

ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0001-6623-2523

e-mail: [horiashchenko@khnmu.edu.ua](mailto:horiashchenko@khnmu.edu.ua)

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОЗПИЛЕННЯ ПОЛІМЕРУ З СОПЛА НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Нанесення шару полімерного матеріалу на тканину надає нові характеристики до базової тканини. Отриманий матеріал з покриттям може мати функціональні властивості, такі як стійкість до забруднення, проникнення рідин тощо, або готові вироби зі шкіри можуть мати зовсім іншу естетичну привабливість. Вибір способу нанесення покриття залежить від декількох факторів: типу підкладки, формули полімеру та його в'язкості для нанесення покриття, бажаного кінцевого продукту і точності покриття, економії процесу. В умовах сучасних підприємств для нанесення полімерних покриттів доцільним є використання способу нанесення розпиленням через те, що валковий та щітковий способи не дають можливості оперувати з різними формами деталей, а об'ємне нанесення не завжди економічно доцільне. Струменеве нанесення матеріалу подібне до розпилення, але для полімерних покриттів важливим є значення температури, яке в цьому випадку важко контролювати. Тому для нанесення полімерних покриттів доцільним є використання способу розпиленням.

В роботі наведено результати попередніх досліджень розбиття полімерів на краплини. Визначено форму потоку, що виходить з сопла та на основі цього розроблено модель, що описує цей процес. Показано, що для листа потоку полімеру товщина його обернено пропорційна відстані від сопла і  $K=2sx$ , обчислюється, знаючи товщину листа на деякій відстані  $x$  від сопла. Для розпилювального сопла з "порожнистим конусом" з конічним кутом,  $\theta$  та діаметром отвору,  $\delta$  та товщиною листа  $h$ , на виході з сопла, було отримане рівняння для розриву довжини потоку. Отримані результати розрахунків залежності діаметру краплин від швидкості потоку.

Проведено випробування розпилення при різних режимах. Відношення довжини струменя до довжини розриву полотна  $L$  служить початком режиму розпаду. Визначено, що співвідношення довжини струменя до довжини розриву полотна при досягненні  $L$  може бути розумним критерієм для оцінки визначення меж режиму розпилення. Для гарного розпилення (наприклад, розриву полотна), що необхідні малі значення відношення довжини струменя до довжини розриву полотна. Це досягається за рахунок низького поверхневого натягу, високої щільності газу, високого тиску вприскування (швидкості) та великих кутів виходу з сопла.

Отримані результати можуть бути використані для проектування розпилювачів та режимів їх роботи.

Ключові слова: розпилення, потік, полімер, сопло, модель

HORIASHCHENKO Serhiy

Khmelnitskyi National University

## DEVELOPMENT OF THE MODEL OF THE SPRAYING PROCESS OF POLYMER FROM A NOZZLE BASED ON EXPERIMENTAL DATA

Applying a layer of polymer material to the fabric gives new characteristics to the base fabric. The resulting coated material may have functional properties such as resistance to dirt, liquid penetration, etc., or the finished leather products may have a completely different aesthetic appeal. The choice of the coating method depends on several factors: the type of substrate, the polymer formula and its viscosity for coating, the desired final product and the accuracy of the coating, the economy of the process. In the conditions of modern enterprises, it is advisable to use the spray application method for the application of polymer coatings due to the fact that the roller and brush methods do not provide the opportunity to operate with different forms of parts, and volumetric application is not always economically feasible. Jet application of the material is similar to spraying, but for polymer coatings, the temperature value is important, which in this case is difficult to control. Therefore, it is advisable to use the spraying method for applying polymer coatings.

The paper presents the results of preliminary research on the breakdown of polymers into droplets. The shape of the flow coming out of the nozzle was determined, and based on this, a model describing this process was developed. It is shown that for a sheet of polymer flow, its thickness is inversely proportional to the distance from the nozzle and  $K=2sx$ , calculated knowing the thickness  $h$  of the sheet at some distance  $x$  from the nozzle. For a "hollow cone" spray nozzle with taper angle,  $\theta$  and orifice diameter,  $\delta$  and sheet thickness  $h$ , at the nozzle exit, an equation for the flow length break was derived. The obtained results of the calculations of the dependence of the droplet diameter on the flow rate.

A spray test was carried out in different modes. The ratio of the length of the jet to the length of the gap  $L$  serves as the beginning of the decay mode. It was determined that the ratio of the length of the jet to the length of the gap of the canvas when reaching  $L$  can be a reasonable criterion for evaluating the determination of the limits of the spraying mode. For a good spraying (for example, tearing of the web), small values of the ratio of the length of the jet to the length of the tearing of the web are necessary. This is achieved due to low surface tension, high gas density, high injection pressure (velocity) and large nozzle exit angles.

The obtained results can be used for the design of sprayers and their modes of operation.

Keywords: spraying, flow, polymer, nozzle, model

Покриття являють собою поверхневий шар деталі, спеціально створений з певними фізико-механічними характеристиками, і який характеризується певною товщиною, хімічним складом і структурно-фазовим станом, що якісно відрізняється від аналогічних характеристик матеріалу основи. Великий вибір матеріалів, що використовується для створення покриттів, дозволяє отримати різноманітні задані властивості шару для будь-яких поверхонь. Існують різноманітні способи нанесення покриттів, які можна класифікувати з різних позицій. За методами отримання: механічні, фізичні, хімічні, електрофізичні; за виглядом технологічного процесу – гальванічні, вакуумні, наплавлення. Покриття розрізняють за матеріалами – металеві, керамічні, полімерні; за виглядом (станом) матеріалів внесення покриттів в

твердому (дисперсному) стані; нанесення покриттів у рідкій фазі (емульсії, суспензії, фарби, шлікер); нанесення покриттів з газів або газових сумішей. Можна розглядати покриття і за їх призначенням – зносостійкі, корозійно-стійкі, жаростійкі, декоративні тощо. Найбільш послідовну класифікацію способів нанесення покриттів слід наводити з урахуванням механізмів та явищ, що лежать в основі процесів нанесення покриттів і формують їхню структуру: механічні, хімічні, електрохімічні та комбіновані методи, наплавлення, напилювання, високоенергетичні технології [1].

Нанесення шару полімерного матеріалу на тканину надає нові характеристики до базової тканини. Отриманий матеріал з покриттям може мати функціональні властивості, такі як стійкість до забруднення, проникнення рідин тощо, або готові вироби зі шкіри можуть мати зовсім іншу естетичну привабливість.

Наукові основи різних методів нанесення покриттів досить відомі, але не вивчені досить глибоко. Це пов'язано зі складністю кожного фізико-хімічного процесу, зі специфічними особливостями методів і рівнем наукових досліджень для кожного з них [1, 2].

Наведемо різні методи нанесення покриттів [3, 4]:

1. Рідке нанесення покриття: матеріал покриття у вигляді пасти, розчину або латексу:

- ніж для нанесення покриттів, дротяні бари, круглий прокат тощо – це після-підготовчі пристрої;
- пристрої для нанесення покриттів рулонні, зворотні нанесення покриттів роликми, поверхневе та глибоке нанесення покриттів, DIP-нанесення та ін. – це перед- підготовчі прикладні системи;
- просочення: матеріал покривається, коли його занурюють у рідину і надлишок видаляють з рулону стисненням або за допомогою ракелів;
- нанесення покриттів розпиленням: матеріал розпорошується безпосередньо на місці або на тканину, що подається в рулоні.

2. Покриття з сухим з'єднанням (твердий порошок або плівки) [5, 6]:

- розтоплення покриття: екструзія покриття, порошкове покриття і т.д.;
- каландрування: для термопластичних полімерів і гумових сумішей, Zimmer-процесу і т.д.;
- розшарування.

Вибір способу нанесення покриття залежить від декількох факторів: типу підкладки, формули полімеру та його в'язкості для нанесення покриття, бажаного кінцевого продукту і точності покриття, економії процесу.

Крім того, існують різні способи нанесення покриття, основані на застосуванні полімеру до текстилю. Вони можуть бути класифіковані за типом устаткування, використовуваним методом, обліком та формою покриття.

### Постановка проблеми

Аналіз способів нанесення [3, 4, 5] показує, що в умовах сучасних підприємств для нанесення полімерних покриттів доцільним є використання способу нанесення розпиленням через те, що валковий та щітковий способи не дають можливості оперувати з різними формами деталей, а об'ємне нанесення не завжди економічно доцільне. Струменеве нанесення матеріалу подібне до розпилення, але для полімерних покриттів важливим є значення температури, яке в цьому випадку важко контролювати [7]. Тому для нанесення полімерних покриттів доцільним є використання способу розпиленням.

### Аналіз останніх джерел

Аналіз лінійної стабільності також проводився для опису розпаду рідких потоків у вигляді полотна, що можуть використовуватись для нанесення полімерів на рулонні матеріали. Капілярна нестабільність тонких рідких листів полотна спочатку була вивчена [8], який показав, що нестабільність та розрив обумовлені зростанням звивистих хвиль (бічні відхилення центральної лінією полотна), як це зображено на рисунку 1. На рисунку 2 показані експериментальні результати для керованого розриву потоку спрею, який було порушено за допомогою зовнішніх коливань [9]. Формування упорядкованих рядів зв'язків при розпаді полотна чітко видно разом з великими краплями, що формуються з краю листа.

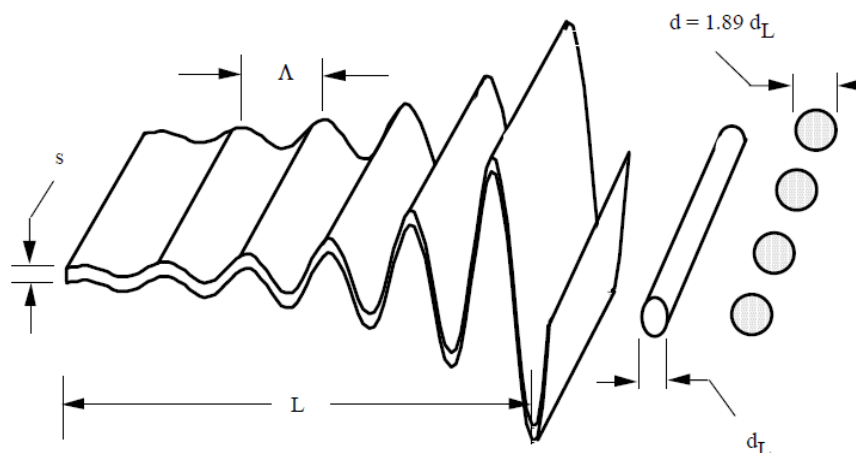


Рис.1. Розривний механізм рідких листів

Майер і Вейс [5] провели аналіз кільцевої рідини, в тому числі визначили межі кругової рідини або циліндричної порожнини в рідкому середовищі (коли співвідношення внутрішнього та зовнішнього радіусів кільця дорівнює нулю) і тонкому планарному листі (коли співвідношення радіуса прагне до сталого значення).

Для полімерних рідин їх результати показують, що коли товщина кільця більша за критичну товщину,  $t = \sigma / (\rho_g U^2)$ , кільцевий струмінь поводить себе як повний струмінь рідини. Коли товщина кільця менше критичної товщини, струмінь поводить себе як двовимірний рідкий лист. Для рідких листів з низькою в'язкістю визначемо довжину хвилі домінуючої нестабільної хвилі за формулою:  $\Lambda = 4\pi\sigma / (\rho_g U^2)$ , де  $U$  - середньоквадратичний середній коефіцієнт відносних швидкостей рідини-газу з обох сторін листа. Фотографії експериментальних розривів листів показують, що тонкий лист швидко перетворюється на краплини (див. Рис. 2) у точці розриву. Діаметр зв'язки,  $dL$ , можна оцінити, припускаючи, що він містить всю рідину в половині довжини хвилі з  $dL = (4\Lambda s / \pi)^{1/2}$ , де  $s$  - товщина полотна [Fraser et al., 1963]. Оскільки поверхня рідини є нестійкою конфігурацією, зв'язки потім розпадаються під дією сил поверхневого натягу, як це видно на рисунку 2.

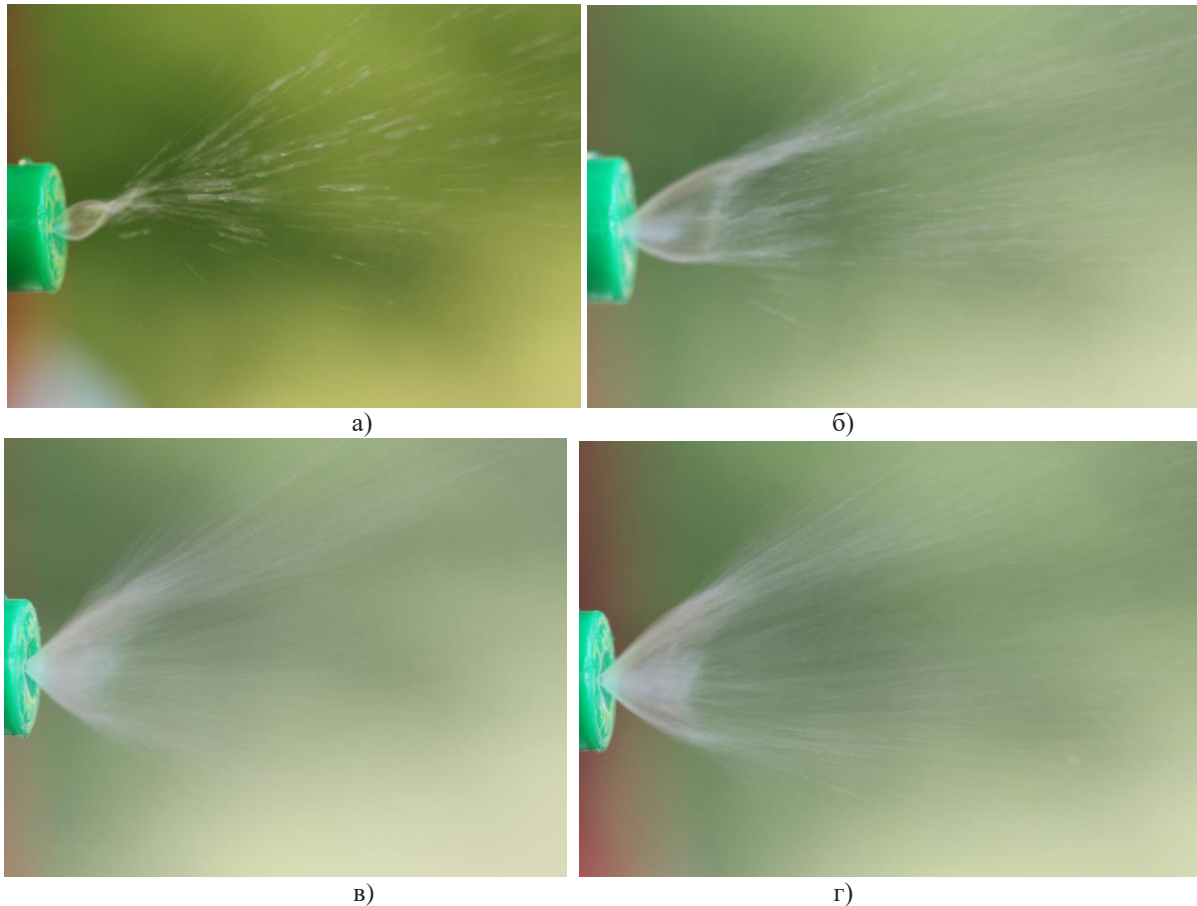


Рис. 2. Фотографії реальних потоків

#### Виклад основного матеріалу

З аналізу Р у розпаді малої швидкості струменя рідини, розрив листа призводить до формуванні краплі діаметром  $d = 1,89dL$ , так що радіус краплі є [8, 9]:

$$r = 2 \cdot 1.89 \sqrt{\frac{\sigma s}{\rho_2 U^2}} \quad (1)$$

Довжина розриву оцінюється для рідких листів як у [6] з теорії [8], які дають:

$$L = D^3 \sqrt{\frac{\rho_1 \sigma K \ln(\eta/\eta_0)}{\rho_2^2 U^2}}, \quad (2)$$

де постійна  $D = 20$  [4],  $\eta$  - амплітуда хвилі, коли лист розривається, а параметр  $\ln(\eta/\eta_0)$  експериментально визначений рівним 2.

На основі отриманих фотографій розробимо модель розпилення, що включає сопло та двофазний потік. Плоска модель показана на рис.3, що корелюється з експериментальною.

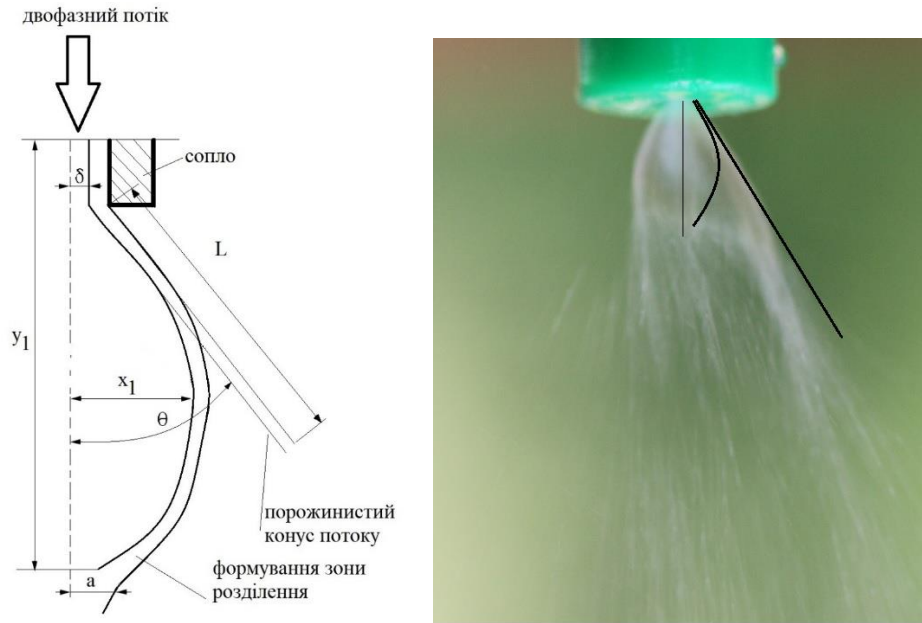


Рис.3. Модель розбиття потоку після виходу з сопла розпилювача

Для листа потоку полімеру товщина його обернено пропорційна відстані від сопла і  $K=2sx$ , обчислюється, знаючи товщину листа на деякій відстані  $x$  від сопла. Для розпилювального сопла з "порожнистим конусом" з кінцевим кутом,  $\theta$  та діаметром отвору,  $\delta$  та товщиною листа  $h$ , на виході з сопла, як показано на рис 3, для розриву довжини буде вірно співвідношення [8]:

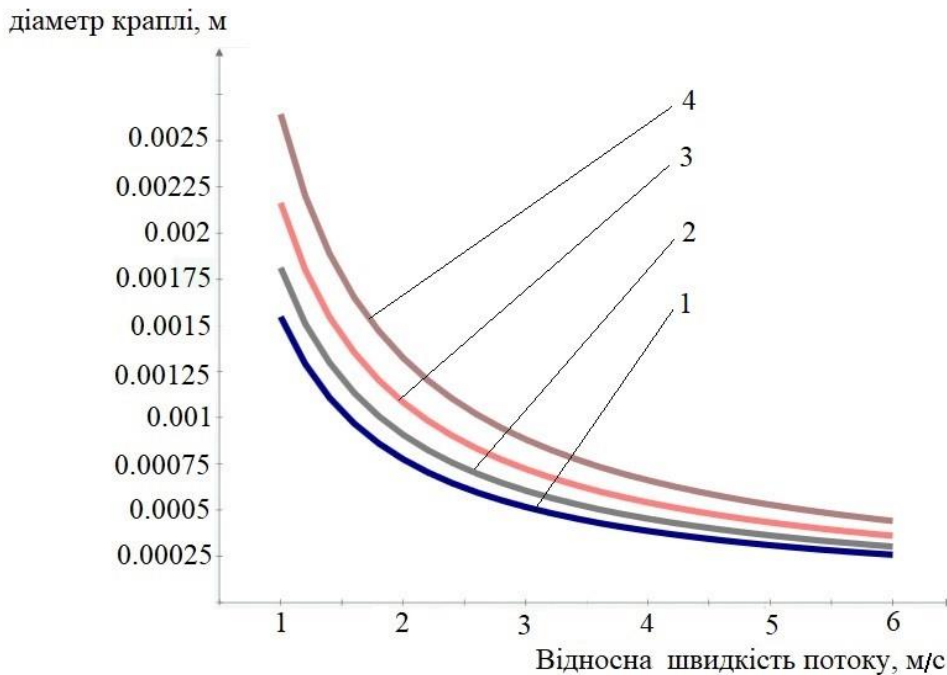
$$L/\delta = D^3 \sqrt{\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right) \left(\frac{\sigma}{\rho_g U^2 \delta}\right) \left(\frac{h}{\delta}\right) \frac{1}{\tan \theta}}, \quad (3)$$

Де  $\rho$  – густина рідини, що розпилюється.

і, отже, з рівняння (3) розмір краплі становить:

$$r = 8.4 D^{-3/2} L \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}. \quad (4)$$

Отримані результати розрахунків залежності діаметру краплин від швидкості потоку показано на рис.4.



1 – при  $\ln(\eta/\eta_0)=8$ , 2 – при  $\ln(\eta/\eta_0)=10$ , 3 – при  $\ln(\eta/\eta_0)=12$ , 4 – при  $\ln(\eta/\eta_0)=14$   
Рис.4. Вплив швидкості струменя на розрив потоку на краплі

На рисунках 5 показані фотографії розриву потоку з сопла ( $\theta = 2,5$  град.,  $\Delta = 0,84$  мм), використовуючи полімер ( $\sigma = 19$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho_L = 0,7$  г/см<sup>3</sup>) при різних швидкостях потоку.

На рис.5,а повільно рідина, що виходить із кільця насадки, при незначній швидкості, розривається і утворює конус. Струмень розбивається на повноконусний потік великих крапель, що рухаються вниз від конусу по ходу струменя. На рис.5,б повільно рідина розпадається на порожнистий конус з невеликими краплями перед формуванням конусу.

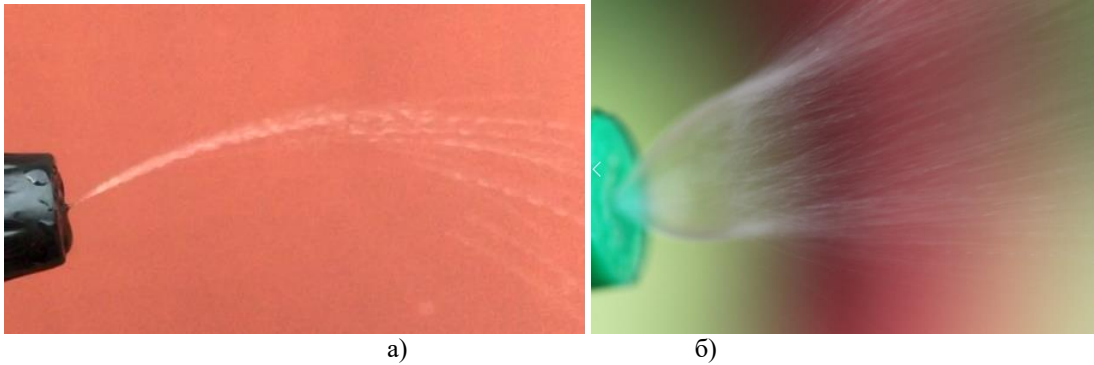


Рис.5. Режими розриву полотна потоку полімеру з сопла

Критерії прогнозування межі між двома різними режимами можна сформулювати за допомогою результатів Тейлора [9] з урахуванням [10, 11, 12]. Довжина зворотного зв'язку конуса,  $y_1$  та ширина,  $x_1$  (див. Рис. 3), являє собою вираз:

$$y_1/F(\theta) = x_1/G(\theta) = \rho_1 U^2 \delta h / 2\sigma, \quad (5)$$

де  $F(\theta) = 2 \ln(\sec\theta + (\sec^2\theta - 1)^{1/2})$ ,  $G(\theta) = 1 - \cos\theta$ .  $\sigma$  – напруження.

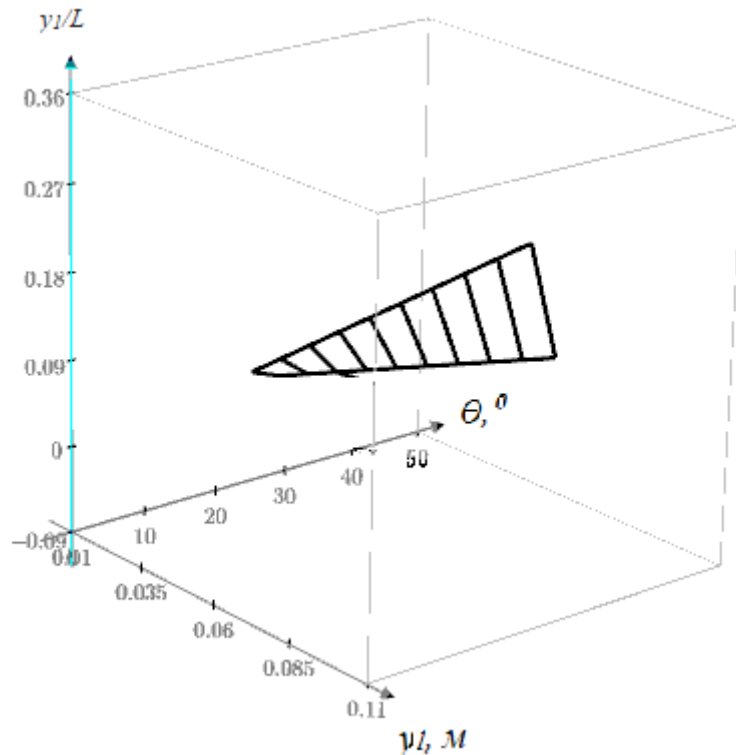


Рис.6 - Критерії прогнозування для розбиття потоку при високій швидкості

### Висновки

Відношення  $y_1$  (від рівняння 5) до довжини розриву полотна  $L$  (з рівняння 3) служить початком режиму розпаду. Для умов, наведених на рисунках 2  $y_1/L$  оцінюється відповідно як 1.59 і 0.21. Це вказує на те, що  $y_1/L=1$  може бути розумним критерієм для оцінки визначення меж режиму розпилення. Для гарного розпилення (наприклад, розриву полотна), рівняння 4 та 5 вказують на те, що необхідні малі значення  $y_1/L$ . Це досягається за рахунок низького поверхневого натягу, високої щільності газу, високого тиску вприскування (швидкості) та великих кутів виходу з сопла.



Отримані результати можуть бути використані для проектування розпилювачів та режимів їх роботи.

### References

1. Dyeing of m-Aramid Fibers in Ionic Liquids / Klaus Opwis, Bilal Celik, Rainer Benken, Dierk Knittel and Jochen Stefan Gutmann // *Polymers* 2020, 12 (8), 1824; URL: <https://doi.org/10.3390/polym12081824>
2. Reitz, R. D. and Bracco, F. V. Mechanism of Atomization of Liquid Jets, *The Physics of Fluids*, Vol. 25, p. 1730, 1982. URL: <https://doi.org/10.1063/1.863650>
3. Golinka, I. E. Problems of applying protective coatings on rolled textile materials / I. E. Golinka // *Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences.* – 2017. – № 6. – С. 267–271.
4. Saleem, A., Medina, L., Skrifvars, M. Influence of Fiber Coating and Polymer Modification on Mechanical and Thermal Properties of Bast / Basalt Reinforced Polypropylene Hybrid Composites. *J. Compos. Sci.* 2020, 4, 119.
5. Xiang, C., Etrick, N. R., Frey, M. W., Norris, E. J., Coats, J. R. Structure and Properties of Polyamide Fabrics with Insect-Repellent Functionality by Electrospinning and Oxygen Plasma-Treated Surface Coating. *Polymers* 2020, 12, 2196.
6. Kaynak, A. and Foitzik, R. (2011), "Methods of Coating Textiles with Soluble Conducting Polymers", *Research Journal of Textile and Apparel*, Vol. 15 No. 2, pp. 107–113. URL: <https://doi.org/10.1108/RJTA-15-02-2011-B012>
7. Tekin, E., de Gans, B. J. and Schubert, U. S. (2004). Ink-jet printing of polymers from single dots to thin film libraries. *Journal of Materials Chemistry*, 14, 262732.
8. Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays" *Atomisation and Spray Technology*, Vol. 3, pp. 309–337, 1988.
9. Suzanne Wilson-Higgins. Trends in book manufacturing on-demand. The Impact of Print-On-Demand on Academic Books. 2018. pp. 119–132
10. Horiashchenko S. Research Spray and Device for Polymer Coatings on Fabric/ *Mechanika* 2015 Proceedings Of The 20th International Scientific Conference, Kaunas - 2015, p.101-104
11. Simulation and Research of the Nozzle with an Ultrasonic Resonator for Spraying Polymeric Materials / S. Horiashchenko, I. Golinka, A. Bubulis, V. Jurenas // *Mechanika.* – 2018. – Vol. 24, No 1. – P. 61-64.
12. Musiał, J.; Horiashchenko, S.; Polasik, R.; Musiał, J.; Kałaczyński, T.; Matuszewski, M.; Śrutek, M. Abrasion Wear Resistance of Polymer Constructional Materials for Rapid Prototyping and Tool-Making Industry. *Polymers* 2020, 12, 873