

Wpłynęło 03.03.2014 r.
Zrecenzowano 26.03.2014 r.
Zaakceptowano 28.04.2014 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

Rozkład prędkości wypływu cieczy i gęstości strumienia objętości w dyszy rozpylacza szczelinowego

Witold KOWALIK^{ABDEF}

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi

Streszczenie

Rozpylacze szczelinowe oraz ich modyfikacje są powszechnie stosowanymi elementami w urządzeniach do oprysku, szczególnie w opryskiwaczach polowych. Aby uzyskać pożądaną efektywność pracy płaskostrumieniowych rozpylaczy szczelinowych, należy poznać wpływ ich parametrów konstrukcyjnych na równomierność wypływu cieczy i rozkład prędkości strumienia. Celem pracy było określenie rozkładu prędkości wypływu cieczy i gęstości strumienia objętości w dowolnym punkcie dyszy rozpylacza szczelinowego. Do badań wybrano rozpylacz szczelinowy Albus Blue. Określono jego podstawowe parametry, a obliczeń teoretycznych dokonano, przyjmując model przepływu jednowymiarowego. Przeprowadzone badania wykazały, że parametry te zmieniają się od wartości minimalnej na skraju dyszy do wartości maksymalnej w jej centrum, a dynamika ich zmienności zależy od wymiarów rozpylacza i parametrów przepływu. Modelując kształt dyszy lub odpowiednie parametry przepływu w części sferycznej rozpylacza, można wpływać na jakość oprysku.

Słowa kluczowe: rozpylacz szczelinowy, strumień objętości, rozkład, gęstość wypływu

Wstęp

W ostatnich latach w gospodarstwach rolnych znacznie zwiększyła się liczba opryskiwaczy polowych [PAWLAK 2012]. Głównym elementem tej maszyny, wpływającym na jakość oprysku, jest rozpylacz. Opryskiwacze polowe wyposażone są najczęściej w rozpylacze szczelinowe oraz ich modyfikacje. Wynika to głównie z wielu ich zalet, do których zalicza się m.in. prostą konstrukcję, dużą niezawodność, płaski strumień oraz pracę w warunkach niskiego ciśnienia, co wpływa korzystnie na żywotność podzespołów opryskiwacza [CZACZYK 2006]. Dzięki odpowiedniemu doborowi i ustawieniu rozpylaczy na belce polowej można uzyskać równomierny oprysk



[PARAFINIUK i in. 2011a, b], ale tylko na płaskiej powierzchni i równoległym do tej powierzchni prowadzeniu belki polowej [SZEWCZYK 2010]. Rozpylacz szczelinowy charakteryzuje się nierównomierną gęstością strumienia. Z badań własnych wynika, że przez centralną część szczeliny, stanowiącej 30% długości dyszy, emitowane jest 65% cieczy. Rozpylacze te zdecydowanie ustępują w tym względzie rozpylaczom strumieniowo-wirowym i pneumatycznym, które charakteryzują się równomierną gęstością zroszenia [PRYWER 2003]. Ponadto na nierównej powierzchni nierównomierność oprysku jest jeszcze większa. W celu wyeliminowania tego zjawiska i niedopuszczenia do powstawania miejsc zawierających zbyt małą ilość środka chemicznego, podaje się go w większej ilości [SZEWCZYK 2010]. Ponieważ do 10% środka chemicznego trafia do atmosfery, to im więcej się go rozpyła, tym większe powoduje to ujemne skutki dla środowiska naturalnego [KAMIŃSKI, KRUK 2012; KOWALIK 2012]. Można tego uniknąć, stosując mniejsze dawki bardziej skoncentrowanego środka chemicznego, za to precyzyjniej [KOO i in. 1993]. Wymaga to jednak zastosowania precyzyjnie działających i prawidłowo dobranych rozpylaczy w połączeniu z systemem czujników [DORR i in. 2013; SZEWCZYK 2010]. Oprócz rozkładu oprysku, na skuteczność chemicznej ochrony roślin wpływa także spektrum rozpylonej strugi wytwarzanej przez rozpylacz [KOSZEL, SAWA 2006]. Rozważania teoretyczne związane z konstrukcją dotyczą najczęściej większości rozpylaczy wykorzystywanych w przemyśle [np. HALDER i in. 2004], niewiele jest natomiast tego typu prac o rozpylaczach wykorzystywanych w rolnictwie [BUTLER i in. 2002]. Aby uzyskać pożądane efekty pracy rozpylaczy, należy poznać wpływ parametrów konstrukcyjnych dyszy na równomierność oraz prędkość wypływu strumienia cieczy, jak również możliwości ich modelowania.

Celem pracy było określenie rozkładu strumienia cieczy w dyszy rozpylacza szczelinowego oraz rozkładu prędkości wypływu cieczy w różnych punktach szczeliny. Opisano również parametry konstrukcyjne rozpylacza, które mają wpływ na ten rozkład.

Materiał i metody badań

Przedmiotem badań był rozpylacz szczelinowy stosowany w opryskiwaczach. W końcowej jego części znajduje się kanał o promieniu r , zakończony powierzchnią sferyczną. Na tej powierzchni jest dysza, która ma postać szczeliny o szerokości B oraz głębokości r_{sb} .

Iloczyn prędkości przepływu cieczy i prostopadłej do niej powierzchni przekroju kanału nazywa się wydatkiem prądu, natężeniem przepływu lub strumieniem objętości. Wyraża on objętość cieczy przepływającej przez dany przekrój w jednostce czasu.

W rozpylaczu szczelinowym powierzchnia prostopadła do kierunku przepływu cieczy ma kształt koła i jest również prostopadła do osi rozpylacza. W sferycznej części rozpatrywana powierzchnia koła maleje od wartości πr^2 do 0. W związku z czym, zgodnie z prawem zachowania masy, prędkość przepływającej cieczy zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do wielkości tej powierzchni. W części sferycznej do obliczeń przyjęto model przepływu jednowymiarowego, a więc uwzględniano składową prędkości, równoległą do osi rozpylacza (prostopadłą do powierzchni prze-

pływu) [ORZECZOWSKI i in. 1997]. Powierzchnia wypływu prostopadła do kierunku strumienia jest to rzut otworu dyszy na powierzchnię prostopadłą do osi rozpylacza. Rzut ten ma kształt elipsy o osiach $2a$ i $2b$.

Aby osiągnąć założony cel pracy, do badań wybrano rozpylacz, który miał równomierny rozkład strumienia cieczy zarówno z lewej, jak i z prawej strony osi. Wycho-dzono w tym przypadku z założenia, że taki rozkład cieczy świadczy o symetrycznym kształcie dyszy oraz właściwej jakości wykonania rozpylacza [WIŚNIEWSKI 2010]. Wyboru dokonano spośród 100 nowych rozpylaczy szczelinowych różnych typów i marek, badając je na stole rowkowym. Rozpylacze umieszczano na wysokości 0,5 m nad powierzchnią stołu i badano, podając wodę pod ciśnieniem 3 bar.

W wyniku bezpośrednich pomiarów określono następujące dane wyjściowe rozpy-lacza szczelinowego:

- przepływ $- Q [m^3 \cdot s^{-1}]$,
- średnicę kanału dyszy $- d = 2r [m]$,
- szerokość szczeliny $- B [m]$,
- głębokość dyszy $- r_{sb} [m]$,

Zastosowane w niniejszej metodzie zależności opracowano, wykorzystując pracę ORZECZOWSKIEGO i in. [1997].

Prędkość początkową cieczy $v [m \cdot s^{-1}]$ w rozpylaczu (w kanale dyszy) określano z zależności:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (1)$$

gdzie:

A – powierzchnia przekroju poprzecznego kanału dyszy [m^2].

Prędkość strumienia $v_1 [m \cdot s^{-1}]$ na początku dyszy obliczono z równania ciągłości ruchu:

$$Q_1 = A_1 v_1 = Av = Q \quad (2)$$

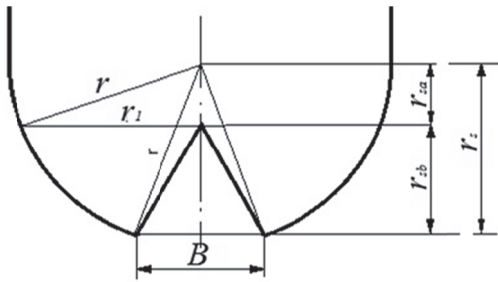
$$v_1 = \frac{A}{A_1} v = \frac{r^2}{r_1^2} v \quad (3)$$

gdzie:

r_1 – promień koła o powierzchni A_1 prostopadłej do kierunku przepływu na początku dyszy [m]; promień obliczono w sposób pokazany na rysunku 1.

$$r_1 = \sqrt{r^2 - r_{Sa}^2} \quad (4)$$

$$r_{Sa} = r_s - r_{sb} \quad (5)$$



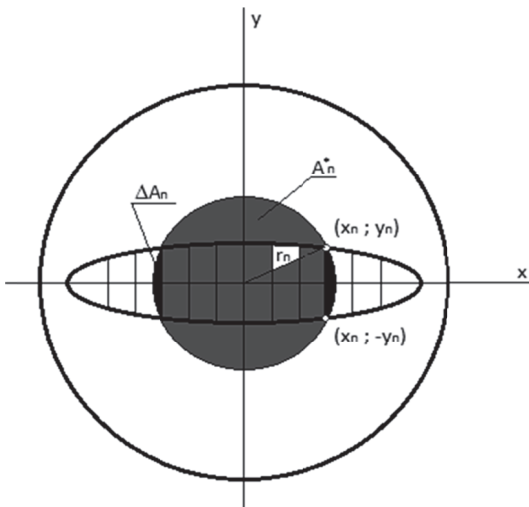
Rys. 1. Sposób określania wybranych parametrów dyszy
Fig. 1. The method to determine selected parameters of the nozzle

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

$$r_s = \sqrt{r^2 - \left(\frac{B}{2}\right)^2} \quad (6)$$

Rzut otworu dyszy na powierzchnię prostopadłą do osi rozpylacza ma kształt elipsy, której półoś $a = r_1$, a półoś $b = B/2$. Elipsę umieszczono w układzie współrzędnych w taki sposób, że oś długa elipsy $2a$ znajduje się na osi X, oś krótka $2b$ na osi Y, natomiast przez początek tego układu przechodzi oś symetrii rozpylacza (rys. 2). W celu obliczenia wielkości strumienia odpływającego w poszczególnych punktach otworu dyszy, elipsę podzielono wzdłuż osi $2a$ na małe powierzchnie F_n . Mają one być tak małe, aby przy założeniu, że ciecz odpływa przez tę powierzchnię ze stałą prędkością, popełnić jak najmniejszy błąd. Dzieląc elipsę na n części wzdłuż osi $2a$, wyznaczono wartości odciętych x_n , między którymi poszczególne części się znajdują. Z równania elipsy określono wartości rzędnych y_n dla poszczególnych wartości x_n , według zależności:

$$y_n = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x_n^2} \quad (7)$$



Rys. 2. Szkic do określenia parametrów strumienia
Fig. 2. Draft for determining flow parameters

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Promień koła r_n [m], przechodzący przez punkt o współrzędnych x_n ; y_n , którego powierzchnia jest prostopadła do kierunku przepływu cieczy określa się z zależności:

$$r_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2} \quad (8)$$

Powierzchnia [m^2] tego koła wynosi:

$$A_n = \pi r_n^2 \quad (9)$$

A powierzchnia [m^2] przepływu cieczy:

$$A_n^* = A_n - 2\Delta A_n \quad (10)$$

gdzie:

ΔA_n – część powierzchni A_n [m^2] wystająca poza przestrzeń rozpylacza, przez którą nie płynie ciecz (pole odcinka kołowego, ograniczonego łukiem l_n [m] i cięciwą a_n [m] o współrzędnych $(x_n; y_n \div x_n; -y_n)$)

$$\Delta A_n = 0,5[l_n r_n - a_n(r_n - h_n)] \quad (11)$$

gdzie:

h_n – strzałka łuku [m].

$$h_n = r_n - x_n \quad (12)$$

$$l_n = \frac{2\pi r_n}{\varphi} \quad (13)$$

gdzie:

φ – miara kąta środkowego w stopniach.

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \frac{x_n}{r_n} \quad (14)$$

to

$$\varphi = 2 \arccos \frac{x_n}{r_n} \quad (15)$$

$$a_n = 2y_n \quad (16)$$

Wartość strumienia objętości cieczy Q_n [$m^3 \cdot s^{-1}$], przepływającej przez powierzchnie A_n^* [m^2], obliczono z zależności:

$$Q_n = Q_{n-1} - 2\Delta Q_n \quad (17)$$

gdzie:

Q_{n-1} – wartość strumienia objętości cieczy [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], przepływającej przez powierzchnię A_{n-1}^* ; początkowa wartość strumienia $Q_1 = Q$ jest znana;

$2\Delta Q_n$ – ilość cieczy, o jaką zmniejszył się strumień objętości [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] w wyniku odpływu jej przez część dyszy o powierzchni F_n z prędkością v_{n-1} .

$$\Delta Q_n = F_n v_{n-1} \quad (18)$$

$$2 \sum_{i=1}^n \Delta Q_i = Q \quad (18a)$$

F_n [m^2] obliczono jako różnicę dwóch odcinków elipsy, według następujących zależności:

$$F_n = \sum_{i=1}^n F_i - \sum_{i=1}^{n-1} F_i \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = ab \arccos \frac{x_n}{a} - x_n y_n \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} F_i = ab \arccos \frac{x_{n-1}}{a} - x_{n-1} y_{n-1} \quad (21)$$

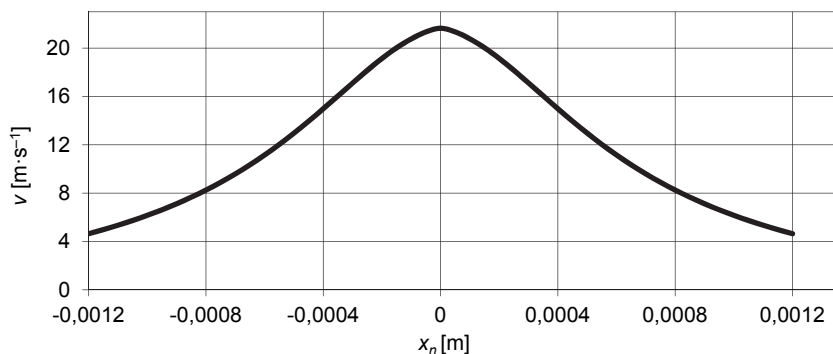
$\arccos \frac{x}{a}$ należy wyrażać w mierze łukowej kąta. Prędkość przepływu cieczy v_n [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] przez powierzchnię A_n^* wynosi:

$$v_n = \frac{Q_n}{A_n^*} \quad (22)$$

Wyniki badań i dyskusja

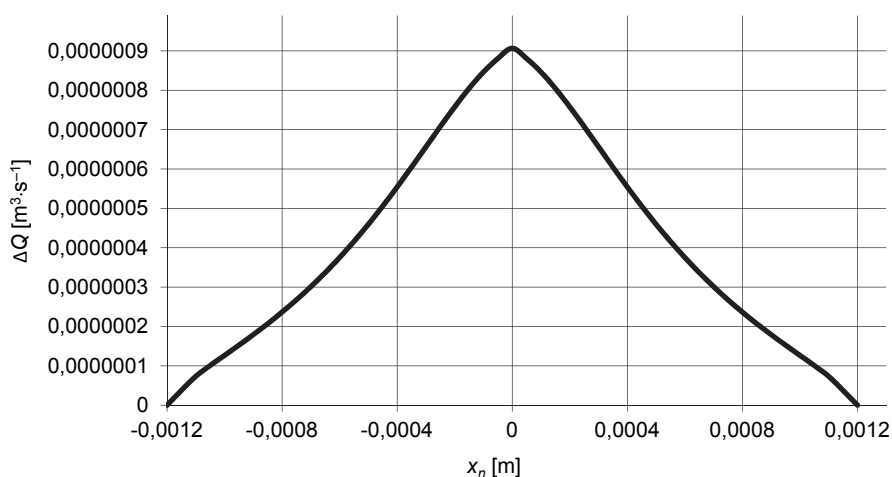
Wyniki badań zmienności parametrów pracy rozpylacza szczelinowego w funkcji odległości miejsca wypływu cieczy od jego osi przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Prędkość przemieszczania się cieczy w rozpylaczu wzrasta od 4,64 do 21,34 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 3). Prędkość o mniejszej wartości ma ciecz dopływająca do dyszy, a niewiele większą ciecz wypływająca na jej początku, tzn. na początku części sferycznej rozpylacza. Ciecz przemieszczająca się wzdłuż osi rozpylacza w części sferycznej zwiększa swoją prędkość prawie pięciokrotnie i osiąga wartość 21,34 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, w warunkach wypływu w centrum dyszy. Odległość, na jakiej następuje ta zmiana, wynosi mniej niż 1,2 mm. Dynamika zmian prędkości wypływu cieczy zależy od wymiarów części sferycznej rozpylacza oraz zmian powierzchni przepływu i wielkości strumienia cieczy (wzór 22).



Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 3. Rozkład prędkości wypływu cieczy z dyszy rozpylacza szczelinowego
Fig. 3. Liquid flow rate layout from a flat-fan nozzle



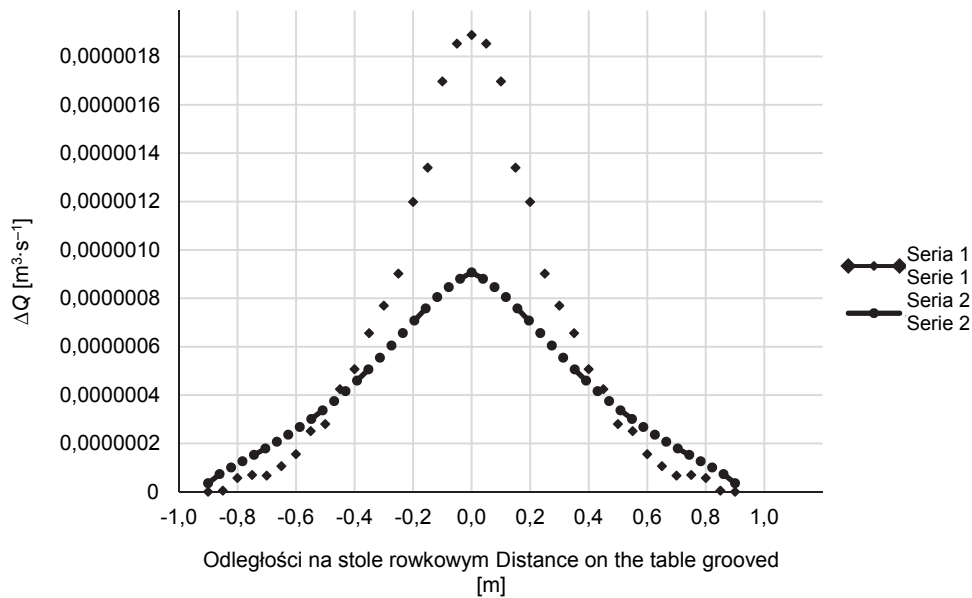
Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 4. Rozkład gęstości strumienia objętości w dyszy
Fig. 4. Layout of stream volume density in a nozzle

Podobny kształt ma przebieg zmienności strumienia objętości cieczy w poszczególnych punktach dyszy. Z rysunku 4. wynika, że wypływ cieczy wzrasta od $0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ w skrajnych zewnętrznych punktach dyszy do $9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ w centrum. Znaczący to, że w skrajnych punktach dyszy ciecz wypływa w małej ilości z niewielką prędkością i parametry te zwiększają się w miarę zbliżania się do centrum. Na rozkład ilości wypływającej z dyszy cieczy duży wpływ ma również kształt szczeliny. Szerokość dyszy wzrasta od 0 w skrajnych zewnętrznych punktach do wartości B w jej centrum. Gdyby dyszę podzielić wzdłuż dłuższej osi (rys. 2) na równe odcinki, to szczelina składałaby się z powierzchni od minimalnej na jej skraju do maksymalnej w środku. Czyli w zewnętrznych punktach dyszy ciecz wypływa z małą prędkością przez małą powierzchnię, natomiast w centrum ciecz wypływa z dużą prędkością przez więk-

szą powierzchnię. Zgodnie ze wzorem 18., ilość cieczy wypływającej w zewnętrznych miejscach dyszy jest mała, natomiast w centrum duża. Zmiana wymiaru dyszy powoduje zmianę rozkładu strumienia wypływu cieczy.

Rozkład cieczy wypływającej z dyszy rozpylacza szczelinowego jest zbliżony w swoim kształcie do rzeczywistego rozkładu cieczy tego rozpylacza na stole rowkowym. Wynika to z rysunku 5., który przedstawia porównanie rzeczywistego rozkładu cieczy rozpylacza szczelinowego Albus Blue, umieszczonego 0,5 m nad stołem rowkowym, z jego rozkładem modelowym. Rozkład modelowy jest odzwierciedleniem rozkładu cieczy w dyszy rozpylacza, przeniesionym na stół rowkowy. Nie są to jednak rozkłady identyczne, ponieważ rozkład modelowy jest bardziej płaski, a więc rozłożony równomierniej.



Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 5. Rozkład cieczy na stole rowkowym rozpylacza Albus Blue – rzeczywisty (seria 1) i modelowy (seria 2)

Fig. 5. Distribution of liquid on grooved table of Albus Blue nozzle – real (series 1) and model (series 2)

Wnioski

1. Prędkość wypływu cieczy z rozpylacza szczelinowego jest różna i zmienia się od minimalnej na skraju dyszy do maksymalnej w jej centrum. Rozkład prędkości zależy od wymiarów części sferycznej rozpylacza i wartości strumienia wypływu cieczy.
2. Ilość wypływającej cieczy z rozpylacza zależy od miejsca jej wypływu. W centrum dyszy wypływa dużo cieczy, natomiast w skrajnych zewnętrznych punk-

tach wypływ jest minimalny. Kształtem dyszy oraz prędkością wypływu cieczy można zmienić rozkład strumienia cieczy oraz jego równomierność.

3. Rzeczywisty rozkład cieczy rozpylacza szczelinowego na stole rowkowym i rozkład modelowy w dyszy rozpylacza przeniesiony na stół rowkowy nie są tożsame.

Bibliografia

BUTLER E.M.C, SWAN T., MILLER P.C.H, WADDELOW S., BRADLEY A., TUCK C.R. 2002. Design factors affecting spray characteristics and drif performance of air induction nozzles. *Bio-systems Engineering*. Vol. 82(3) s. 289–296.

CZACZYK Z. 2006. Dobre rozpylanie [online]. [Dostęp 17.04.2014]. Dostępny w Internecie: www.farmer.pl/technika-rolnicza/serwis-czesci-osprzet/artykuly/dobre-rozpylanie,963,2.html

DORR G.J., HEWITT A.J., ADKINS S.W., HANAN J., ZHANG H., NOLLER B. 2013. A comparison of initial spray characteristics produced by agricultural nozzles. *Crop Protection*. Vol. 53 s. 109–117.

HALDER M.R, DASH S.K., SOM S.K. 2004. A numerical and experimental investigation on the coefficients of discharge and the spray cone angle of a solid cone swirl nozzle. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 28 s. 297–305.

KAMIŃSKI E., KRUK I.S. 2012. Tłumienie drgań poprzecznych belki opryskiwacza polowego za pomocą amortyzatorów. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. Nr 2 s. 83–94.

KOO Y.M., KUHLMAN D.K. 1993. Theoretical spray performance of swirl – type nozzles. *Transactions of the ASAE*. Vol. 36(3) s. 671–678.

KOSZEL M., SAWA J. 2006 Wpływ parametrów pracy rozpylaczy płaskostrumieniowych na spektrum kropeł. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 5 s. 313–319.

KOWALIK W. 2012. Określenie dynamiki znoszenia rozpylonej cieczy za pomocą równania Rosina-Ramlera. *Acta Scientiarum Polonorum. Z. 11(1–2) s. 3–11.*

ORZECZOWSKI Z., PRYWER J., ZARZYCKI R. 1997. *Mechanika płynów w inżynierii środowiska*. Warszawa. WNT s. 94–111.

PARAFINIUK S., SAWA J., WOŁOS D. 2011a. Automatyczne urządzenie do oceny stanu technicznego rozpylaczy rolniczych. *Postępy Nauki i Techniki*. Nr 10 s. 39–48.

PARAFINIUK S., SAWA J., HUYGHEBAERT B. 2011b. Ocena stanu technicznego belki polowej opryskiwacza metodą badania pojedynczych rozpylaczy. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 12 s. 207–214.

PAWŁAK J. 2012. Sadzarki do ziemniaków i opryskiwacze w rolnictwie polskim. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. Nr 4 s. 35–44.

PRYWER J. 2003. Wpływ parametrów konstrukcyjnych rozpylaczy strumieniowo-wirowych na ich właściwości. *Zeszyty Naukowe. Rozprawy Naukowe. Politechnika Łódzka. Z. 317 s. 5–235.*

SZEWczyk A. 2010. Analiza ustawienia, parametrów i warunków pracy rozpylacza w aspekcie jakości opryskiwania upraw polowych. *Monografie XCVII. Wydawnictwo UP we Wrocławiu. ISBN 978–83–7717–003–8 ss. 133.*

WIŚNIEWSKI C. 2010. Ocena jakości wykonania rozpylaczy na podstawie ich parametrów funkcjonalnych. *Problemy Eksploatacji*. Nr 2 s. 49–56.

Witold Kowalik

**LIQUID FLOW VELOCITY DISTRIBUTION AND DENSITY OF THE FLOW RATE
IN THE FLAT-FAN NOZZLE**

Summary

Flat fan sprays and their modifications are widely-used elements in crop-sprayers and especially in field crop-sprayers. A crucial disadvantage of this spray is an uneven layout of the liquid in the spray. To obtain the desired work effects of flat fan sprays it is necessary to get to know the influence of construction parameters on the evenness of the liquid flow and the possibility of its modeling. The aim of this study is to define both the stream density and liquid flow rate at any point of a spray nozzle. The conducted study revealed that the liquid flow rate from the flat-fan spray is different and changes from a minimal value at the end of the nozzle to the maximal value in its central part. The amount of the liquid coming out of the flat-fan spray depends on the flux point. In the center of the nozzle a large part of the liquid comes out while in the extreme external parts the flux is minimal. Modeling the shape of the nozzle we may alter the layout of the liquid flow density, and thus, we may affect the evenness of the spraying.

Key words: flat-fan nozzle, volume stream, distribution, flow density

Adres do korespondencji:

dr inż. Witold Kowalik
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
Katedra Eksploatacji Maszyn
i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi
ul. Głęboka 28, 20–612 Lublin
tel. 81 531-97-13; e-mail: witold.kowalik@up.lublin.pl