

PACS numbers: 47.20.Ib, 47.61.-k, 68.08.-p, 68.15.+e, 81.15.Rs, 82.70.Rr, 83.60.Wc

Диспергування рідин розпорошувачами, що обертаються

П. Є. Трофименко¹, М. В. Найда¹, О. В. Хоменко¹, М. М. Ляпа¹,
Д. О. Сушинський²

¹Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116,
40007 Суми, Україна

²Науково-дослідницький центр ракетних військ і артилерії,
вул. Герасима Кондратьєва, 165,
40021 Суми, Україна

Диспергування рідин розпорошувачами, що обертаються, є однією з найефективніших технік одержання дисперсних систем з наночастинками. Основне призначення диспергувальних пристроїв — це перетворення суцільного потоку рідини на дисперсну систему, що складається з однорідних крапель рідини. Є два способи перетворення струменів рідини в тонкі плівки: гідростатичний (на похилій пластині) і відцентровий (на плівкоутворювачі — лопаті). Диспергування рідин — це важлива технологія, яка застосовується в різних промислових галузях, таких як нафтогазова, фармацевтична, харчова та інші. У цій статті ми розглянемо диспергування рідин розпорошувачами, що обертаються. Цей метод уможливорює одержати дрібнодисперсні системи з пониженим розміром частинок, що відкриває широкі можливості для поліпшення якості кінцевого продукту. Потрібно знаходити нові підходи до конструювання розпорошувачів великої одиничної потужності. Для обґрунтування їх слід проводити принципові теоретичні дослідження, а з метою корекції результатів теоретичну аналіз необхідно ретельно перевіряти та коригувати лабораторними та промисловими дослідженнями. В статті показано основні принципові схеми розпорошувачів рідини, що обертаються (сопловий відцентровий розпорошувач, лопатковий відцентровий розпорошувач, віяловий розпорошувач), і проаналізовано, не вдаючись у технічні подробиці, їхні принципові недоліки, а також можливі напрями пошуків способів зменшення енергоспоживання на диспергування та поліпшення дисперсного складу крапель розпорошеної рідини та, зокрема, одержання складу крапель, однорідного за розмірами. Розглянуто важливі питання поведінки рідини всередині циліндричних оболонок, що обертаються, а також показано особливості руху рідини під час виходу її з розпорошувача.

Dispersing liquids with rotating atomizers is one of the most effective techniques for obtaining dispersion systems with nanoparticles. The main purpose of dispersing devices is to transform a continuous flow of liquid into a dispersed system consisting of liquid droplets. There are two methods of converting liquid jets into thin films: hydrostatic (on an inclined plate) and centrifugal (on a film-forming blade). Liquid dispersion is an important technology that is used in various industries such as oil and gas industries, pharmaceutical, food, and other ones. Dispersing liquids with rotary atomizers has its advantages and disadvantages. On the one hand, this method is very effective, as it allows obtaining a homogeneous dispersion system with nanoparticles. On the other hand, the dispersion process can be quite complex, as its success depends on many factors, such as atomizer-rotation speed, droplet size, liquid properties, *etc.* In this article, we will look at the dispersion of liquids by rotating atomizers. This method makes it possible to obtain finely dispersed systems with a reduced particle size that opens up wide opportunities for improving the quality of the product. It is necessary to find new approaches to the design of atomizers with a large unit capacity. For their substantiation, fundamental theoretical studies should be conducted, and in order to correct the results, the theoretical analysis should be carefully checked and corrected by laboratory and industrial studies. The article shows the main principle schemes for rotating liquid atomizers (nozzle centrifugal atomizer, vane centrifugal atomizer, fan atomizer), and we will analyse, without going into technical details, their fundamental shortcomings, as well as possible directions of searching for ways to reduce energy consumption for dispersion and improve dispersed composition of droplets of sprayed liquid, and, in particular, obtaining a composition of droplets that is uniform in size. Important issues of fluid behaviour inside rotating cylindrical shells are considered. In addition, the features of the movement of the liquid, when it leaves the atomizer, are shown too.

Ключові слова: рідина, крапля, диспергування, плівкоутворювач, відцентровий розпорошувач.

Key words: liquid, droplet, dispersion, film former, centrifugal atomizer.

(Отримано 29 травня 2024 р.)

1. ВСТУП

Диспергування рідин розпорошувачами, що обертаються, є однією з найефективніших технік одержання дисперсійних систем з наночастинками. Цей метод полягає в тому, що рідина подається на розпорошувач, який випускає її у вигляді мікроскопічних крапель. Розпорошувачі, що обертаються, характеризуються великою швидкістю обертання, що допомагає подрібнювати рідину на дрібніші крапельки [1–4].

Застосування розпорошувачів, що обертаються, для диспергу-

вання рідин знайшло широке застосування у різних галузях науки та техніки. Наприклад, вони використовуються у фармацевтиці для одержання лікарських засобів, в харчовій промисловості для виробництва напоїв і продуктів харчування, у косметичній промисловості для одержання косметичних засобів, а також у нафтогазовій галузі для розчинення інгібіторів корозії й інших речовин.

Диспергування рідин розпорошувачами, що обертаються, має свої переваги та недоліки. З одного боку, цей метод є дуже ефективним, оскільки уможливорює одержати гомогенну дисперсну систему з наночастинками. З іншого боку, процес диспергування може бути достатньо складним, оскільки успішність його залежить від багатьох чинників, таких як обертова швидкість розпорошувача, розмір краплин, властивості рідини тощо. Для досягнення бажаного результату необхідно правильно підібрати розпорошувач, враховуючи потреби конкретного застосування [5–11].

Отже, диспергування рідин розпорошувачами, що обертаються, є важливим технологічним процесом, який використовується у багатьох галузях промисловості та науки. За правильного застосування цей метод дає змогу одержати високоякісні дисперсні системи з наночастинками [12–18]. Однак перед застосуванням розпорошувачів, що обертаються, потрібно ретельно проаналізувати умови процесу та правильно підібрати розпорошувач, щоб забезпечити його ефективність й успішність. Метою даної статті є показати основні схеми розпорошувачів рідини, що обертаються, а також проаналізувати їхні принципові недоліки та можливі напрями пошуків способів зменшення енергоспоживання та поліпшення дисперсного складу крапель розпорошеної рідини.

2. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ СТОСОВНО ДИСПЕРГУВАННЯ РІДИН ОБЕРТОВИМИ РОЗПОРОШУВАЧАМИ

Найбільш потужні диспергатори одиничної продуктивності за рідиною, яку розпорошують, за достатньо дрібнодисперсного складу розпорошення — розпорошувачі, що обертаються. Розглянемо основні принципові схеми розпорошувачів рідини, що обертаються, та проаналізуємо, не вдаючись у технічні подробиці, принципові недоліки їх, а також можливі напрями пошуків способів зменшення енергоспоживання на диспергування та поліпшення дисперсного складу крапель розпорошеної рідини і, зокрема, одержання складу крапель, однорідного за розмірами.

На рисунку 1 наведено принципову схему конструкції соплового (дюзового) відцентрового розпорошувача [1, 2]. Сопловий відцентровий розпорошувач (сопловий диск) складається з обертового корпусу 1 (наприклад, циліндричної обичайки), що розташо-

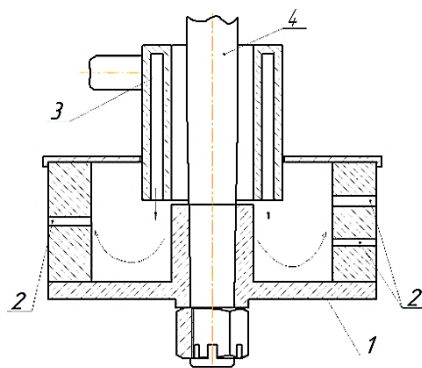


Рис. 1. Принципова схема соплового (дюзового) відцентрового розпорошувача.¹

ваний на валу 4, сопла (дюзи) 2, пристрою 3 для підведення та рівномірного розподілу всередині корпусу рідини, яка під дією відцентрової сили утворює по внутрішній поверхні стінок обичайки кільце.

В разі постійної частоти обертання диска витрата рідини визначається умовами входу рідини на диск, товщиною рідкого кільцевого шару, кількістю та діаметром сопел. Для збільшення продуктивності соплового розпорошувача його виготовляють багаторядним (що складається з кількох рядів сопел). Рідина, надходячи у сопло, притискається до задньої по ходу обертання розпорошувача стінки, і тому окружні швидкості сопла та рідини є однаковими. Із виходом у газове (повітряне) середовище швидкість рідини складається з окружної складової швидкості та складової відносного руху рідини по соплу, яку для низьков'язких рідин можна обрати рівною радіальній.

Соплові диски є простими за конструкцією, мають високу одиничну продуктивність і в багатьох випадках дають змогу одержати характеристики розпорошення, що задовольняють промисловість. Однак дрібнодисперсне розпорошення з соплового диска можна одержати тільки за значних окружних швидкостей (у 120 м/с і вище). Це відбувається з наступної причини. На виході із сопла струмінь рідини (порівняно великого діаметра) взаємодіє з навколишнім середовищем (повітрям, газом). Спочатку він розривається на окремі великі фрагменти, а після повторних роздрібнювань перетворюється на дедалі дрібніші краплі.

Сила взаємодії струменя, що виходить із сопел у газову фазу, прямо пропорційна швидкості зміни імпульсу струменя та лобового перерізу струменя. Ця величина у свою чергу пропорційна діаметру сопла (10 мм). Тому для дрібнодисперсного дроблення струменя такого перерізу струмені розганяють до швидкостей у

120–150 м/с і вище. З цієї причини недоліком соплових розпорошувачів є велике питоме споживання енергії у 4–6 кВт·год на тонну рідини, що розпорошується [3].

Є й другий важливий недолік розпорошувачів соплового типу. Діаметри крапель за розпорошування розпорошувачами, що обертаються, пропорційні характерному розміру, зокрема, товщині струменя рідини. Із виходом струменя рідини із сопла його переріз у площині, перпендикулярній до радіального напрямку, має вигляд сегмента. Тому після виходу струменя в газове середовище спочатку руйнуються його найтонші ділянки, а потім — дедалі товстіші. Через такі особливості дисперсний склад крапель, що утворюються сопловими розпорошувачами, знаходиться в достатньо широкому інтервалі розмірів, що для більшості промислових технологій є негативним чинником.

За аналізу роботи соплових дисків можна виокремити дві особливості (проблеми). Для дрібного диспергування сопловими розпорошувачами необхідно застосовувати великі швидкості обертання через велику товщину струменя рідини, що виходить із сопла, і, отже, споживати водночас значну кількість енергії, а з іншого боку розпорошення рідини є принципово полідисперсним. Основне завдання — пониження потужності, що витрачається на диспергування великої кількості рідини за оптимальних розмірів крапель, — може бути вирішене лише з вирішенням питання про істотне зменшення товщини струменів, що виходять у газове середовище в момент розпорошування їх. Цією проблемою займалося багато дослідників і теоретиків. Для розрахунку середнього діаметра крапель відцентрових розпорошувачів запропоновано багато залежностей. Однією з таких формул, яка заслуговує на увагу — формула Маршалла [4]. Її було істотно модернізовано Пітерським [2, 5], і застосовується вона за продуктивності відцентрового розпорошувача за рідиною у понад 30 т/год.:

$$d_{32} = 0,1 q^{3/2} (\omega^2 r)^{1/3}, \quad (1)$$

де $q = Q/l$ — лінійна густина об'ємної витрати рідини, м³/(с·м); l — довжина змоченого периметра кромки розпорошувача (сумарна ширина плівок, що розпорошуються), м; ω — кутова швидкість обертання диска, с⁻¹; r — радіус обертання розпорошувальних кромки розпорошувача, м. Аналізуючи (1), можна переконатися, що для постійного діаметра крапель d_{32} для різних розпорошувачів добуток ωl має бути постійним (за однакової витрати Q).

Показано [6], що формула (1) застосовна й у дещо ширшому діапазоні продуктивностей соплових дисків. Звідси напрашується висновок: істотного пониження споживаної потужності можна досягти шляхом пониження обертів диска, що розпорошує, за

відповідного збільшення довжини змоченого периметра. Для вирішення цієї проблеми необхідно струмінь рідини будь-якої первинної форми перетворити на плівку за можливості більшої ширини. З вирішенням проблеми низькоенергетичного одержання однорідної рідкої плівки на розпорошувачах, що обертаються, автоматично вирішиться друга проблема відцентрових розпорошувачів — одержання якісного розпорошення, тобто одержання більш монодисперсних крапель. Обговоримо з цієї точки зору більш придатні конструкції розпорошувачів, що обертаються, для вирішення поставленої проблеми — лопатеві (щілинні) розпорошувачі [3].

Принципову схему конструкції лопатевого відцентрового розпорошувача показано на рис. 2. Лопатевий розпорошувач включає в себе циліндричний корпус 1 — власне диск, який кріпиться на валу 4. На периферії диска розташовані плоскі лопаті 2. На певній віддалі від осі обертання розташовуються канали або інші елементи ввідного пристрою 3. Через ввідний пристрій 3 рідина надходить всередину корпусу 1 і більш-менш рівномірно розподіляється перед надходженням на лопаті 2.

На початку руху рідини, яка надходить у диск, що обертається, діє, крім гравітаційної сили, сила в'язкого тертя, за допомогою якої вона розкручується, розганяється та переміщається в напрямку лопаті. На лопаті рідина перебуває під дією відцентрової та Коріолісової сил. Поздовжня складова відцентрової сили розганяє струмінь рідини вздовж лопаті. Поздовжня складова швидкості елементів рідини (типу води) вздовж лопаті наближається до окружної швидкості відповідних точок лопаті.

Коріолісова сила та нормальна складова відцентрової сили спричиняють появу осової складової швидкості елементів рідкої

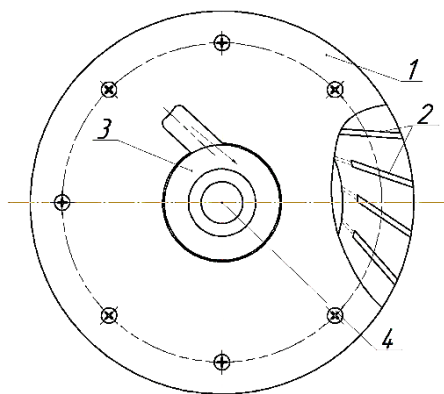


Рис. 2. Принципова схема конструкції лопатевого відцентрового розпорошувача.²

плівки, що приводить до розтікання плівки в осьовому напрямку. Сумарна дія цих сил перетворює струмінь рідини на лопаті, що обертається, в тонку плівку. Для зменшення гідравлічного удару та додаткового поліпшення розподілу рідини в місцях входу рідини на лопаті встановлюють напрямні елементи.

З метою збільшення одиничної продуктивності лопатевого диска без зміни якості розпорошення та діаметра диска запропоновано конструкції багатоярусних дисків. Всі ці й інші «хитрощі», на жаль, не дають помітного ефекту. І все це — через велику турбулентність потоку рідини в момент її входу на лопать, особливо в багатоярусних дисках. Тому, здавалося б, що, згідно з (1), досягнуто велику довжину змоченого периметра, що теоретично уможлиблює одержати дрібнодисперсне розпорошення, але побічні ефекти зводять результат нанівець.

3. ОСОБЛИВОСТІ РУХУ РІДИНИ ІЗ ВИХОДОМ ЇЇ З РОЗПОРОШУВАЧА

Розглянемо деякі важливі питання поведінки рідини всередині циліндричних оболонок, що обертаються, якщо їхні осі симетрії збігаються з нерухомою у просторі вертикальною віссю обертання. Нехай нерухома рідина знаходиться у нерухомій вертикально встановленій оболонці або обичайці та надходить у бічний отвір (сопло, круглий або іншої форми отвір). Об'ємна витрата Q рідини через отвір визначається за відомим з гідродинаміки рівнянням [7, 8]:

$$Q = \varepsilon \phi S \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \quad (2)$$

де S — переріз отвору в площині, перпендикулярній напрямку швидкості витоку; P — тиск перед отвором витоку; ε і ϕ — коефіцієнти витрати.

Коефіцієнти витрати визначаються формою, розмірами отвору входу рідини, напором і фізичними властивостями самої рідини (в'язкістю, поверхневим натягом), а також, що важливо, гідродинамічною обстановкою в момент надходження рідини в боковий отвір у циліндричній обичайці. Коефіцієнт ϕ — це так званий коефіцієнт швидкості, який враховує розподіл швидкостей по перерізу струменя, ε — коефіцієнт стиснення, що визначається відношенням нормального перерізу струменя S_0 , що витікає з отвору, до нормального перерізу S отвору витікання:

$$\varepsilon = \frac{S_0}{S}. \quad (3)$$

Для нерухомих обичайок коефіцієнти витрати визначаються напором рідини, положенням плівкоутворювача та турбулентністю потоку (Рейнольдсовим числом Re). За обертання оболонки відносно рідини, що знаходиться всередині цієї оболонки, картина витікання через бічний отвір у самій оболонці істотно змінюється. Вперше таке завдання розглядалося у застосуванні центрифуг Б. Г. Холіним і О. І. Іноземцевим. Для аналітичного визначення коефіцієнтів витрати у разі обертової обичайки розпорошувача використовується рівняння Нав'є–Стокса в циліндричній системі координат, жорстко пов'язаній з обичайкою, що обертається, і рівняння нерозривності струменя [9]:

$$\begin{aligned} u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_\tau^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} v \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{\partial u_r}{r \partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right), \\ u_r \frac{\partial u_\tau}{\partial r} - \frac{u_r u_\tau}{r} &= v \left(\frac{\partial^2 u_\tau}{\partial r^2} + \frac{\partial u_\tau}{r \partial r} - \frac{u_\tau}{r^2} \right), \\ g + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} &= 0, \quad \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут u_r — радіальна складова швидкості рідини, а u_τ — тангенціальна (окружна) складова швидкості рідини; ρ , v — густина та кінематична в'язкість рідини. Координату z спрямовано вздовж осі обертання.

Для складової коефіцієнта витрати ϕ розв'язання даної системи нічого нового не дає. Та це й зрозуміло з суто фізичних міркувань, тому що ϕ визначається лише станом руху рідини, тобто числом Re і, отже, за $Re = \text{const}$ однакове для всіх рідин. Інша ситуація — з коефіцієнтом стиснення струменя ε (3). У даному випадку він визначається в обичайці, що обертається з деякою не рівною нулю відносною швидкістю, за відношенням до кутової швидкості обертання суцільної рідини.

Нехай циліндрична обичайка та рідина мають загальну вісь обертання, що збігається з віссю координат Oz . Якщо окружна швидкість обертання оболонки й окружна швидкість рідини у місцях закінчення останньої дорівнюють одна одній, їхня відносна швидкість дорівнює нулю. За такої ситуації рідина надходить в отвори з таким самим значенням ε , як і у випадку абсолютно нерухомих рідини й обичайки.

Нехай у обичайку з гладкими внутрішніми стінками радіуса R_1 , що обертається з кутовою швидкістю Ω_1 , надходить на радіусі R_0 рідина, що не обертається. Рідина через сили в'язкості починає закручуватися, обертатися. Максимальна кутова швидкість обертання рідини ω залежить [9] від відносної віддалі від осі обе-

ртання та Re , обчисленого за відносною швидкістю між швидкістю обичайки та швидкістю шарів рідини, що знаходяться в безпосередній близькості від поверхні обичайки. За радіуса надходження рідини $R_0 \rightarrow 0$ кутова швидкість ω рідини на віддалі r від осі обертання, як показано в зазначеній роботі, дорівнює

$$\omega = \Omega_1 \left(\frac{r}{R_1} \right)^{Re},$$

а відповідна окружна швидкість цих елементів рідини дорівнює

$$u_r = \omega r = \Omega_1 r \left(\frac{r}{R_1} \right)^{Re}, \quad (5)$$

де r — поточна циліндрична координата елементу рідини; R_1 — радіус внутрішньої поверхні циліндра обичайки; комплекс $Re = QR_1/\nu$ — Рейнольдсове число в радіальному напрямку руху рідини в момент входу її в отвір обичайки.

Як показано в [9], за всіх $R_0 > 0$ кутова швидкість ω і, відповідно, u_r менша, ніж за (5), тобто обертання рідини в реальних умовах відстає від швидкості обертання циліндричної обичайки, для якої окружна швидкість u внутрішньої поверхні обичайки завжди дорівнює $u = \Omega_1 R_1$. З цього випливає, що, якщо рідина всередині обертової гладкої обичайки має кутову швидкість обертання іншу, ніж кутова швидкість внутрішніх стінок обичайки, в цих умовах коефіцієнт стиснення струменя, що витікає з бокового отвору та, відповідно, об'ємна витрата Q дорівнюють

$$\varepsilon = \frac{S_0}{S} = \frac{P(\alpha_2 + \xi)}{\rho((\Omega_1 R_1)^2 \alpha_1 + 2P/\rho)} \text{ і } Q = \frac{SP}{\rho} \sqrt{\frac{\alpha_2 + \xi}{(\Omega_1 R_1)^2 \alpha_1 + 2P/\rho}}, \quad (6)$$

де S — переріз бічного отвору для витікання рідини, P — повний тиск рідини перед отвором витікання, α_1 і α_2 — коефіцієнти кінетичної енергії за Коріолісом для рідин типу води (≈ 1), ξ — коефіцієнт місцевого опору в точках витікання для рідин типу води (≈ 0). Якщо рідина є нерухомою щодо лабораторної системи відліку, то об'ємна витрата рідини через бічний отвір у обичайці, що обертається, згідно з (6), дорівнює

$$Q = \frac{SP}{\rho \Omega_1 R_1}, \quad (7)$$

оскільки повний тиск P є незначним у порівнянні з $(\Omega_1 R_1)^2$, і ним під коренем у знаменнику виразу (6) можна нехтувати.

Відносна швидкість u_r (швидкість обичайки щодо рідини) за

виконання цієї умови згідно з (5) наближається до лінійної тангенційної (окружної) швидкості внутрішньої поверхні обичайки, що обертається: $u_i \rightarrow u = \Omega_1 R_1$. Відповідно до (6), коефіцієнт витрати ε рідини зі збільшенням відносної швидкості між шарами рідини та внутрішньою поверхнею обичайки зменшується. Звідси випливає, що, чим швидше обертається обичайка ($\Omega_1 \rightarrow \infty$) з рідиною, що не обертається всередині, тим, відповідно до (6) і (7), меншою є витрата її через бічний отвір в обичайці. Оскільки реальна рідина все-таки обертається, то відносна швидкість між шарами рідини та поверхнею обичайки, що обертається, зменшується, а коефіцієнт стиснення ε рідини стає іншим. Тому можна стверджувати, що величина загального коефіцієнта витрати за витікання рідини з бокового отвору в обичайці, що обертається, є іншою в порівнянні з величиною коефіцієнта витрати за витікання нерухомої рідини з нерухомої обичайки.

У роботі [9] показано, що зі зменшенням відносної швидкості обичайки та рідини коефіцієнт ε проходить через мінімум, а це означає, що площа перерізу струменя, що виходить з отвору обичайки, може бути значно меншою, ніж площа перерізу отвору. Відповідно, об'ємна витрата рідини Q за перерахованих умов через сопло або іншу насадку в бічному отворі обичайки може мати значно меншу величину, ніж у разі відносних швидкостей, що наближаються до нуля. І що особливо дивно: відносне зменшення витрати спостерігається більшою мірою за великих діаметрів отворів витікання, ніж за малих. Такий теоретичний висновок зареєстрований прямими спостереженнями (рис. 3).

На рисунку 3 зареєстровано стиск струменя рідини типу води, що виходить з циліндричної обичайки, яка обертається, через лопатеві канали на плаский плівкоутворювач (диск діаметром у

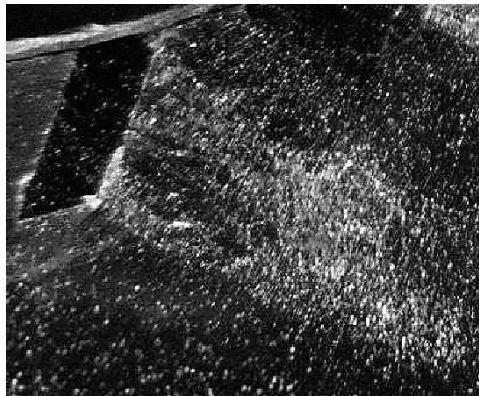


Рис. 3. Стиснення струменя, що витікає з каналів лопатевого розпорощувача.³

270 мм, обороти диска — 2800 об/хв). На фото видно, що рідина, яка витікає з каналу в обичайці, лише частково заповнює його. Це свідчить про те, що коефіцієнт стиснення ε в цьому випадку є меншим за одиницю.

Наведені фотографії є експериментальним підтвердженням стиснення струменя під час роботи будь-якого відцентрового розпорошувача. Реальний стиск струменів рідини потрібно враховувати та використовувати. Він знайшов інженерне застосування для конструювання розпорошувачів.

На рисунку 4 показано розподіл середньої товщини плівки по висоті каналу за різних частот обертання диску та постійної витрати рідини. Експеримент проводили з диском, що має діаметр $d = 270$ мм, кількість каналів — 16, висоту каналів — $H = 25$ мм, ширину каналів — $b = 25$ мм. Характеристика рідини, що розпорошується: технічна вода кімнатної температури, витрата рідини — $Q = 0,4$ м³/год.

Аналізуючи одержані результати, робимо висновки, що зі збільшенням частоти обертання товщина плівки на виході з каналів диску стає меншою. Також з рисунків помітно, що рідина заповнює канал по висоті нерівномірно, а пік товщини плівки зміщується зі зміною частоти обертання. Така нерівномірність істотно впливає на дисперсність розпорошення. Для досягнення більш якісного розпорошення рідини потрібно прагнути одержати результат, за якого товщина плівки буде однаковою по всій висоті каналу.

Якщо витрату рідини змінити, то характер середньої товщини плівки також зміниться. На рисунку 5 показано розподіл середньої товщини плівки по висоті каналу за частоти обертання диску у 3000 об/хв і витрати рідини $Q = 1$ м³/год. Зі збільшенням витрати рідини товщина плівки стає більш рівномірною по висоті каналу, але все ще недосконалою, хоча і поліпшує дисперсність розпорошення.

Під час проектування конструкції розпорошувача треба зважати на багато чинників, щоб досягти оптимального результату дисперсності розпорошення. На це впливає не тільки конструкція самого розпорошувального диску, а й частота обертання, умови роботи, характеристика рідини, що розпорошується, та інше.

На рисунку 6 показано схему однієї з найпростіших конструкцій віялового розпорошувача, що добре працює в промисловості. Віяловий розпорошувач складається з обичайки, що обертається, — корпусу 1, з'єднаного з валом 2. В обичайці 1 передбачено отвори 3 для витоку рідини, поруч з якими прикріплено пласкі пластини-плівкоутворювачі 4, розташовані віялом (звідси й назва типу розпорошувачів — віяло). Рідина через заливну трубу 5 або інший пристрій подається в обичайку 1, в якій вона закручується.

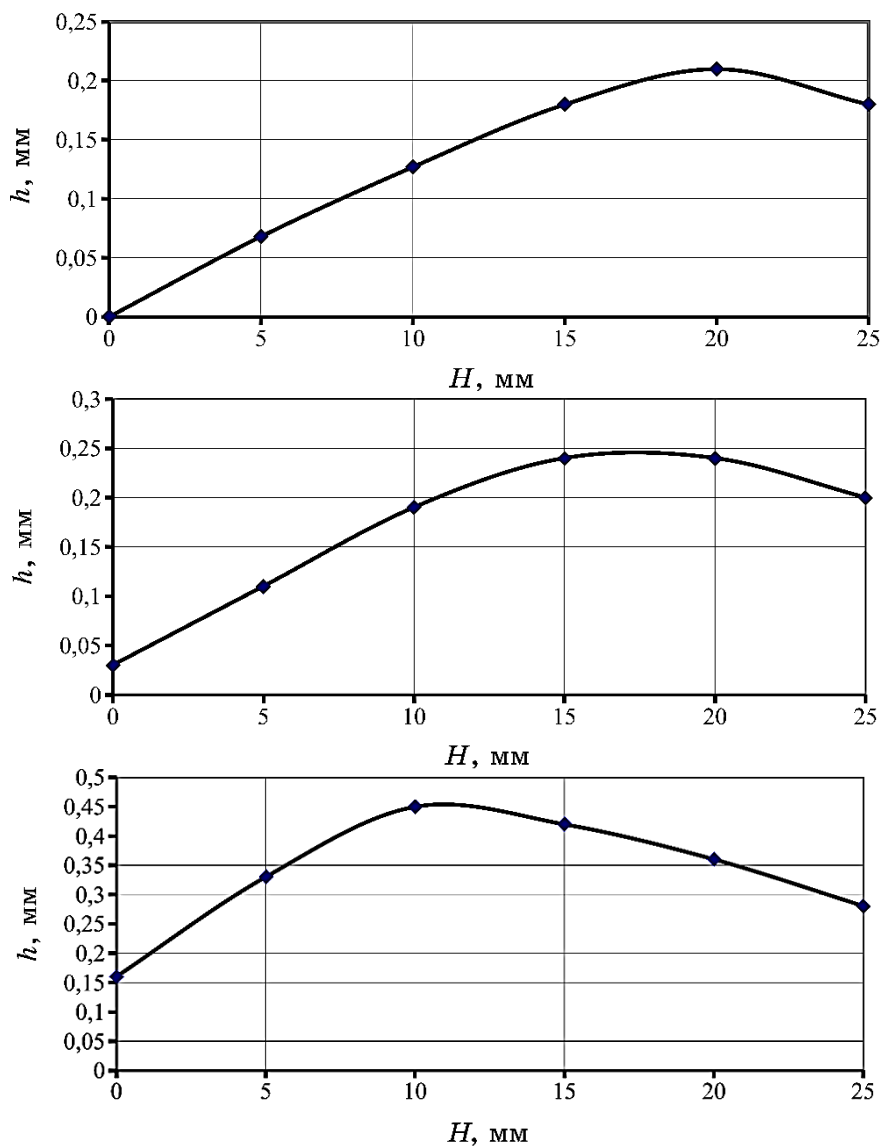


Рис. 4. Розподіл середньої товщини плівки по висоті каналу за $Q = 0,4 \text{ м}^3/\text{год}$ і $n = 2000 \text{ об/хв}$, $n = 3000 \text{ об/хв}$, $n = 3600 \text{ об/хв}$ (відповідні рисунки розташовано згори униз).⁴

ся під дією сил в'язкого тертя та піднімається до отворів 3 в обичайці 1 і через них виходить на віялові пластинки.

Віяловий розпорошувач працює так. Кожен струмінь рідини, що витікає з отвору 3, розтікається по віялових пластинах, перетворюючись на одиночну плівку рідини. Отвори 3 по висоті роз-

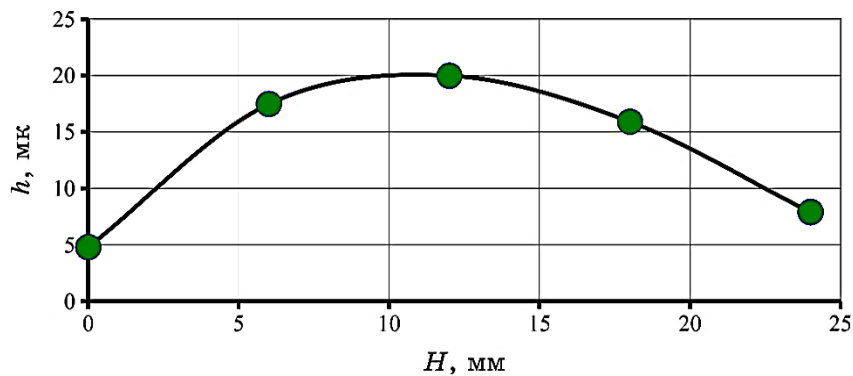


Рис. 5. Розподіл середньої товщини плівки по висоті каналу ($Q = 1 \text{ м}^3/\text{год}$ і $n = 3000 \text{ об/хв}$).⁵

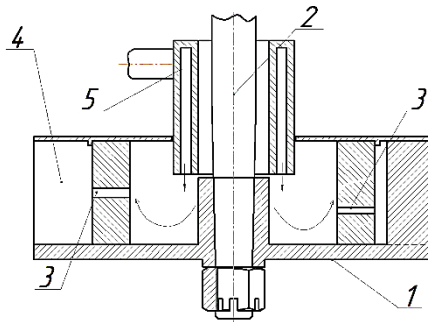


Рис. 6. Принципова схема віялового розпорошувача.⁶

ташовують так, щоб окремі плівки рідини на віяловій пластині-плівкоутворювачі встигли злитися (об'єднатися) у суцільну тонку неперервну плівку великої сумарної довжини. Плівка рідини, зриваючись із віялових пластин і потрапляючи в газове середовище, інтенсивно розпорошується. Саме утворення тонкої плівки великої ширини забезпечує високий енергетичний коефіцієнт корисної дії диспергування рідин віяловими розпорошувачами.

Віялові розпорошувачі успішно працюють, наприклад, у пило-вловлювальних установках у хемічній і харчовій промисловостях, чорній металургії, в абсорбційних скруберах для проведення хемічних реакцій і в установках для інших цілей. Перевагою віялових розпорошувачів є те, що їхні отвори витікання є порівняно великими, наприклад, у 10 мм і більше, та дають можливість використовувати для розпорошення забруднені рідини. Крім того, за допомогою віялових розпорошувачів є можливість одержати розпорошення, близьке до монодисперсного (за рахунок перетворення струменів рідини на плівки великої ширини та майже

постійної товщини).

4. ВИСНОВКИ

Диспергування рідин розпорошувачами, що обертаються, є одним з найефективніших методів одержання гомогенної дисперсної системи. У цій статті розглянуто принцип роботи таких розпорошувачів і застосування їх для диспергування рідин у різних галузях науки та техніки. Ми також проаналізували переваги та недоліки цього методу, а також його можливості для вирішення практичних завдань. Дізналися, які параметри розпорошувачів впливають на якість диспергування, і як правильно підібрати розпорошувач для досягнення потрібного результату.

Показано, що потрібні нові підходи до конструювання розпорошувачів великої одиничної потужності. Для обґрунтування їх слід проводити принципові теоретичні дослідження, а з метою корекції результатів теоретичну аналізу необхідно ретельно перевіряти та коригувати лабораторними та промисловими дослідженнями. Серед них першочерговими та важливими для розпорошувачів, що обертаються, є:

- по-перше, з'ясування та вивчення умов входу рідини на лопать і вплив цих процесів на продуктивність та інші характеристики розпорошувачів;

- по-друге, всебічні теоретичні й експериментальні дослідження формування рідини на лопаті, що обертається, тобто перетворення неорганізованого потоку рідини в упорядкований однорідний плівковий рух з найменшими витратами енергії, та, в першу чергу, вивчення впливу форми та швидкостей руху лопаті на параметри перетворення рідини у добре організований тонкоплівковий рух з прогнозованими параметрами;

- по-третє, експериментальне вивчення інших можливих способів диспергування рідин, виходячи з молекулярно-кінетичних особливостей їхньої будови.

Автори висловлюють подяку МОН України за фінансову підтримку проєкту «Механізми формування та моделювання структурного стану плівок тугоплавких сполук с прогнозованими механічними характеристиками» (№ 0122U000776) та пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок (додаткова угода № БФ/25-2021).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. А. Бородин, Ю. Ф. Дитяткин, Л. А. Клячко, В. И. Ягодкин, *Распыливание жидкостей* (Москва: Машиностроение: 1967).
2. Д. Г. Пажи, В. С. Галустов, *Основы техники распыливания жидкостей*

- (Москва: Химия: 1984).
3. Д. Г. Пажи, А. А. Корягин, Э. Л. Ламм, *Распыливающие устройства в химической промышленности* (Москва: Химия: 1975).
 4. W. R. Marshal and C. R. Adler, *Chem. Eng. Prog.*, **47**, No. 10: 52 (1951).
 5. Г. П. Питерских, *ТОХТ*, **2**: 745 (1981).
 6. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s1077>
 7. Б. Т. Емцев, *Техническая гидромеханика* (Москва: Машиностроение: 1978).
 8. А. Г. Касаткин, *Основные процессы и аппараты химической технологии* (Москва: Химия: 1972).
 9. Б. Г. Холин, *Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости* (Москва: Машиностроение: 1977).
 10. P. E. Trofimenko, M. V. Naida, and A. V. Khomenko, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **18**, Iss. 3: 565 (2020) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/nnn.18.03.565>
 11. P. E. Trofimenko, M. V. Naida, A. V. Khomenko, and Yu. I. Pushkarov, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **20**, Iss. 3: 657 (2022); <https://doi.org/10.15407/nnn.20.03.657>
 12. A. D. Pogrebnjak, M. A. Lisovenko, A. Turlybekuly, and V. V. Buranich, *Phys.-Usp.*, **64**, No. 3: 253 (2020); <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.08.038823>
 13. O. V. Khomenko, A. A. Biesiedina, K. P. Khomenko, and R. R. Chernushchenko, *Prog. Phys. Met.*, **23**, No. 2: 239 (2022); <https://doi.org/10.15407/ufm.23.02.239>
 14. O. A. Goncharov, D. A. Belous, A. N. Yunda, A. V. Khomenko, E. V. Mironenko, L. V. Vasilyeva, and C. A. Goncharova, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **20**, Iss. 2: 385 (2022); <https://doi.org/10.15407/nnn.20.02.385>
 15. O. Mazur, K. Tozaki, and L. Stefanovich, *Solid State Commun.*, **361**: 115072 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2023.115072>
 16. A. Khomenko, D. Boyko, and K. Khomenko, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **719**, Iss. 1: (2021); <https://doi.org/10.1080/15421406.2020.1860531>
 17. A. V. Khomenko, I. A. Lyashenko, and L. S. Metlov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **30**: 859 (2008).
 18. A. Khomenko, D. Troshchenko, and L. Metlov, *Phys. Rev. E*, **100**: 022110 (2019); <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.022110>

REFERENCES

1. V. A. Borodin, Yu. F. Dytiatkyn, L. A. Klyachko, and V. I. Yagodkyn, *Raspylivanie Zhydkostei* [Dispersing of Liquids] (Moskva: Mashinostroyenie, 1967) (in Russian).
2. D. H. Pazhy, V. S. Halustov, *Osnovy Tekhniky Raspylivaniya Zhydkostei* [Basics of Techniques for Dispersing of Liquids] (Moskva: Khimiya: 1984) (in Russian).
3. D. H. Pazhy, A. A. Koriahyn, and E. L. Lamm, *Raspylivayushchie Ustroistva v Khimicheskoi Promyshlennosti* [Dispersing Devices in Chemical Industry] (Moskva: Khimiya: 1975) (in Russian).
4. W. R. Marshal and C. R. Adler, *Chem. Eng. Prog.*, **47**, No. 10: 52 (1951).

5. H. P. Pyterskykh, *ТОЖТ*, **2**: 745 (1981) (in Russian).
6. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s1077>
7. B. T. Emtsev, *Tekhnicheskaya Hidromekhanika* [Technical Hydrodynamics] (Moskva: Mashinostroyeniye: 1978) (in Russian).
8. A. G. Kasatkin, *Osnovnyye Protsessy i Apparaty Khimicheskoy Tekhnologii* [Basic Processes and Apparatuses of Chemical Engineering] (Moskva: Khimiya: 1975) (in Russian).
9. B. G. Kholin, *Tsentrobeznyye i Vibratsionnyye Granulyatory Plavov i Raspyliteli Zhidkosti* [Centrifugal and Vibration Granulators of Melts and Liquid Sprayers] (Moskva: Mashinostroyeniye: 1977) (in Russian).
10. P. E. Trofimenko, M. V. Naida, and A. V. Khomenko, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **18**, Iss. 3: 565 (2020) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/nnn.18.03.565>
11. P. E. Trofimenko, M. V. Naida, A. V. Khomenko, and Yu. I. Pushkarov, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **20**, Iss. 3: 657 (2022); <https://doi.org/10.15407/nnn.20.03.657>
12. A. D. Pogrebnyak, M. A. Lisovenko, A. Turlybekuly, and V. V. Buranich, *Phys.-Usp.*, **64**, No. 3: 253 (2020); <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.08.038823>
13. O. V. Khomenko, A. A. Biesiedina, K. P. Khomenko, and R. R. Chernushchenko, *Prog. Phys. Met.*, **23**, No. 2: 239 (2022); <https://doi.org/10.15407/ufm.23.02.239>
14. O. A. Goncharov, D. A. Belous, A. N. Yunda, A. V. Khomenko, E. V. Mironenko, L. V. Vasilyeva, and C. A. Goncharova, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **20**, Iss. 2: 385 (2022); <https://doi.org/10.15407/nnn.20.02.385>
15. O. Mazur, K. Tozaki, and L. Stefanovich, *Solid State Commun.*, **361**: 115072 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2023.115072>
16. A. Khomenko, D. Boyko, and K. Khomenko, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **719**, Iss. 1: (2021); <https://doi.org/10.1080/15421406.2020.1860531>
17. A. V. Khomenko, I. A. Lyashenko, and L. S. Metlov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **30**: 859 (2008).
18. A. Khomenko, D. Troshchenko, and L. Metlov, *Phys. Rev. E*, **100**: 022110 (2019); <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.022110>

¹Sumy State University,
116, Kharkivska Str.,
UA-40007 Sumy, Ukraine

²Research Centre of Missile Troops and Artillery,
165, Herasym Kondratiev Str.,
UA-40021 Sumy, Ukraine

¹ Fig. 1. Schematic diagram of a nozzle (nozzle) centrifugal sprayer.

² Fig. 2. Schematic diagram of the design of a bladed centrifugal sprayer.

³ Fig. 3. Compression of the jet flowing from the channels of the blade sprayer.

⁴ Fig. 4. Distribution of the average thickness of the film along the height of the channel at $Q = 0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ and $n = 2000 \text{ rpm}$, $n = 3000 \text{ rpm}$, $n = 3600 \text{ rpm}$ (corresponding figures are located from top to bottom).

⁵ Fig. 5. Distribution of the average thickness of the film along the height of the channel ($Q = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ and $n = 3000 \text{ rpm}$).

⁶ Fig. 6. Schematic diagram of a fan sprayer.