

*Marek OCHOWIAK, Anđżelika KRUPINŃSKA, Sylwia WŁODARCZAK,
Małgorzata MARKOWSKA
Politechnika Poznańska
Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej*

MODYFIKACJA STANOWISKA I METODYKI POMIARU PARAMETRÓW ROZPYLONEJ STRUGI CIECZY

Celem pracy jest przedstawienie metodyki pomiarowej z wykorzystaniem zmodyfikowanego stanowiska badawczego umożliwiającego scharakteryzowanie powstającego aerozolu. Adaptacja stanowiska pozwala na jednoczesne wyznaczenie średnic kropeł, rozkładu wielkości kropeł (promieniowego oraz objętościowego) i kąta rozpylania. Badane rozpylacze umieszczone były na suwnicy poruszającej się po określonym torze, ze stałą prędkością, co pozwalało na pomiar średnic kropeł w całym obszarze rozpylanej strugi cieczy.

THE MODIFICATION OF SET-UP AND METHODOLOGY OF THE MEASUREMENT OF PARAMETERS OF ATOMIZED LIQUID STREAM

The aim of this paper is to present the measurement methodology using a modified experimental set-up allows for the aerosol characteristic determination. Adaptation of the set-up allows for the simultaneous determination of the droplet diameters, droplet size distribution (radial and volume), and the spray angle. The tested atomizers were placed on a crane moving along a defined path, at a constant speed, which allowed measurement of the droplet diameters in the entire sprayed liquid area.

1. WPROWADZENIE

Pomiar wielkości cząstek i rozkładu ich wielkości stanowi nadal w wielu przypadkach poważne wyzwanie. Jednym z największych problemów związanych z tą kwestią jest fakt, że dane uzyskiwane przy użyciu różnych metod mogą być nieporównywalne. Charakteryzowanie cząstek oraz kontrolowanie ich wielkości i kształtu ma znaczenie podczas wielu procesów badawczo-rozwojowych, jak i bezpośrednio przy optymalizacji produkcji. Jest to także jeden z krytycznych parametrów procesu rozpylania [1-4]. Z tego powodu wydaje się słusznym poszukiwanie wciąż nowych metod, jak i modyfikacja istniejących, w celu pełnej charakterystyki produktu, w jak najkrótszym czasie.

1.1. Pomiar średnic kropeł i cząstek

Średnice kropeł (cząstek) oraz ich rozkład są jednymi z ważniejszych wielkości charakteryzujących wytwarzany produkt. W przypadku procesu rozpylania parametry te uważane są za kluczowe do opisu powstającego aerozolu. Ich znajomość pozwala określić m.in. skuteczność, stabilność czy wytrzymałość powstającego produktu [1]. Wielkość wytwarzanych cząstek ma decydujące znaczenie w farmacji, agrotechnice, ochronie środowiska, nanotechnologii, jak i wielu innych obszarach. Na podstawie rozkładu średnic określa się jednorodność rozpylenia. Węższy rozrzut średnic świadczy o większej jednorodności. Wielkość otrzymywanych kropli określa stopień rozpylenia.

W zależności od zastosowania produktu oczekuje się konkretnych wielkości kropeł (cząstek) oraz rozkładu ich średnic. Zwykle najbardziej pożądanymi są małe krople oraz wąskie rozkłady średnic kropeł. Układ taki pozwala na uzyskanie największej powierzchni kontaktu międzyfazowego. Istnieją jednak miejsca aplikacji procesu, np. rozpylania, gdzie wymagania są odmienne i preferowane są większe krople, przykładowo w agrotechnice. Wśród wielu spotykanych w literaturze średnic zastępczych kropli najczęściej stosowana jest średnia średnica Sautera, opisana zależnością:

$$D_{32} = SMD = \frac{\sum_{i=1}^{i=j} N_i D_i^3}{\sum_{i=1}^{i=j} N_i D_i^2}, \quad (1)$$

D_{32} jest średnicą kropli o takim samym stosunku objętości do pola powierzchni jak całkowita objętość wszystkich kropli do całkowitej powierzchni wszystkich kropli w zbiorze rzeczywistym. Pozwala na obliczenie wydajności i szybkości transferu masy w reakcji chemicznej, opis makrostruktury aerozolu, tam gdzie istotna jest powierzchnia aktywna, tak jak w katalizie czy podczas spalania [16,17].

Występują różne metody określenia średnic kropeł (cząstek) oraz ich rozkładu. Do najpopularniejszych zalicza się metodę mikroskopową oraz metodę opartą na dyfrakcji laserowej [2-6]. Zastosowane techniki pomiarowe, rodzaj analizatora wielkości kropli oraz metody analizy danych i raportowania mają duży wpływ na otrzymywane wyniki [16].

1.2. Metoda mikroskopowa

Metoda mikroskopowa pozwala na uzyskanie zarówno rozkładu liczbowego, jak i objętościowego. Umożliwia charakterystykę kształtu każdej pojedynczej cząstki w badanej próbce. Metoda ta cechuje się względną nieczułością na własności optyczne cząstki. Stosowana w tym przypadku aparatura badawcza jest znacznie tańsza w porównaniu do innych metod. Do głównych wad tej metody można zaliczyć brak możliwości uzyskania wyników dla wszystkich cząstek próbki – wyniki przedstawia się dla wybranej, statystycznej populacji cząstek. Kolejnym utrudnieniem jest czas pomiaru, który jest dłuższy w porównaniu np. do metody opartej na zjawisku dyfrakcji laserowej. Metoda mikroskopowa nie jest odpowiednia do pomiaru bardzo małych cząstek. Ponadto przed każdym pomiarem konieczna jest kalibracja obrazu [1].

Mimo wad i ograniczeń metoda mikroskopowa stanowi cenne narzędzie badawcze. Broniarz-Press i inni [7] zastosowali metodę mikroskopową do uzyskania rozkładów średnic kropeł aerozolu wytwarzanego w inhalatorze medycznym. Rozpylano wodę, wodne roztwory gliceryny o różnych stężeniach oraz wodne roztwory gliceryny z dodatkiem poli(tlenku etylenu) o różnym stężeniu. Analiza wyników wykazała, że zmiana lepkości cieczy znacząco wpływa na rozkład średnic kropeł. Zwiększenie stężenia wodnego roztworu gliceryny skutkowało pojawieniem się większych kropeł oraz rozszerzeniem rozkładu wielkości kropeł. Dodatek poli(tlenku etylenu) przyczynił się do rozszerzenia histogramów. Wraz ze wzrostem stężenia poli(tlenku etylenu) zaobserwowano powstawanie większych kropeł i zanikanie kropeł o najmniejszych średnicach [7].

W pracy Maruszak i Bodzianowskiej [1] do analizy wielkości cząstek wykorzystano automatyczny analizator mikroskopowy. Analizowano substancję farmaceutyczną przed dyspersją, po dyspersji powietrznej, w przygotowanej dyspersji cieczowej, bez i po zastosowaniu ultradźwięków. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono rozkłady wielkości cząstek o kształcie igłowym. Zaobserwowano przesunięcie w kierunku mniejszych wartości (zakres 0-1, gdzie 1 odpowiada igle), co wskazuje na zmianę igłowego kształtu cząstek na skutek ich kruszenia. Kruszenie cząstek jest obserwowane w przypadku stosowania ultradźwięków o różnej mocy, a także, choć w mniejszym stopniu, podczas dyspersji powietrznej [1].

1.3. Metoda oparta na zjawisku dyfrakcji laserowej

Dyfrakcja laserowa stosowana jest zarówno do materiałów ziarnistych, olejów, emulsji, jak i aerozoli. Metody wykorzystujące do pomiaru to zjawisko fizyczne stosowane są w skali laboratoryjnej jak i przemysłowej (farmaceutyka, inżynieria mineralna) [8,9].

Dyfrakcyjna analiza laserowa polega na pomiarze światła rozproszonego przez cząstki, które przechodzi przez skolimowaną wiązkę światła laserowego helowo-neonowego. Oprócz tego rejestrowany jest także pomiar tła, polegający na sprawdzeniu czystości dyspergatora i odjęciu sygnałów zakłócających, pochodzących od obcych cząstek. Cząstki/krople muszą znaleźć się w strefie pomiarowej pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem. Optyka kolimacyjna ma na celu rozszerzenie wiązki laserowej tak, by powstała szeroka wiązka równoległa. Światło lasera skupiane jest za pomocą soczewki Fouriera na detektorze. Odbiornik wyposażony jest w układ detektorów pozwalających na wychwytywanie wzorów rozproszenia światła na powstających strukturach i ich przekształcenie na sygnał elektryczny. Sygnał ten jest poddawany analizie, przy użyciu właściwego modelu optycznego, w celu obliczenia rozkładu wielkości cząstek. Światło, które nie uległo rozproszeniu, trafia także na soczewkę skupiającą Fouriera, a następnie przechodzi przez otwór na środku zespołu detektorów [8].

Dyfrakcja laserowa jest metodą nieinwazyjną pozwalającą na pomiar w szerokim zakresie cząstek (0,1-3000) μm . Metoda ta charakteryzuje się krótkim czasem pomiaru, a także niezawodnością oraz precyzją otrzymanyh wyników, dzięki całkowitej automatyzacji. Nie ma konieczności każdorazowej kalibracji, a wyniki uzyskuje się dla całej populacji cząstek. Jednak posiada ona także pewne ograniczenia. Do najistotniejszych należy brak możliwości uzyskania rozkładu liczbowego, co uniemożliwia określenie liczby cząstek

o danej średnicy. Nie można także rozróżnić kształtu cząstek. Pomiar znacząco utrudniają własności optyczne, które powodują zakłócenia i komplikują analizę. Dodatkowo stosowana aparatura jest kosztowna [8].

W celu określenia prawidłowości uzyskiwanych wyników należy wziąć pod uwagę ich powtarzalność i odtwarzalność. W przypadku powtarzalności należy uwzględnić właściwości próbki, precyzję sprzętu oraz warunki pomiaru. Odtwarzalność obejmuje dodatkowo przebieg pobierania próbek i zmianę warunków pomiaru. Precyzja pomiaru metodą dyfrakcji laserowej jest najczęściej oceniana przy pomocy współczynnika zmienności V , który jest opisany równaniem:

$$V = \frac{s}{\bar{x}}, \quad (2)$$

gdzie:

s – odchylenie standardowe, %,

\bar{x} – średnia arytmetyczna, %.

Na rynku dostępnych jest wiele laboratoryjnych analizatorów wielkości cząstek. Do najpopularniejszych należą urządzenia firmy Malvern Instruments o nazwie Spraytec [8]. Są one często wykorzystywane przez wielu badaczy w eksperymentach naukowych.

Badania Broniarz-Press i współpracowników [10] skoncentrowane były na określeniu wpływu ciśnienia oraz kształtu otworu wylotowego rozpylacza wirowego na objętościowy rozkład kropeł oraz średnią średnicę Sautera. Wyniki uzyskano dzięki zastosowaniu metody dyfrakcji laserowej. Wykazano, że wraz ze zwiększeniem ciśnienia uzyskuje się coraz mniejsze średnice kropeł, a histogram ulega rozszerzeniu. Zaobserwowano także wpływ kształtu otworu wylotowego rozpylacza na wielkość kropeł. Najmniejsze krople otrzymano dla rozpylacza o stożkowym otworze wylotowym, natomiast największe dla otworu cylindrycznego, o stosunku długości do średnicy wynoszącym 4,13 [10].

Ochowiak i współpracownicy [11] analizowali promieniowe rozkłady średnich średnic kropeł oraz średnie średnice Sautera podczas rozpylania wody w dwufazowym rozpylaczu wirowym. W tym celu wykorzystali analizator Spraytec firmy Malvern Instruments, którego działanie opiera się na zjawisku dyfrakcji laserowej. Na podstawie badań zaobserwowano pojawienie się w centralnym obszarze strugi mniejszych kropeł wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa gazu. Wykazano także wpływ geometrii na wartość średniej średnicy Sautera. Obserwowano jej wzrost wraz ze zwiększeniem stosunku wysokości do średnicy komory wirowej. Największe średnie średnice występowały po przekroczeniu wartości 2,75 [11]. Późniejsze badania Ochowiaka

i współpracowników [12] dowiodły, że wartości średniej średnicy w osi aerozolu były dużo mniejsze niż na jego obrzeżach. Różnice pomiędzy wielkościami kropeł były nawet czterokrotne. Wraz ze zwiększeniem stosunku wysokości do średnicy komory wirowej wartości średnich średnic były coraz bardziej zbliżone do siebie. Najmniejsze średnie średnice otrzymano dla wartości stosunku równego 1. W tym przypadku analizowano także objętościowe rozkłady kropeł. Przy stałych wartościach natężeń przepływu wody i powietrza zwiększenie stosunku wysokości do średnicy komory wirowej skutkowało zmniejszeniem udziału kropeł o największych średnicach oraz zwiększeniem udziału objętościowego kropeł o średnicach w średnim zakresie wielkości [12].

Wiercik i współpracownicy [13] analizowali rozkłady wielkości cząstek i średnie średnice w przypadku popłuczyn pochodzących z różnych faz płukania filtrów do odżelaziania i odmanganiania. Próbki popłuczyn pobrane podczas płukania filtra odżelaziającego wykazały, że największy udział objętościowy występował dla cząstek z przedziału (10-100) μm w pierwszych minutach płukania oraz (1-10) μm w kolejnych etapach płukania filtrów. Dla popłuczyn pochodzących z filtra odmanganiającego we wszystkich fazach płukania filtra dominował udział cząstek w przedziale (10-100) μm . Największy udział liczbowy zaobserwowano w przypadku cząstek z zakresu (0,3-0,5) μm , w przypadku filtra odżelaziającego, jak i odmanganiającego. Większe średnice cząstek uzyskano dla filtra odmanganiającego w porównaniu do filtra odżelaziającego we wszystkich fazach płukania. Wartość średniej średnicy Sautera nie przekraczała 10 μm dla obydwóch filtrów [13].

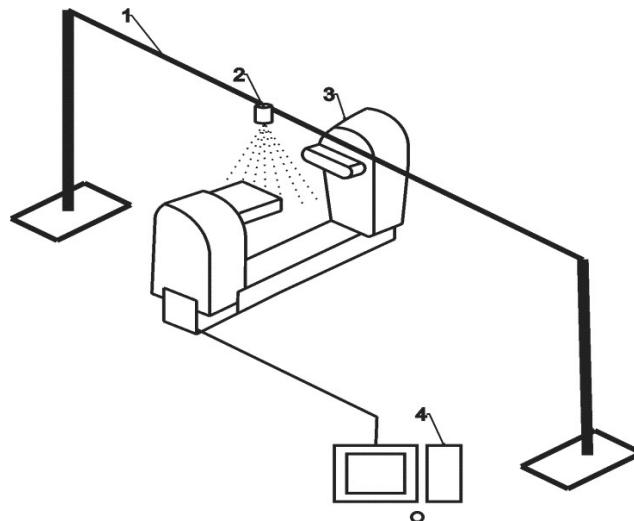
1.4. Kąt rozpylania

Kąt rozpylania jest istotnym parametrem wydajnościowym, który dostarcza wielu cennych informacji na temat procesu rozpylania, co przekłada się na prawidłowe wykorzystanie rozpylonej strugi. Określa zewnętrzny kształt strugi, stopień wymieszania rozpylanej cieczy z otaczającym gazem oraz stopień rozproszenia strugi cieczy [18-20]. Istnieje odwrotna zależność pomiędzy kątem rozpylania a zasięgiem strugi [21]. Kąt rozpylania pozwala na odpowiedni dobór liczby rozpylaczy oraz odległości pomiędzy nimi w przypadku rozpylaczy pracujących grupowo. Znajomość tego parametru jest niezbędna m.in. do prawidłowego projektowania komór spalania turbin gazowych oraz w przypadku oprysków rolniczych [22].

Kąt rozpylania określa kąt stożkowy lub wierzchołkowy, który został utworzony między dwiema prostymi liniami wzdłuż wypływającego z rozpylacza strumienia. Można wyznaczyć go stosując metodę fotograficzną, która polega na rejestracji obrazu rozpylonej strugi, a następnie pomiarze kąta z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania [14,15]. Należy nadmienić, że utworzone proste są zarysem rozpylanej strugi i stanowią swoiste uproszczenie. W rzeczywistości mamy do czynienia z zakrzywioną granicą cieczy w wyniku interakcji z otaczającym powietrzem. Ponadto zwarty strumień cieczy zwęża się wraz ze wzrostem odległości od rozpylacza.

2. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

Celem niniejszej pracy było omówienie zmodyfikowanego stanowiska badawczego pozwalającego na równoczesne wyznaczenie średniej średnicy kropli, rozkładów promieniowych i objętościowych oraz kąta rozpylania, które przedstawiono na rysunku 1. Stanowisko składa się z dwóch modułów: modułu pozwalającego na sterowanie parametrami operacyjnymi procesu oraz modułu pomiarowego.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego:

1 – suwnica, 2 – rozpylacz, 3 – analizator Spraytec, 4 – komputer

Fig. 1. Scheme of experimental set-up:

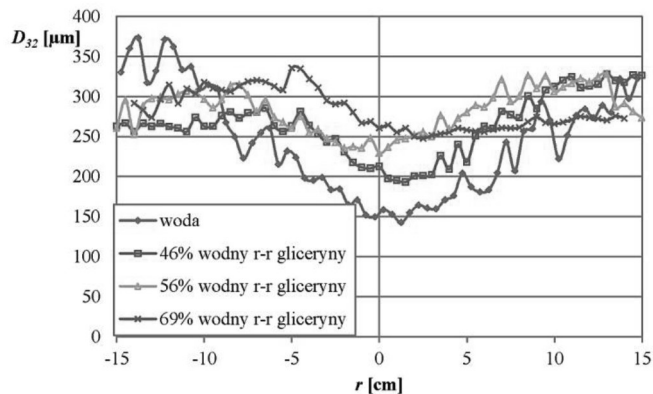
1 – gantry crane, 2 – atomizer, 3 – Spraytec analyzer, 4 – computer

Badane rozpylacze umieszczone były na suwnicy poruszającej się po wyznaczonym torze jazdy wynoszącym $l = 0,842$ m, ze stałą prędkością

$w = 0,05$ m/s. Odległość pomiędzy otworem wylotowym rozpylacza a punktem pomiarowym (wiązką lasera) była stała i wynosiła 0,520 m. Aby zapewnić i ocenić powtarzalność oraz odtwarzalność wyników próbki rozpylano zawsze z tego samego miejsca, a pomiary powtarzano dziesięciokrotnie.

Stosując się do zaleceń producenta, do pomiarów wybrano soczewkę 750 mm. Jest ona dedykowana dla aerozoli, których średnice D_{50} należą do zakresu (5-1600) μm . Jednym z najważniejszych etapów przeprowadzenia procesu pomiarowego jest stworzenie standardowej procedury pomiarowej (SOP). Wybrano tryb pomiaru szybki (*rapid*), o częstotliwości zbierania danych wynoszącej 10 Hz. Rozwiązanie takie pozwala na kolokwialne „zagęszczenie pomiarów”. Czas pomiaru pozwala na dwukrotne przebycie przez rozpylacz wyznaczonej drogi i wynosi 40 s. Zdefiniowano go na podstawie wielokrotnej obserwacji pomiaru testowego. Na tym etapie należy wybrać z dostępnej listy jakie parametry pochodne są dla nas użyteczne. Standardowymi mierzonymi parametrami są m.in. transmisja, stężenie objętościowe, pole powierzchni właściwej, charakterystyczne średnice.

Aby określić parametry powstającego aerozolu konieczne jest wykonanie następujących po sobie etapów procesu pomiarowego. W pierwszej kolejności należy przygotować i rozpylić ciecz, która ma być analizowana. Aeroszol rozpylany jest w strefie pomiarowej, przez którą przechodzi wiązka światła laserowego helowo-neonowego, pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem. Zasada pomiaru została opisana w podrozdziale 1.2. Otrzymane wyniki są dostępne w różnych formach, np. jako dane stabelaryzowane, wykresy wraz z krzywymi skumulowanymi, udziały objętościowe poszczególnych frakcji. Oprogramowanie umożliwia powtórny analizę wyników kompleksowo, jak i wybranych punktów pomiarowych, a także nakładanie wykresów, czy obliczanie wartości średnich. Inną możliwością jest eksportowanie danych do innych programów, w celu dokonywania dalszej analizy. Wielkość kropli jest wyznaczana na podstawie zmierzonego kąta rozproszenia światła (zależność odwrotnie proporcjonalna). Odbiornik urządzenia wyposażony jest w ponad 30 detektorów przystosowanych do zbierania światła rozproszonego, w określonym zakresie kątów.

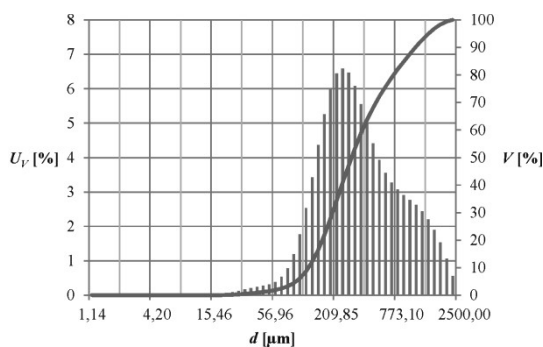


Rys. 2. Przykładowy promieniowy rozkład średnic średnic kropeł w strumieniu cieczy (r -odległość od osi aerozolu)

Fig. 2. An exemplary radial distribution of mean droplet diameter in a liquid stream (r -distance from the aerosol axis)

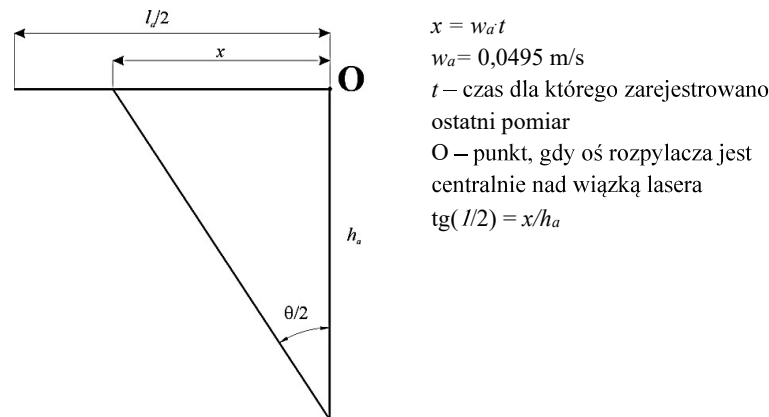
Znając prędkość przesuwu rozpylacza oraz częstotliwość zbierania danych można wyznaczyć wartość analizowanej średniej średnicy kropli (np. D_{32}) w danej odległości promieniowej od osi aerozolu. Po eksportowaniu danych do arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel istnieje możliwość wykreślenia zależności otrzymywanych średnic kropeł w odległości od osi aerozolu. Przykładowy wykres przedstawiono na rysunku 2.

W celu opisu populacji kropeł i ich rozmiarów w rozpylonej strudze cieczy sporządzono histogramy. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy rozkład wielkości kropeł rozpylonej wody uzyskane dla badanego rozpylacza przy zadanych warunkach operacyjnych.



Rys. 3. Przykładowy objętościowy rozkład wielkości kropeł wody w aerozolu

Fig. 3. An exemplary volume distribution of the water droplets in an aerosol



Rys. 4. Zasada pomiaru kąta rozpylania
 Fig. 4. The principle of measuring the spray angle

W celu oszacowania wartości kąta rozpylania wykorzystano odpowiednie zależności trygonometryczne. Znając prędkość przesuwu suwnicy, na której zamontowany jest rozpylacz oraz czas, po którym został zarejestrowany ostatni punkt pomiarowy, można wyznaczyć jedną z przyprostokątnych powstającego trójkąta. Wartość drugiej przyprostokątnej stanowi odległość otworu wylotowego rozpylacza od punktu pomiarowego. Stosunek długości tych przyprostokątnych jest równy tangensowi połowy kąta rozpylania. Zasadę pomiaru przedstawia rysunek 4. Uzyskane wyniki zostały weryfikowane za pomocą metody fotograficznej. Wykazano zbieżność rezultatów.

3. PODSUMOWANIE

Modyfikacja standardowego stanowiska poprzez dodanie suwnicy umożliwiającej ruch badanego rozpylacza oraz opracowanie odpowiedniej procedury pomiarowej pozwala na wyznaczenie pełnej charakterystyki aerozolu. Poza standardowym wyznaczeniem wartości średniej średnicy kropli umożliwia ono określenie średniej średnicy w danej odległości od osi aerozolu, wyznaczenie kąta rozpylania, rozkładu objętościowego i promieniowego oraz określenie jednorodności i symetrii strumienia rozpylonych kropli.

Badania były realizowane w ramach projektu MNiSW (PUT 0912/SBAD/0902).

LITERATURA

1. Maruszak W., Bodziachowska M.: Zastosowanie automatycznej mikroskopowej analizy w analizie farmaceutycznej, *Analiza farmaceutyczna* 66(3), 157-161, 2010.
2. Bocheński C., Jankowski A., Sandel A., Siemiński-Jankowska B.: Badania widma rozpylenia paliwa w systemie common – rail do silników z zapłonem samoczynnym, *Journal of KONES Internal Combustion Engines* 2002.
3. Zbrożek P., Prasula J.: Wpływ wielkości średnic kropli mgły wodnej na efektywność tłumienia pożarów i chłodzenie, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarowa* 2009.
4. Tratnig, A., Brenn, G.: Droplet size spectra in sprays from pressure-swirl atomizers, *International Journal of Multiphase Flow* 36, 349-363, 2010.
5. Zhang H., Bai B., Lui L., Sun H., Yan J.: Droplet dispersion characteristics of the hollow cone sprays in crossflow, *Experimental Thermal and Fluid Science* 45, 25-33, 2013.
6. Ballester, J. M., Dopazo, C.: Drop size measurements in heavy oil sprays from pressure-swirl nozzles, *Atomization and Sprays* 6, 377-408, 1996.
7. Broniarz-Press L., Ochowiak M., Matuszak M., Włodarczak S.: The effect of shear and extensional viscosity on atomization in medical inhaler, *International Journal of Pharmaceutics* 468, 199-206, 2014.
8. Krawczykowski D.: Zastosowanie dyfrakcyjnej analizy laserowej do kontroli uziarnienia produktów przeróbki rud metali, *Inżynieria Mineralna* 1, 233-240, 2017.
9. Corcoran T.E., Hitron R., Humphrey W., Chigier N.: Optical measurement of nebulizer sprays: A quantitative comparison of diffraction, phase Doppler interferometry, and the time flight techniques, *Journal of Aerosol Science* 31, 35-50, 2000.
10. Broniarz-Press L., Włodarczak S., Matuszak M., Ochowiak M., Idziak R., Sobiech Ł., Szulc T., Skrzypczak G.: The effect of orifice shape and the injection pressure on enhancement of the atomization process for pressure-swirl atomizers, *Crop Protection* 82, 65-74, 2016.
11. Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczak S., Matuszak M., Szulc T.: Badania przepływu dwufazowego w stożkowych rozpylaczach wirowych, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 56(6), 215-216, 2017.
12. Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczak S., Matuszak M., Szulc T.: Analiza rozkładu przestrzennego wielkości przestrzennego wielkości

- kropel powstających w rozpylaczach dwufazowych o przepływie zawirowanym, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 57(2), 34-35, 2018.
13. Wiercik P., Ludziejewska J., Kuśnierz M., Burszta-Adamiak E.: Charakterystyka rozkładów wielkości cząstek zawieszin zawartych w popłuczynach pochodzących z różnych faz płukania filtrów do odżelaziania i odmanganiania, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 72, 130-141, 2016.
 14. Lefebvre A.H.: *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1989.
 15. Orzechowski, Z., Prywer, J.: *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy*, WNT, Warszawa, 2008.
 16. Schick, R.J.: *Technology Reference Guide: Understanding Drop Size; Spraying Systems Co.: Wheaton, IL, USA*, 2008.
 17. Włodarczak, S.: *Analiza hydrodynamiki w rozpylaczach wirowych*, rozprawa doktorska, Poznań, 2016.
 18. Som S.K., Mukherjee S. G.: Theoretical and Experimental Investigations on the coefficient of Discharge and Spray cone Angle of a Swirl Spray Atomizing nozzle, *Acta Mechanica* 32,79-102, 1980.
 19. Lee, E.J., Oh, S.Y., Kim, H.Y., James, S.C., Yoon, S.S.: Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a transparent acrylic nozzle at various Reynolds numbers. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 34, 1475–1483, 2010.
 20. Datta A., Som, S.K.: Numerical prediction of air core diameter, coefficient of discharge and spray cone angle of a swirl spray pressure nozzle, *Int. J. Heat Fluid Flow* 21, 412–419, 2000.
 21. Ochowiak M.: *Teoria i praktyka rozpylaczy o przepływie zawirowanym*, BEL Studio Sp. z o.o., Warszawa, 2018
 22. Rashad M., Yong H., Zekun Z., Effect of geometric parameters on spray characteristics of pressure swirl atomizers, *International Journal of Hydrogen Energy* 41, 15790- 15799, 2016.