

## **OKREŚLENIE DYNAMIKI ZNOSZENIA ROZPYLANEJ CIECZY ZA POMOCĄ RÓWNANIA ROSINA-RAMMLERA**

Witold Kowalik

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

**Streszczenie.** Najczęściej w ochronie roślin stosowane są rozpylacze ciśnieniowe, które zamieniają energię potencjalną sprężonej cieczy na energię kinetyczną cieczy rozpylonej. Ilość wytwarzanych kropeł oraz ich spektrum zależy od ciśnienia roboczego, wielkości i kształtu dyszy oraz parametrów rozpylanej cieczy. Celem pracy jest określenie wielkości oraz ilości znoszenia kropeł wytwarzanych w rozpylaczu przy różnych prędkościach wiatru. Przeprowadzone obliczenia funkcji Rosina-Rammlera wykazały, że nierównomierność oprysku powstająca w wyniku znoszenia kropli przez wiatr jest znaczna. Największa nierównomierność oprysku powstaje w niewielkiej odległości od opryskiwacza. Ze wzrostem tej odległości ilość znoszonej cieczy gwałtownie się zmniejsza.

**Słowa kluczowe:** jakość oprysku, rozkład objętościowy kropeł, nierównomierność oprysku

### **WSTĘP**

Chemiczna ochrona roślin jest zabiegiem szczególnie wrażliwym na jakość wykonania. Jakość jest to zestaw charakterystyk określających stopień spełnienia założonych celów [Garvin 1984]. Zadaniem zabiegów chemicznych jest usunięcie przyczyn utrudniających wzrost i plonowanie roślin poprzez wniesienie agrochemikaliów w określone miejsce i w określonej dawce przy minimalnych skutkach dla środowiska. Jednak ze względu na duże straty środków chemicznych podczas zabiegów efektywność tego procesu jest niska [Kierzak i Wachowiak 2009]. Jednym z wymogów wysokiej jakości oprysków jest pokrycie powierzchni (pola lub rośliny) równomierną warstwą środka chemicznego kroplami o prawie jednakowej średnicy [Orzechowski i Prywer 2008]. Równomierność oprysku jest szczególnie ważna przy stosowaniu środków chemicznych o wysokim stężeniu, ponieważ w przeciwnym przypadku może dojść do miejscowego zniszczenia uprawy lub nieskuteczności zabiegu [Dwiliński i Pietrzyk 1999].

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Witold Kowalik, Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania w Inżynierii Rolniczej Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Poniatowskiego 1, 20-060 Lublin, e-mail: [witold.kowalik@up.lublin.pl](mailto:witold.kowalik@up.lublin.pl)

O skuteczności chemicznej oprysku w znacznym stopniu decyduje również spektrum rozpylonej strugi wytwarzanej przez rozpylacz [Szewczyk 2009, Koszel i Sawa 2006]. Stosowane rozpylacze ciśnieniowe zamieniające energię potencjalną sprężonej cieczy na energię kinetyczną rozpylonej strugi wytwarzają krople, których ilość oraz wielkość (spektrum) zależy od ciśnienia roboczego, wielkości i kształtu dyszy oraz parametrów strugi. Na jakość zabiegu duży wpływ ma ruch powietrza, który zwiększa nierównomierność oprysku poprzez odchylenie strugi, separację i unoszenie kropeł, powodując uszkodzenie sąsiednich plantacji oraz zanieczyszczenie środowiska [Szewczyk i Wilczok 2008].

Celem pracy jest określenie wielkości znoszenia kropeł wytwarzanych w rozpylaczu przy prędkościach wiatru uznawanych za bezpieczne do przeprowadzania oprysków, tj. do  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [Ustawa o ochronie roślin 2003].

## MATERIAŁY I METODA

W badaniach przeprowadzono obliczenia dla rozpylacza płaskostrumieniowego LU 12003. Potrzebne do obliczeń dane uzyskano z wyników badań rozpylaczy dla sprzętu polowego i sadowniczego przeprowadzonych w PIMR Poznań [Szulc i in. 2004]. Za rozpylaną ciecz przyjęto wodę, nie uwzględniając parowania. Wysokość belki polowej nad opryskiwaną powierzchnią przyjęto na poziomie 0,5 m.

Zastosowane w niniejszej metodzie zależności opracowano, wykorzystując prace Orzechowskiego [1976] oraz Orzechowskiego i Prywera [2008].

Wytwarzane w rozpylaczu krople mają prędkość początkową:

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_w}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

$v$  – prędkość początkowa kropli;

$\Delta p$  – różnica ciśnień statycznych po obu stronach otworu rozpylacza [Pa];

$\rho_w$  – gęstość cieczy (wody) [ $\rho_w = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

W wyniku oporu aerodynamicznego kropla porusza się ruchem jednostajnie opóźnionym, zmniejszając prędkość od prędkości początkowej  $v$  do prędkości opadania  $v_{op}$ , a następnie przemieszcza się ruchem jednostajnym. Droga  $s$  [m], jaką przebywa kropla ruchem jednostajnie opóźnionym wynosi:

$$s = \frac{8\rho_w d^{3/2}}{3n\rho_G \sqrt{v_G}} \sqrt{v} = A d^{3/2} \sqrt{v} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

$$A = \frac{8\rho_w}{3n\rho_G \sqrt{v_G}} \quad (3)$$

gdzie:

$\rho_G$  – gęstość gazu (powietrza) [ $\rho_G = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];  
 $\nu_G$  – lepkość kinematyczna gazu (powietrza) [ $\nu_G = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ];  
 $d$  – średnica kropli [ $\mu\text{m}$ ];  
 $n$  – składowa współczynnika oporu aerodynamicznego  $c_x$ ;

$$c_x = \frac{n}{\text{Re}^{0,5}} \quad (4)$$

gdzie: Re – liczba Reynoldsa

$$\text{Re} = \frac{v}{\nu_G} d \quad (5)$$

$$v_{op} = \sqrt{\frac{4g(\rho_w - \rho_g)d}{3\rho_g c_x}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

gdzie:  $v_{op}$  – prędkość opadania kropli;

Przy przemieszczaniu się kropli w zakresie przepływu laminarnego ( $10^{-4} < \text{Re} < 0,4$ ) prędkość opadania kropli można obliczyć z zależności:

$$v_{op} = \frac{g(\rho_w - \rho_g)d^2}{18\mu_G} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7)$$

gdzie:  $\mu_G$  – lepkość dynamiczna gazu (powietrza) [ $\mu_G = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ];

Przy opadaniu kropli w zakresie przepływu przejściowego ( $0,4 < \text{Re} < 10^3$ )

$$v_{op} = 1,4 \sqrt{\frac{4d^{1,6}g(\rho_w - \rho_G)}{55,5\rho_G\nu_G}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

Odległość znoszenia kropli określano z zależności:

$$l = v_w \cdot t \quad [\text{m}] \quad (9)$$

gdzie:

$v_w$  – prędkość wiatru [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $t$  – czas znoszenia kropli [s]

$$t = \frac{0,50 - s}{v_{op}} \quad [\text{s}] \quad (10)$$

Po podstawieniu do wyrażenia 9 otrzymujemy:

$$l = \frac{v_w}{v_{op}}(0,5 - s) \quad [\text{m}] \quad (11)$$

Licznik we wzorze 10 przedstawia drogę, jaką przebywa kropla ruchem jednostajnym z prędkością  $v_{op}$  przy założeniu, że belka polowa znajduje się na wysokości 0,50 m nad opryskiwaną powierzchnią.

Dynamikę znoszenia cieczy określano, obliczając sumaryczny rozkład objętości (masy) kropeł  $\Phi_3(d)$  wytwarzanej przez rozpylacz za pomocą równania Rosina-Rammlera. Funkcja ta dobrze opisuje rozkład rozpylonej cieczy i zgodna jest z danymi doświadczalnymi [Orzechowski 1976].

Rozkład Rosina-Rammlera wyrażony jest następującą zależnością:

$$\Phi_3(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{X}\right)^\delta\right] \quad (12)$$

gdzie:

- $X$  – parametr rozmiaru średnic [ $\mu\text{m}$ ];
- $\delta$  – parametr jednorodności rozpylenia;

Parametr  $\delta$  określany jest na podstawie badań. Jak podaje literatura [Orzechowski i Prywer 2008] w rzeczywistych warunkach rozpylenia parametr  $\delta$  mieści się w przedziale 2–4. Do obliczeń przyjęto  $\delta = 3$ . Parametr  $X$  obliczono z zależności:

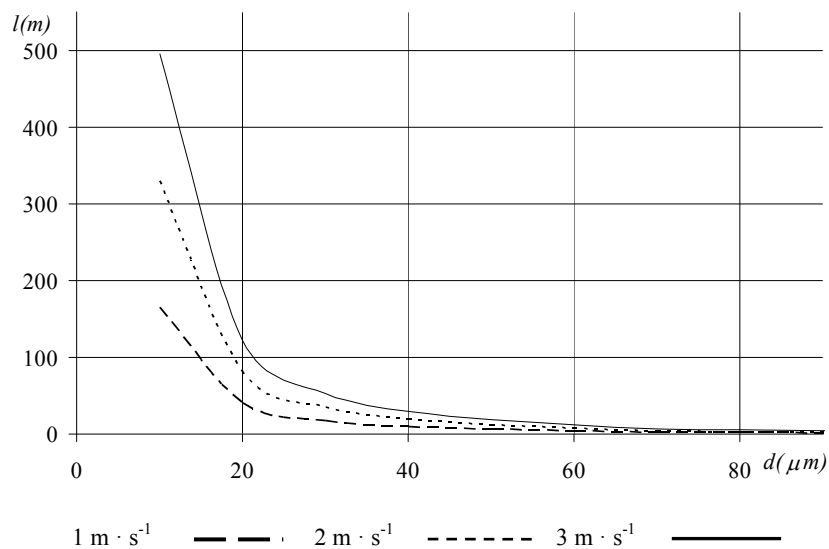
$$X = \frac{D_m}{\sqrt[3]{0,693}} \quad [\mu\text{m}] \quad (13)$$

gdzie:  $D_m$  – średnica medialna (VMD) rozpylonej cieczy.

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

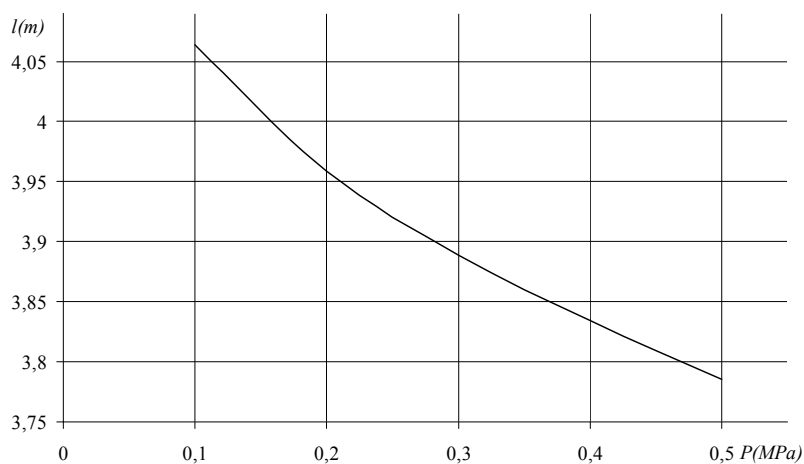
Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunkach 1–5. Wytwarzane przez rozpylacz krople pod wpływem działania wiatru mogą być przenoszone na znaczne odległości.

Jak pokazano na rysunku 1, przy prędkości wiatru  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  odległości te ( $l_1$ ) mogą wynosić ponad 160 m, natomiast przy działaniu wiatru o prędkości  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   $l_3$  jest trzykrotnie większa. Należy zaznaczyć, że są to prędkości dopuszczalne do przeprowadzania oprysków. [Ustawa 2003]. Odległość, na jaką znoszony jest środek chemiczny, zależy zarówno od spektrum wytwarzanych kropeł, jak i od ciśnienia w opryskiwaczu. Ze wzrostem ciśnienia (rys. 2) krople o tej samej średnicy znoszone są na mniejszą odległość. Np. kropla o średnicy  $60 \mu\text{m}$  przy opryskiwaniu pod ciśnieniem  $0,1 \text{ MPa}$  i prędkości wiatru  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  znoszona jest na odległość ponad 4 m ( $4,06 \text{ m}$ ), natomiast przy ciśnieniu pięciokrotnie większym na odległość  $3,78 \text{ m}$ . Jest to spowodowane tym, że przy wyższym ciśnieniu kropla uzyskuje większą energię kinetyczną, a więc i większą prędkość początkową  $v$ . Zgodnie z zależnością 2 droga  $s$  również wzrośnie. Należy zaznaczyć, że ze względu na małą wartość  $s$  (poniżej  $0,5 \text{ m}$ ) oraz dużą prędkość początkową  $v$  ( $10\text{--}23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) wielkość znoszenia na tym odcinku ( $s$ ) jest nieznacząca. Właściwe znoszenie kropli odbywa się na odcinku  $(0,5\text{--}s)$ , a przy wyższym ciśnieniu opryskiwania wartość ta jest mniejsza, czyli zgodnie ze wzorem 11 wartość znoszenia  $l$  jest również mniejsza.



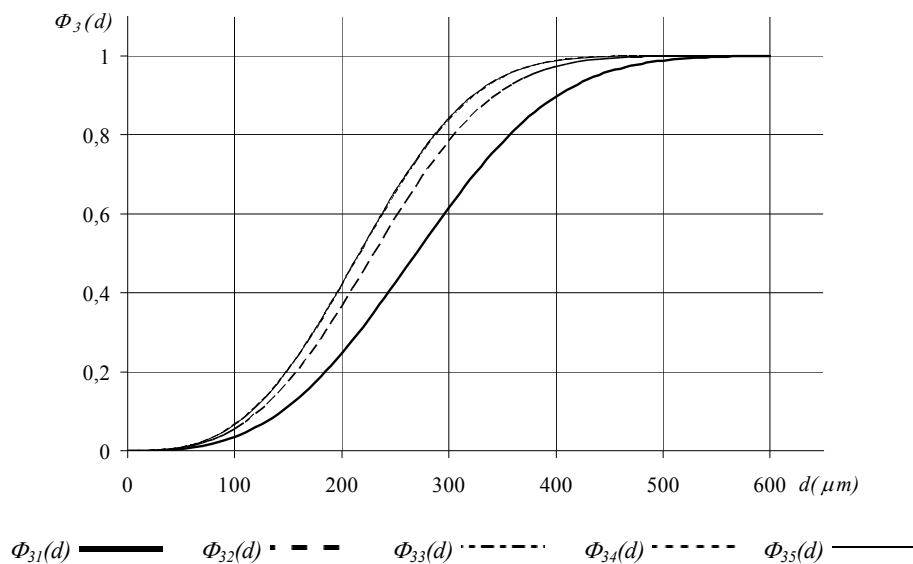
Rys. 1. Odległość znoszenia kropeł przy oprysku pod ciśnieniem 0,1 MPa i prędkości wiatru od 1 do  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 1. The distance drift of spray droplets at 0.1 MPa pressure and wind speed from 1 to  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

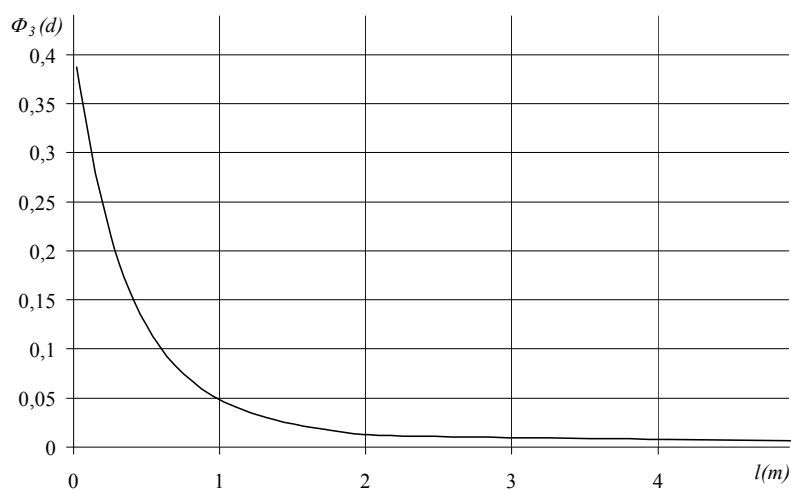


Rys. 2. Odległość znoszenia kropeł o średnicy  $60 \mu\text{m}$  przy prędkości wiatru  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  w zależności od ciśnienia oprysku

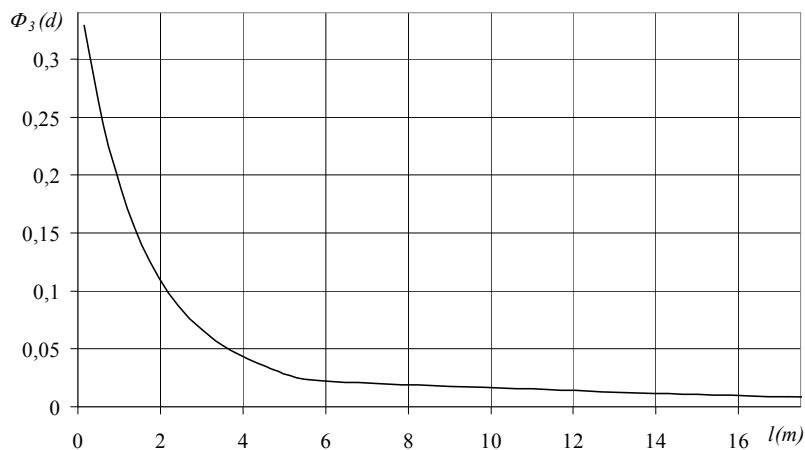
Fig. 2. Distance elimination droplets of diameter  $60 \mu\text{m}$  at a wind speed of  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , depending on spraying pressure



Rys. 3. Sumaryczny rozkład kropeł dla rozpylacza LU 12003 (ciśnienie oprysku 0,1–0,5 MPa)  
 Fig. 3. The overall distribution of spray droplets for LU 12003 (spray pressure of 0.1–0.5 MPa)



Rys. 4. Dynamika znoszenia kropeł przy ciśnieniu oprysku 0,1 MPa i prędkości wiatru  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 (średnica kropeł 50–240  $\mu\text{m}$ )  
 Fig. 4. The dynamics of drift of spray droplets at a pressure of 0.1 MPa and wind speed  
 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (diameter of droplets 50–240  $\mu\text{m}$ )



Rys. 5. Dynamika znoszenia kropeł przy ciśnieniu oprysku 0,5 MPa i prędkości wiatru  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (średnica kropeł 50–180  $\mu\text{m}$ )  
 Fig. 5. The dynamics of drift of spray droplets at a pressure of 0.5 MPa and wind speed  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (diameter of droplets 50–180  $\mu\text{m}$ )

Przeprowadzone obliczenia funkcji Rosina-Rammlera dla badanego rozpylacza (LU12003) przy ciśnieniach oprysku od 0,1 do 0,5 MPa wykazały, że sumaryczny rozkład objętości kropeł przy wyższym ciśnieniu jest bardziej jednorodny niż przy niższym. Świadczy o tym bardziej stromy przebieg krzywych  $\Phi_{33}(d) - \Phi_{35}(d)$  dla ciśnień 0,3–0,5 MPa (rys. 3). Ponadto z wykresu tego wynika, że przy wyższym ciśnieniu wytwarzanych jest więcej drobnych kropeł.

Niejednorodność wytwarzanych przez rozpylacz kropeł wpływa na nierównomierny oprysk poprzez ich znoszenie przez wiatr na różne odległości. Jak wynika z rys. 4 przy ciśnieniu oprysku 0,1 MPa i prędkości wiatru  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  – 38,7% objętości (masy) rozpylanej cieczy podlega znoszeniu na odległość do 164,89 m (rys. 1). Przemieszczeniu pod wpływem wiatru podlegają krople o średnicy  $d = 240 \mu\text{m}$  i mniejsze. Na odległość  $l > 1 \text{ m}$  znoszone jest 5% objętości kropeł (dla  $l = 1 \text{ m}$   $\Phi_3(d) = 0,05$ ) o średnicy  $d < 100 \mu\text{m}$ . Najwięcej rozpylanej cieczy przemieszcza się w pobliżu opryskiwacza. W odległości do 1 m od maszyny znoszone jest 33,7% cieczy, w pasie 1–2 m – 4%, a powyżej 2 m zaledwie 1%.

Ze wzrostem prędkości wiatru oraz ciśnienia opryskiwania wzrastają również parametry znoszenia. Obliczenia wykazały, że prawie 5% objętości kropeł jest znoszona na odległość powyżej 4 m (rys. 5). W odległości do 4 m znoszone jest 28,5% objętości kropeł, natomiast w pasie do 1 m od opryskiwacza zaledwie 13%. Wzrost odległości znoszenia przy wyższych parametrach oprysku jest spowodowane głównie większą prędkością wiatru (3 m/s) natomiast większa ilość znoszonej cieczy na dalszą odległość – wytwarzaniem przez rozpylacz większej ilości kropeł podlegających znoszeniu. Czynnikiem zmniejszającym znoszenie w tym przypadku jest większa energia kine-

tyczna (wyższa prędkość początkowa), dlatego przemieszczeniu podlegają krople o średnicy  $d \leq 180 \mu\text{m}$ , a nie jak w poprzednim przypadku o średnicy  $d \leq 240 \mu\text{m}$ . Mimo wyższej prędkości wiatru i znoszenia cieczy na większą odległość, całkowita wielkość znoszenia cieczy wynosi 32,92% i jest mniejsza o 5,78% niż w przypadku niższego ciśnienia i prędkości wiatru.

## WNIOSKI

1. Niejednorodność wytwarzanych przez rozpylacz kropla wpływ na równomierność oprysku.
2. Nierównomierność oprysku powstająca w wyniku znoszenia kropeł jest znaczna.
3. Największa nierównomierność oprysku powstaje w niewielkiej odległości od opryskiwacza. Ze wzrostem tej odległości ilość znoszonej cieczy gwałtownie spada.
4. W czasie wykonywania oprysków, krople cieczy ze środkiem chemicznym znoszone są na duże odległości, co w dłuższym okresie czasu i przy intensywnych opryskach może ujemnie wpływać na środowisko.
5. Spektrum kropeł wytwarzanych przez rozpylacz określonych za pomocą funkcji Rosina-Rammlera może posłużyć do określenia wielkości znoszenia przy różnych warunkach pracy.

## PIŚMIENNICTWO

- Dwiliński L., Pietrzyk J., 1999. Szacowanie nierównomierności oprysku. Prace Nauk. Polit. Warsz. Mechanika, 176, 5–14.
- Garvin G.A., 1984. What does product quality really. Sloan Management Rev. 1/1984.
- Kierzak R., Wachowiak M., 2009. Wpływ techniki ochrony roślin na skuteczność wykonywanych zabiegów. Probl. Inż. Rol. 2, 75–81.
- Koszel M., Sawa J., 2006 Wpływ parametrów pracy rozpylaczy płaskostrumieniowych na spektrum śladu kropeł. Inż. Rol. 5(80), 313–319.
- Orzechowski Z., 1976. Rozpylanie cieczy. WNT. Warszawa.
- Orzechowski Z., Prywer J., 2008. Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy. WNT. Warszawa.
- Szewczyk A., 2009 Technika opryskiwania płaskich upraw polowych – stan obecny badań i kierunki rozwoju. [www.agengpol.pl](http://www.agengpol.pl)
- Szewczyk A., Wilczok G., 2008. Teoretyczny opis rozkładu rozpylonej cieczy w warunkach działania czołowego strumienia powietrza. Inż. Rol. 5(103), 299–306.
- Szulc T., Sobkowiak B., Rogacki R., Sadowski K., 2004. Wyniki badań rozpylaczy dla sprzętu polowego i sadowniczego. PIMR Poznań. <http://piorin.gov.pl/>
- Ustawa o ochronie roślin z dnia 18 grudnia 2003, Dz. U. 2004, nr 11, poz. 94.



## **DETERMINATION OF DYNAMIC ELIMINATION SPRAY BY ROSIN-RAMMLER EQUATION**

**Abstract.** Most often in plant protection pressure sprayers are used which change potential energy of compressed liquid into kinetic energy of sprayed liquid. Amount of produced drops and their spectrum depend on operating pressure, size and shape of a nozzle and parameters of sprayed liquid. The aim of this study is to determine the size and amount of drifting of drops produced in sprayer with different wind velocity. The conducted calculations of the Rosin-Rammler function have revealed that the irregularity of spraying occurring as a result of drifting of drops by wind is significant. The biggest irregularity of spraying occurs within a small distance from sprayer. With the increase of this distance the amount of drifted liquid is decreasing rapidly

**Key words:** quality of spraying, volume distribution of drops, irregularity of spraying

Praca wykonana w ramach realizacji projektu badawczego MNiSW 493/N-Belgia/2009/0 pt. „Opracowanie metod i urządzenia do kompleksowych badań jakości pracy rozpylaczy rolniczych oraz walidacja tych metod”.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.02.2012