J, Orzechowski, Z, Leszczyński, Z:** *Rozpylacz strumieniowo-wirowy*, Patent nr 44304, (1988), Urząd Patentowy, Warszawa.
- [10] **Prywer, J, Strawiński A:** Współdziałanie dwóch koncentrycznych strug cieczy, (2000), *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, seria Ciepłne Maszyny Przepływowe*, Łódź, **117(II)**, 219-224.

dr inż. Jerzy Prywer, Instytut Maszyn Przepływowych, Politechnika Łódzka

Łódź, dn. 25.05.2004 r.