

О. Р. Пересьолков, канд. техн. наук, доцент, М. П. Кунденко, д-р техн. наук, професор,
О. В. Круглякова, канд. техн. наук, доцент, Є. С. Демчук, аспірант

**ВИМІРЮВАННЯ ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ КРАПЕЛЬ
У ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ГАЗОРІДИННОМУ ПОТОЦІ
ЗА ПНЕВМАТИЧНОЮ ФОРСУНКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ
ЛІЧИЛЬНО-ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: диспергування рідини, лічильно-імпульсний метод, дисперсна структура, якість розпилювання, швидкість потоку, регулювання перепаду тиску, інтенсифікація процесів тепломасообміну.

На теплоенергетичних об'єктах різного призначення часто виникає необхідність у тонкому диспергуванні рідини, що здебільшого реалізується за допомогою пневматичних або парових форсунок. Так, ефективність процесу згоряння рідинних, а особливо, важких рідинних палив у компактних камерах суттєво залежить від ступеня їх диспергування, тобто від розміру крапель.

Якісне тонке розпилювання рідинного палива є доцільним у топках вогневих рекуператорів, випарних апаратах із зануреною камерою згорання, а також у газотурбінних двигунах.

Розпил рідини до мінімальних розмірів крапель використовують в контактних теплообмінних апаратах, де бажано забезпечити максимальне випаровування крапель диспергованої рідини, так як повторне її використання виключено. Такі умови мають місце в парових редуційно-охолоджувальних установках, у харчовій промисловості під час охолодження варених ковбас. Аналогічна проблема є в сталепрокатному виробництві під час змашування гарячекатаних смуг металу перед їх змотуванням.

У роботах [1, 2, 6] показано, що розміри крапель у газорідинних потоках, сформованих пневматичними форсунками, зазвичай лежать у межах 10–150 мкм. Розподіл крапель описують функціями Розіна-Раммлера, гамма- або логнормальними залежностями [5, 9]. У дослідженнях [4, 10, 11] застосовуються РДРА, дифракційні, голографічні та методи відеоаналізу, однак усі вони вимагають прозорого середовища та обмежені щільністю рідинної компоненти в потоці, швидкістю її руху, або є дуже трудомістким і не можуть бути використані для багаторазових системних досліджень.

В даній роботі для дослідження фракційного складу крапель в газорідинному потоці використовується лічильно-імпульсний метод, вперше представлений Віксом і Даклером [12] і вдосконалений в НТУ «ХПІ» на кафедрі загальної теплотехніки. Цей метод доцільно використовувати у полідисперсних газорідинних потоках в широкому діапазоні їх щільностей та швидкості руху.

Лічильно-імпульсний метод заснований на реєстрації та підрахунку числа електричних імпульсів струму h , що виникають під час замикання краплями кінців конічних електродів, відстань S між якими дискретно змінюється під час вимірювань (як показано на рис. 1). Тобто експериментально встановлюється залежність $h = f(S)$. На рис. 2 показані типові графіки залежностей $h = f(S)$, які отримані саме в специфічних умовах вимірювань у високошвидкісному газорідинному потоці після пневматичної

форсунки. Час вимірювання числа замикань краплями за відповідних зазорів був статистично обґрунтований для даних умов диспергування, параметрів електронної апаратури, частоти замикань, відстані від форсунки.

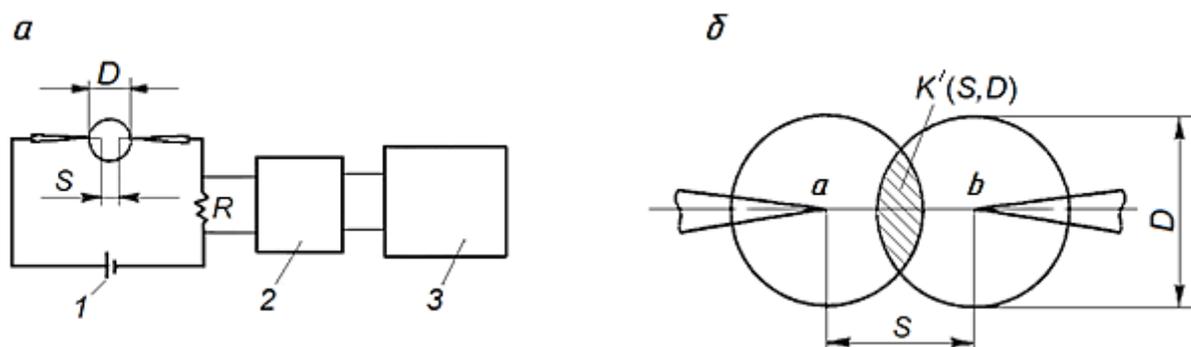


Рисунок 1 – Схема лічильно-імпульсного методу вимірювання розмірів крапель:

a – схема вимірювання частоти замикань:

1 – джерело живлення; 2 – формувач-підсилювач; 3 – електронний лічильник (частотомір)

б – контакт краплі з електродом

$K'(S, D)$ – площа, де знаходиться центр краплі діаметром D при відстані між електродами S , яка може торкнутися кінців електродів

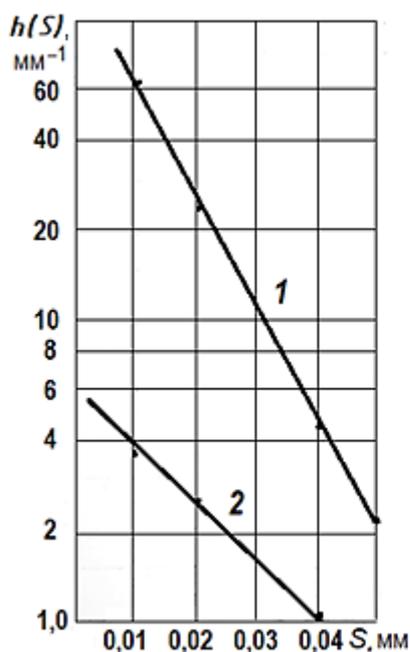


Рисунок 2 – Типові експериментальні залежності числа імпульсів струму h від відстані між кінцями електродів S

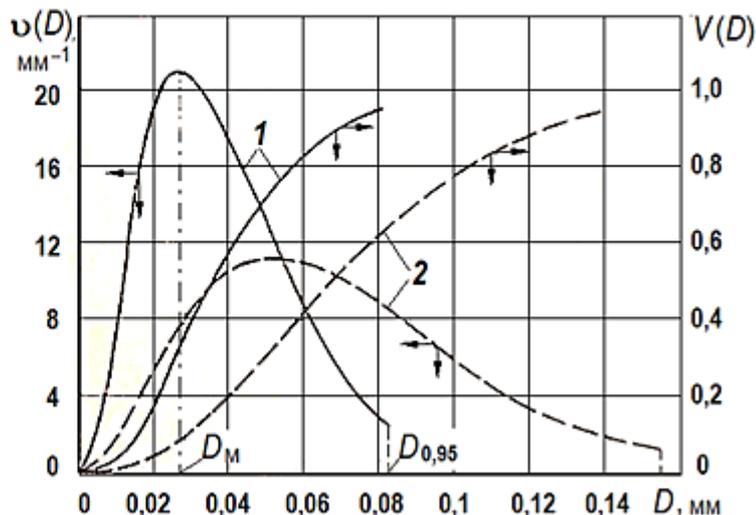


Рисунок 3 – Графіки ненормованих диференціальних $v(D)$ та інтегральних $V(D)$ функцій розподілення об'єму крапель за діаметром, розрахованих за експериментальними даними, показаними на рис. 2

Під час дослідження тонкості розпилу в дрібнодисперсному краплинному потоці вдавалося фіксувати частоту замикань краплями за мінімального зазору між кінцями електродів $S = 0,02$ мм. Для цього кінці електродів заточувалися електрогальванічним способом з радіусом при вершині не більше 1 мкм.

На підставі експериментальної залежності $h = f(S)$ розраховується параметр дисперсного складу α , 1/мм:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{h(S_1)}{h(S_2)}}{S_2 - S_1}.$$

Цей параметр повністю характеризує в однопараметричній залежності (що є суттєвою перевагою лічильно-імпульсного методу) дисперсний склад крапель, у тому числі описує диференціальну функцію розподілу об'єму крапель за діаметрами як

$$v(D) = \frac{2}{3} \frac{\alpha^4}{\pi} D^3 K_1(\alpha D),$$

де K_1 – функція Бесселя другого роду, а також такі характеристики сукупності крапель як модальний діаметр крапель $D_m = 2,39/\alpha$, медіанний діаметр $D_{0,5} = 3,05/\alpha$ і умовно максимальний діаметр $D_{0,95} = 7/\alpha$.

На рис. 3 показані графіки ненормованих диференціальних $v(D)$ та інтегральних $V(D)$ функцій розподілення об'єму крапель за діаметром.

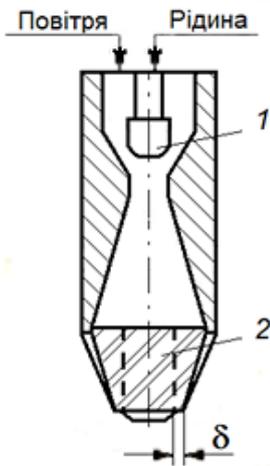


Рисунок 4 – Схема форсунки.

1 – відцентровий подавач рідини; 2 – змінні конічні шнекові завихрювачі потоку з різною глибиною канавки δ на виході

Об'єктом дослідження в даній роботі була пневматична форсунка, схема якої показана на рис. 4. Формування короткого факела диспергованої рідини забезпечується за рахунок закручування газового або газорідинного потоку на виході з форсунки. У конструкції форсунки передбачено пристрій для рівномірного розподілу рідини по стінці каналу ще до підходу до шнекового завихрювача. На виході з відцентрового подавача рідина рівномірно розподіляється по колу, а потім у вигляді плівки разом зі стислим повітрям по стінці каналу переміщується до шнекового завихрювача.

Слід відмітити, що при розрахунку швидкості витікання повітря з канавок завихрювача форсунки надлишковий тиск P_1 приймався таким, що дорівнює тиску перед форсункою. Це пояснюється тим фактом, що площа перерізу у вузькому місці в форсунці на порядок більша за сумарну площу перерізу восьми вихідних отворів з канавок шнекового завихрювача. Відповідно гідравлічні втрати тиску повітря на цій ділянці можна не брати до уваги.

На виході з канавок шнекового завихрювача відбувається взаємодія високошвидкісного потоку повітря і рідини та формується газорідинний потік, який під

дією відцентрової сили набуває форми порожнистого конуса. Така форма факела диспергованої рідини доцільна для топок або контактних апаратів з обмеженими розмірами робочого простору.

У даній роботі дослідження проводились стосовно умов роботи камери згоряння випарних установок з зануреними пальниками. Попередньо, перед вогневими дослідженнями, були проведені вимірювання дисперсного складу крапель води, яка розпилюється пневматичною форсункою описаної конструкції з метою виявити вплив конструктивних і режимних параметрів її роботи на якість диспергування. Так, діаметр циліндричного завихрювача на виході з корпусу форсунки складав 12 мм, зазор δ (тобто, глибина канавки) при використанні змінних конічних шнекових завихрювачів встановлювався як 0,4; 0,7; 0,9 та 1,45 мм. Тиск повітря перед форсункою був в межах $P_{г.} = (0,6-3)10^5$ Па, витрата повітря $G_{г.} = 2-39,5$ кг/год; відношення витрат $G_{г.}/G_{р.} = 0,4-4,5$; розрахункова швидкість витікання повітря з форсунки через зазор δ змінювалась в діапазоні $w_{г.} = 40-310$ м/с. Витрати води і повітря вимірювалися за допомогою ротаметрів.

Досліди проводилися за умови відповідного фіксованого тиску повітря P_1 . Співвідношення $G_{г.}/G_{р.}$ змінювалося витратою води $G_{р.}$. Помічено, що зі збільшенням $G_{р.}$ витрата повітря дещо зменшувалася за рахунок часткового перекривання рідиною канавок завихрювача, що враховувалось під час розрахунків.

Для проведення досліджень в умовах високошвидкісного газорідного потоку, сформованого пневматичною форсункою, в роботі розроблено методику вимірювання дисперсного складу крапель із використанням лічильно-імпульсного методу.

По-перше, як показано на рис. 5, нахилом форсунки необхідно забезпечити нормальне – зверху вниз – натікання краплинного потоку на електроди.

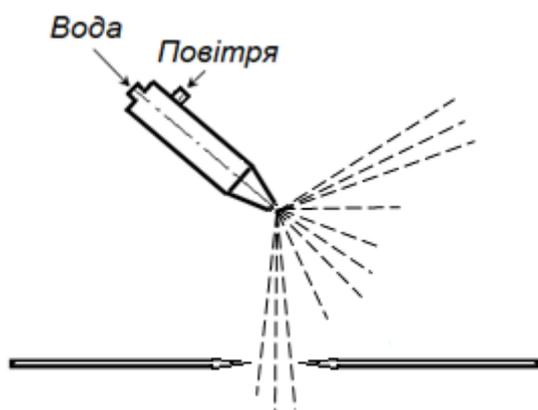


Рисунок 5 – Схема натікання крапель на електроди датчика

По-друге, кінці електродів слід розміщувати в середині твірної полого конуса факела диспергованої води шириною 2–3 мм. З використанням електронного осцилографа було виявлено, що під час виведення кінців електродів з вузької зони газорідного потоку в один або інший бік плівка рідини, що утворюється на електродах під час осадження на них крапель, завдяки ежекції проскакує уздовж електрода і потрапляє в міжелектродний зазор. У такому випадку частотомір фіксує хибні імпульси, форма яких, амплітуда і тривалість істотно перевищують параметри справжніх сигналів, які виникають під час

замикання електродів окремими краплями.

За умов правильного розташування електродів у межах краплинного потоку хибні сигнали не виникають.

Приведений дисперсний склад, що характеризує всю сукупність крапель, утворених форсункою, обчислюється на основі локальних вимірювань функції розподілу $\nu(D)$, але з урахуванням локальних значень густини зрошення в цих же точках факела, яку можна вимірювати відбірною трубкою.

Експериментально було з'ясовано, що на периферійних за радіусом зонах пологоконусного факела після форсунки питома витрата рідкої компоненти значно змен-

шується, і фракційний склад крапель також стає дрібнішим. Тобто приведений дисперсний склад для всієї сукупності крапель значною мірою формується за рахунок центральної зони за товщиною зони факела, де питома витрата диспергованої води найбільша. Тому результати вимірювань дисперсного складу крапель тільки в точці факела досить коректно характеризують тонкість розпилу рідини для досліджуваної форсунки.

Результати вимірювань засвідчили, що під час використання такої пневматичної форсунки процес дроблення та утворення крапель завершується на відстані 10–12 мм від форсунки, і далі дисперсний склад не змінюється, а тільки відбувається розкриття полого конічного факела і розсіювання крапель у просторі. Тому подальші вимірювання проводилися на відстані 15–20 мм від форсунки. не удавалось

В дослідженнях не вдавалось повторити абсолютно однакові значення швидкостей витікання повітря з форсунки w_r , тому об'єднувались результати для близьких розрахункових значень w_r , як показано на графіках (рис. 6). Тут представлено деякі типові експериментальні залежності модального діаметра D_m функції $v(D)$ залежно від співвідношення витрат G_r/G_p .

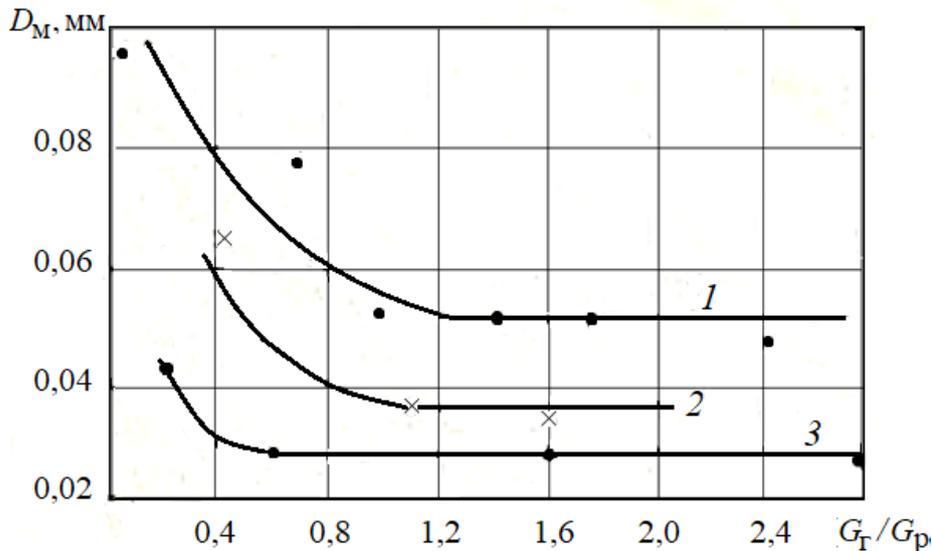


Рисунок 6 – Типові залежності $D_m = f(G_r/G_p)$:
 $\delta = 0,9$ мм; 1 – $w_r = 47-50$ м/с; 2 – $w_r = 100-110$ м/с; 3 – $w_r = 215-220$ м/с

Як видно з рисунку, явно вираженими є дві зони. В першій зоні при відносно великих витратах повітря крупність розпилювання, що характеризується величиною D_m , не залежить від величини G_r/G_p , а тільки від швидкості витікання повітря w_r . В другій зоні при менших відносних витратах газу, коли кількості енергії, що передається від повітряного струменя до води за відповідної швидкості w_r , недостатня для закінчення процесу диспергування, крупність крапель помітно зростає.

Для практичних цілей доцільно налагодити роботу форсунки в автомобельній зоні, де буде забезпечена крупність розпилу, характерна для відповідної швидкості витікання повітря w_r . Крім того, для регулювання режимів експлуатації форсунки необхідно знати порогове значення $(G_r/G_p)_п$ переходу з однієї характерної зони в іншу.

На рис. 6 зведено дані залежності порогового значення $(G_r/G_p)_п$ від швидкості витікання повітря w_r , яка розраховувалась як теоретична для адіабатного процесу витікання повітря зі звукувального сопла [13].

$$w_{\Gamma} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Тут для повітря показник адіабати становить $k = 1,4$, газова стала $R = 287$ Дж/(кг·К).

На рис. 7 по осі абсцис поряд зі шкалою швидкості w_{Γ} наведена шкала P_2/P_1 для орієнтовного визначення порогового значення $(G_{\Gamma}/G_p)_{\Pi}$. Значення P_2/P_1 отримано з для розрахунку теоретичної швидкості під час адіабатного витікання повітря із звужувального сопла.

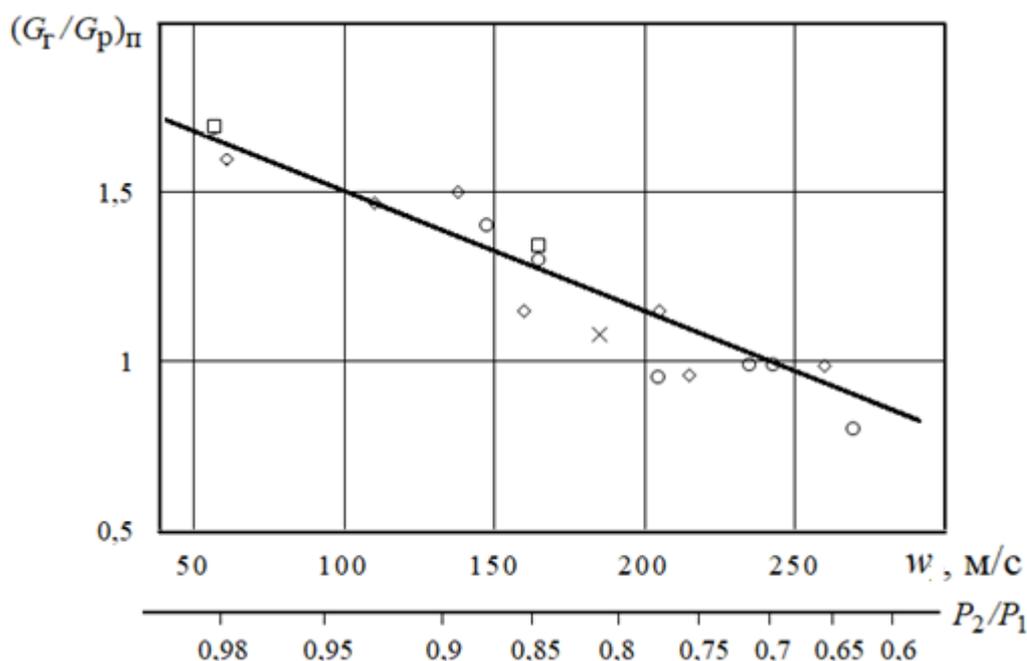


Рисунок 7 – Значення $(G_{\Gamma}/G_p)_{\Pi}$, при яких відбувається перехід залежності $D_m(G_{\Gamma}/G_p)$ в автомодельну область:

\times – $\delta=0,4$ мм; \circ – 0,7; \diamond – 0,9; \square – 1,45 мм

Також, як видно з рис. 7, розмір каналів δ у кінцічному завихрювачі в наведеному діапазоні його значень не впливає на формування дисперсної структури факела.

У топках витрата рідкого палива G_p , що подається на форсунку, обумовлена тепловою потужністю пальника, але треба мати на увазі, що під час експлуатаційних випробувань регулювання якості диспергування завдяки зростанню швидкості w_{Γ} та, відповідно, витрати стисненого газу G_{Γ} шляхом підвищення надлишкового тиску P_1 можлива тільки при $(P_2/P_1) \ll (P_2/P_1)_{\text{кр}}$, як при витіканні зі звужувального сопла.

Слід також зазначити, що експлуатація диспергуючого пристрою за відносних витрат повітря, які значно перевищують порогове значення $(G_{\Gamma}/G_p) \gg (G_{\Gamma}/G_p)_{\Pi}$, нецільна, оскільки при цьому енерговитрати на виробництво та подачу стисненого повітря значно зростають.

На рис. 8 представлені експериментальні дані щодо залежності $D_m = f(w_{\Gamma})$ при роботі досліджуваної форсунки в режимах при $G_{\Gamma}/G_p > (G_{\Gamma}/G_p)_{\Pi}$ для відповідних швид-

костей w_T .

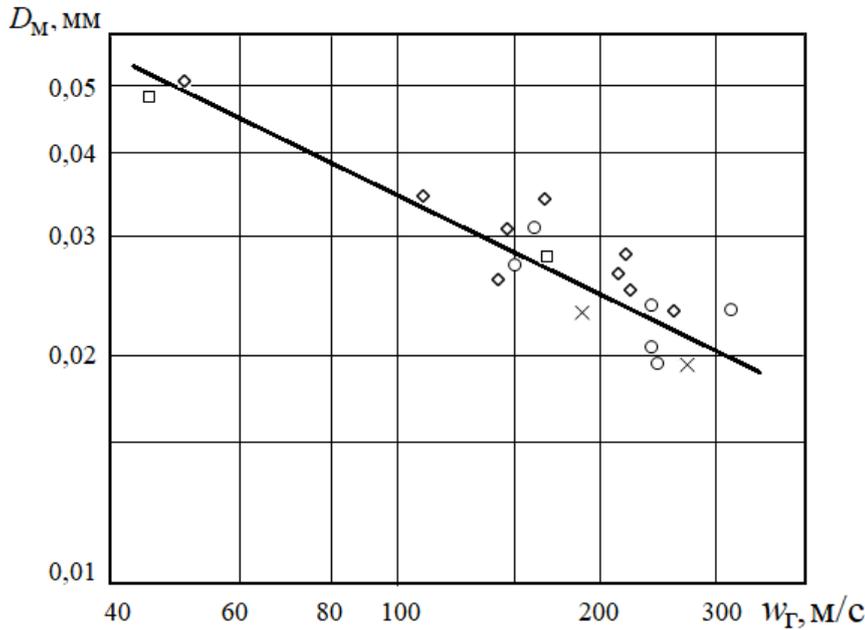


Рисунок 8 – Залежність модального діаметра крапель від швидкості газу:
 \times – $\delta=0,4$ мм; \circ – $0,7$; \diamond – $0,9$; \square – $1,45$ мм

При зміні швидкості в діапазоні $w_T = 40\text{--}300$ м/с для досліджуваної форсунки результати вимірювання можна апроксимувати формулою

$$D_M = \frac{0,36}{\sqrt{w_T}}$$

Перспективним напрямом подальших досліджень є апробація даного методу на пневматичних форсунках інших конструкцій.

Висновки

1. Проведені дослідження роботи пневматичної форсунки для диспергування рідини, яка відтворює полоконусний факел з великим кутом розкриття (до 130°) і високу якість розпилювання (модальний діаметр крапель $D_M = 17\text{--}22$ мм). Така тонкість розпилювання доцільна для інтенсифікації процесів тепломасообміну при використанні рідких палив в топках з обмеженими розмірами.

2. Для локальних вимірювань дисперсних параметрів краплинного потоку використано лічильно-імпульсний метод, що базується на реєстрації імпульсів електричного струму, які виникають при замиканні електродів краплями електропровідної рідини. При цьому, за допомогою однопараметричної залежності, яка описує дисперсний склад крапель, є можливість розрахувати диференціальні та інтегральні функції розподілу об'єму крапель по діаметру, модальний, медіанний, умовно максимальний діаметри крапель, а також питому витрату об'єму рідини в різних точках краплинного потоку.

3. В роботі експериментально встановлена залежність модального діаметра сукупності крапель диспергованої рідини від швидкості руху повітря на виході з форсун-

ки w_T та співвідношення витрат повітря та рідини G_T/G_p . Показано, що для якісного диспергування рідини порогове значення відносної витрати стисненого повітря складає $(G_T/G_p)_п = 0,6-1$. Тому її подальше збільшення вже не призводить до зменшення діаметра крапель і не є доцільним.

4. Досліджено, що найкраща якість диспергування забезпечується при швидкості витікання повітря з форсунки, близької до критичної ($w_T = 280-300$ м/с), при відношенні тисків до форсунки та після неї $P_2/P_1 = 0,55-0,64$, тобто надлишковий порівняно з атмосферним тиск становить $P_{над} = (0,8-0,56) \cdot 10^5$ Па. Тому подальше підвищення тиску P_1 стисненого повітря перед форсункою, в якій вихідні канали кінцевого завихрювача є звужувальними соплами, не призводить до підвищення швидкості витікання повітря, і, відповідно, його витрати, а тільки збільшує не виправдані експлуатаційні витрати.

5. На використаній в роботі моделі пневматичної форсунки досліджено, що якість диспергування залежить від швидкості витікання повітря з неї, тобто від відношення тиску до і після розпилюючого пристрою P_2/P_1 , і також від відносної витрати повітря G_T/G_p . Але при цьому тонкість розпилювання практично не залежить від геометричних параметрів форсунки. Тому можливо використання результатів, одержаних в роботі, не тільки для подібних форсунок інших розмірів, а також для газо- чи парових розпилювачів інших конструкцій.

6. Доцільно під час вогневих випробувань форсунок, умови які характеризують якість згоряння рідкого палива, представляти у вигляді залежностей від співвідношення G_T/G_p , тобто від P_2/P_1 , що може бути використано при розробці систем регулювання процесів горіння.

Література

1. Kramm K., Orth M., Teiwes A., Kammerhofer J. C., Meunier V., Pietsch-Braune S., Heinrich S. Influence of Nozzle Parameters on Spray Pattern and Droplet Characteristics for a Two-Fluid Nozzle. *Chemie Ingenieur Technik*. 2023. Vol. 95. P. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202200152>.
2. Ochman J., Bialik W., Gil S. An experimental study on liquid fuel atomization. *Metalurgija*. 2015. Vol. 54, No. 3. P. 559–562.
3. Islamova A., Tkachenko P., Shlegel N., Kuznetsov G. Secondary Atomization of Fuel Oil and Fuel Oil/Water Emulsion through Droplet-Droplet Collisions and Impingement on a Solid Wall. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 1008. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16021008>.
4. Nuyttens D., Baetens K., De Schampheleire M., Sonck B. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 97, No. 3. P. 333–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001>.
5. Peng L., Li Z., Zhang G., Bi X., Hu W., Tang M., Wang X., Peng P., Sheng G. A review of measurement techniques for aerosol effective density. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 778. Article No. 146248. ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146248>.
6. Poozesh S., Akafuah N. K., Campbell H. R., Bashiri F., Saito K. Experimental and Mathematical Tools to Predict Droplet Size and Velocity Distribution for a Two-Fluid Nozzle. *Fluids*. 2020. Vol. 5, No. 4. Article No. 231. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids5040231>.
7. Rimbert N., Castanet G. Liquid atomization out of a full cone pressure swirl nozzle. *arXiv preprint*. 2010. arXiv:1008.2474. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1008.2474>.
8. Sijs R., Kooij S., Bonn D. Droplet size from Venturi air induction spray nozzles.

Experiments in Fluids. 2023. Vol. 64. Article No. 43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03582-2>.

9. Cerruto E., Manetto G., Papa R., Longo D. Modelling Spray Pressure Effects on Droplet Size Distribution from Agricultural Nozzles. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 19. Article No. 9283. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199283>.

10. Minov S. V., Cointault F., Vangeyte J., Pieters J. G., Nuyttens D. Spray Droplet Characterization from a Single Nozzle by High Speed Image Analysis Using an In-Focus Droplet Criterion. *Sensors*. 2016. Vol. 16, No. 2. Article No. 218. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16020218>.

11. Li C., Christen C. E., Hogan C. J. Jr, Fredericks S. A., Hong J. Automated Droplet Size Distribution Measurements Using Digital Inline Holography. *arXiv preprint*. 2019. arXiv:1906.09634.

12. Wicks, M., Dukler, A. E. In situ measurements of drop size distribution in two-phase flow: A new method for electrical conducting liquids. *Int. Heat Transfer Conf.*, Chicago, Illinois. 1966.

13. Moran, Michael J., Shapiro, Howard N., Boettner, Daisie D., Bailey, Margaret B., *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 9th edition, Iowa State University, Oboken, NJ: Wiley, 2018.

Bibliography (transliterated)

1. Kramm K., Orth M., Teiwes A., Kammerhofer J. C., Meunier V., Pietsch-Braune S., Heinrich S. Influence of Nozzle Parameters on Spray Pattern and Droplet Characteristics for a Two-Fluid Nozzle. *Chemie Ingenieur Technik*. 2023. Vol. 95. P. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202200152>.

2. Ochman J., Bialik W., Gil S. An experimental study on liquid fuel atomization. *Metalurgija*. 2015. Vol. 54, No. 3. P. 559–562.

3. Islamova A., Tkachenko P., Shlegel N., Kuznetsov G. Secondary Atomization of Fuel Oil and Fuel Oil/Water Emulsion through Droplet-Droplet Collisions and Impingement on a Solid Wall. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 1008. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16021008>.

4. Nuyttens D., Baetens K., De Schamphelleire M., Sonck B. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 97, No. 3. P. 333–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001>.

5. Peng L., Li Z., Zhang G., Bi X., Hu W., Tang M., Wang X., Peng P., Sheng G. A review of measurement techniques for aerosol effective density. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 778. Article No. 146248. ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146248>.

6. Poozesh S., Akafuah N. K., Campbell H. R., Bashiri F., Saito K. Experimental and Mathematical Tools to Predict Droplet Size and Velocity Distribution for a Two-Fluid Nozzle. *Fluids*. 2020. Vol. 5, No. 4. Article No. 231. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids5040231>.

7. Rimbart N., Castanet G. Liquid atomization out of a full cone pressure swirl nozzle. *arXiv preprint*. 2010. arXiv:1008.2474. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1008.2474>.

8. Sijs R., Kooij S., Bonn D. Droplet size from Venturi air induction spray nozzles. *Experiments in Fluids*. 2023. Vol. 64. Article No. 43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03582-2>.

9. Cerruto E., Manetto G., Papa R., Longo D. Modelling Spray Pressure Effects on Droplet Size Distribution from Agricultural Nozzles. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 19.

Article No. 9283. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199283>.

10. Minov S. V., Cointault F., Vangeyte J., Pieters J. G., Nuyttens D. Spray Droplet Characterization from a Single Nozzle by High Speed Image Analysis Using an In-Focus Droplet Criterion. *Sensors*. 2016. Vol. 16, No. 2. Article No. 218. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16020218>.

11. Li C., Christen C. E., Hogan C. J. Jr, Fredericks S. A., Hong J. Automated Droplet Size Distribution Measurements Using Digital Inline Holography. *arXiv preprint*. 2019. arXiv:1906.09634.

12. Wicks, M., Dukler, A. E. In situ measurements of drop size distribution in two-phase flow: A new method for electrical conducting liquids. *Int. Heat Transfer Conf.*, Chicago, Illinois. 1966.

13. Moran, Michael J., Shapiro, Howard N., Boettner, Daisie D., Bailey, Margaret B., *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 9th edition, Iowa State University, Oboken, NJ: Wiley, 2018.

УДК 66.069.83

О. Р. Пересьолков, канд. техн. наук, доцент, М. П. Кунденко, д-р техн. наук, професор,
О. В. Круглякова, канд. техн. наук, доцент, Є. С. Демчук, аспірант

ВИМІРЮВАННЯ ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ КРАПЕЛЬ У ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ГАЗОРІДИННОМУ ПОТОЦІ ЗА ПНЕВМАТИЧНОЮ ФОРСУНКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛІЧІЛЬНО-ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ

У роботі досліджено дисперсну структуру крапель у високошвидкісному газорідинному потоці, сформованому пневматичною форсункою з багатоканальним спеціальною шнековим завихрювачем. Така форсунка створює полоконусний факел диспергованої рідини з великим кутом розкриття і високою якістю розпилювання. Це є актуальним для використання в топках та тепломасообмінних апаратах з обмеженими розмірами активного простору.

Для локальних вимірювань дисперсних параметрів краплинного потоку використано лічильно-імпульсний метод, що базується на реєстрації імпульсів електричного струму, які виникають при замиканні електродів краплями електропровідної рідини. При цьому за допомогою однопараметричної залежності, яка описує дисперсний склад крапель, є можливість розрахувати диференціальні та інтегральні функції розподілення об'єму крапель за діаметрами, модальний, медіанний, умовно максимальний діаметри крапель, а також питому витрату об'єму рідини в різних точках краплинного потоку.

Експериментально показана залежність модального діаметра сукупності крапель диспергованої рідини від швидкості руху повітря на виході з форсунки та співвідношення витрат повітря та рідини.

Встановлено, що для відповідної швидкості витікання повітря з форсунки при поступовому зменшенні відносної витрати повітря, є її порогове значення, при якому автотельна зона за крупності розпилювання рідини переходить в зону, де крупність крапель помітно зростає.

Результати досліджень дають можливість регулювання процесом диспергування рідини за рахунок швидкості витікання повітря з форсунки, тобто, за перепадом його тиску до і після розпилювача за умов оптимізації експлуатаційних витрат.

Запропонована методика придатна для вирішення дослідницьких і прикладних завдань, а отримані результати можуть бути використані при розробці й удосконаленні конструкцій форсунок, використання яких забезпечує оптимізацію режимів розпилювання рідини, підвищення енергоефективності процесів тепломасообміну в теплоенергетичних установках та розробці систем автоматизації їх роботи.

Ключові слова: диспергування рідини, лічильно-імпульсний метод, дисперсна структура, якість розпилювання, швидкість потоку, регулювання перепаду тиску, інтенсифікація процесів тепломасообміну.

O. R. Pereselkov, M. P. Kundenko, O. V. Kruglyakova, Ye. S. Demchuk

MEASUREMENT OF DROPLET SIZE DISTRIBUTION IN A HIGH-VELOCITY GAS-LIQUID FLOW OF A PNEUMATIC NOZZLE USING THE COUNT-PULSE METHOD

This study investigates the droplet size distribution in a high-velocity gas-liquid flow generated by a pneumatic nozzle equipped with a multi-channel, specially designed screw-type swirl insert. Such a nozzle produces a hollow-cone spray pattern with a wide spray angle and high atomization quality, which is particularly relevant for use in furnaces and heat-and-mass transfer units with limited active space.

Local measurements of the droplet flow parameters were performed using the count-pulse method, which is based on recording electrical current pulses generated when droplets of a conductive liquid bridge the gap between electrodes. Using a single-parameter function describing the droplet size distribution, it is possible to determine the differential and integral volume distribution functions by droplet diameter, the modal, median, and conditionally maximum droplet diameters, as well as the specific liquid volume flux at various points within the spray.

Experimental results demonstrate the dependence of the modal droplet diameter on the air velocity at the nozzle outlet and on the air-to-liquid flow rate ratio. It was established that for a given air exit velocity, a gradual decrease in the relative air flow rate reveals a threshold value at which the self-similar atomization zone transitions into a region where droplet size increases markedly.

The findings enable control of the liquid atomization process by adjusting the air velocity at the nozzle outlet, i.e., by varying the pressure drop across the nozzle, thereby optimizing operating costs. The proposed methodology is suitable for both research and practical applications, and the results can be used in the design and improvement of atomizer configurations to ensure optimal spray regimes, enhance the energy efficiency of heat-and-mass transfer processes in thermal power equipment, and develop automation systems for their operation.

Keywords: liquid dispersion, pulse-counting method, dispersed structure, spray quality, flow rate, pressure drop regulation, intensification of heat and mass transfer processes.