

PACS numbers: 47.20.Ib, 47.61.-k, 62.25.-g, 68.08.-p, 68.15.+e, 81.20.Rg, 83.80.Hj

Методи дослідження поверхні контакту фаз, що створюється краплями розпорошеної рідини

П. Є. Трофименко, М. В. Найда, О. В. Хоменко, С. П. Латін

*Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

Основне призначення диспергувальних пристроїв — перетворення суцільного потоку рідини на дисперсну систему, що складається з крапель рідини. Є два способи перетворення струменів рідини в тонкі плівки: гідростатичний (на похилій пластині) та відцентровий (на плівкоутворювачі — лопаті). Процес розпорошення або диспергування загалом здійснюється наступним чином. З плівкоутворювального елемента (пластини або лопаті) рідина у вигляді тонкої пласкої плівки рухається з певною відносною швидкістю у газове середовище, взаємодіючи з яким плівка руйнується, перетворюється в потік крапель — факел розпорошування. Вивченням розпорошувального тепломасообміну займалися багато груп вчених і низка інститутів. Має сенс розглянути питання, якого розміру крапель раціонально прагнути досягти в промислових технологіях за використання тепломасообмінних контактних апаратів розпорошувального типу? Іншими словами, який розмір крапель має давати технічні, енергетичні й інші переваги для найліпшого використання ефекту швидкості зміни поверхні контакту фаз? Основні недоліки дрібнодисперсного розпорошення: проблеми одержання мінімальних розмірів (через великі обороти відцентрових розпорошувачів або великий тиск і малу продуктивність форсункових розпорошувачів); велике енергоспоживання; велика втрата крапель (боротьба з нею — завдання навіть складніше, ніж одержання дрібних крапель); велике випаровування (чим менший діаметер крапель, тим швидше вони випаровуються). Останнє може бути корисним ефектом, але іноді й абсолютно неприйнятним для багатьох технологічних процесів. Переваги великодисперсного розпорошення: обладнання для здійснення такого розпорошення достатньо просте; невелика втрата крапель; витрата енергії в багато разів менше, ніж за традиційних способів розпорошення рідин (форсункового, відцентрового та інших).

The main purpose of dispersing devices is to convert a continuous flow of liquid into a dispersed system consisting of drops of liquid. There are two

ways to convert fluid jets into thin films: hydrostatic (on an inclined plate) and centrifugal (on the film-forming—blade). The process of spraying or dispersing is generally as follows. From the film-forming element (plate or blade), the liquid in the form of a thin flat film moves at a certain relative speed into the gaseous medium, interacting with which the film is destroyed, turns into a stream of drops (spray torch). Many groups of scientists and a number of institutes have been engaged in the study of the spray heat and mass transfer. It makes sense to consider the size of the drops rationally seek to achieve in industrial technology, when using the heat and mass transfer contact devices of the spray type. In other words, what size of droplets should give technical, energy and other advantages for the best use of the effect of the rate of change of the contact surface of the phases? The main disadvantages of fine spraying are: problems of obtaining the minimum sizes (due to big turns of centrifugal sprayers or big pressure and low productivity of nozzle sprayers); high energy consumption; large loss of drops (fighting it is the task, which is even more difficult than getting small drops); large evaporation (*i.e.*, the smaller the diameter of the droplets, the faster they evaporate). The latter can be a useful effect, but sometimes, it is completely unacceptable for many technological processes. Advantages of bulk spraying are quite simple equipment for such spraying, small loss of drops, energy consumption many times less than with traditional methods of spraying liquids (nozzle, centrifugal, *etc.*).

Ключові слова: плівка, імерсійна рідина, плівкоутворювач, локальна товщина, відцентровий розпорошувач, крапля.

Key words: film, immersion fluid, film former, local thickness, centrifugal sprayer, drop.

(Отримано 18 жовтня 2022 р.)

1. ВСТУП

Поверхня контакту фаз, створювана усіма краплями рідини, визначається як сума поверхонь всіх окремих крапель рідини. Якщо застосувати найбільш підходяще для цього випадку поняття середнього об'ємно-поверхневого діаметра, то миттєва швидкість зміни поверхні F контакту фаз може бути представленою такою залежністю [1–9]:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{6Q}{d_k}, \quad (1)$$

де Q — об'ємна витрата рідини [$\text{м}^3/\text{с}$], d_k — середній об'ємно-поверхневий діаметер крапель.

Припустимо Q та d_k постійними (випаровування рідини з поверхні крапель вважатимемо незначним). Нехай середній час руху крапель від моменту виникнення їх до попадання на стінки кон-

тактного апарату або на поверхню рідини дорівнює $\langle \tau \rangle$. За таких умов усередині контактного апарату утворюється постійна динамічна поверхня контакту F фаз, що дорівнює:

$$F = (6Q/d_k)\langle \tau \rangle. \quad (2)$$

Саме цю динамічну поверхню контакту фаз найчастіше мають на увазі і враховують у рівняннях тепло- та масопередачі. Час взаємочину краплі з газовою фазою залежить від початкової швидкості та загальної довжини шляху руху краплі в контактній зоні. Відносна швидкість, пришвидшення й інші параметри руху краплі навіть за її постійного діаметра є змінними, що залежать від багатьох факторів.

Припустимо, що крапля розпорошеної рідини не змінює свою форму та розмір. Відносна швидкість u кожної краплі у будь-який момент часу є функцією від часу, Рейнольдсового числа Re , d_k й інших параметрів: $u = u(d_k, t, Re, \dots)$. Критерій Re визначається через відносну швидкість u та діаметр крапель. Час τ руху краплі можна знайти, постулюючи кінематичні та тепломасообмінні моделі процесу. Найчастіше величина τ знаходиться на реальному апараті після усереднення швидкостей усієї сукупності крапель факела розпорошування.

З (1) і (2) випливає, що за розпорошувального тепломасообміну є два способи одержання високорозвиненої поверхні контакту фаз: шляхом зменшення середнього діаметра d_k крапель за постійної витрати Q або шляхом збільшення витрати Q диспергованої рідини за порівняно великого d_k .

В даній статті розглянуто кілька методів реєстрації крапель. За допомогою дослідження утворення крапель у майбутньому полегшується розробка розпорошувальних апаратів.

2. ОПТИМАЛЬНИЙ РОЗМІР КРАПЕЛЬ

Після численних досліджень, вивчення й аналізу роботи розпорошувальних контактних апаратів у промислових умовах зроблено висновок, що найбільш прийнятним є розпорошення рідини для тепломасообмінних процесів (крім процесів сушіння та згоряння в двигунах внутрішнього згоряння), за якого діаметр розпорошених крапель знаходиться в межах 0,3–0,6 мм — в середньому близько 0,4 мм.

Справді, швидкість руху крапель діаметром у 0,3–0,6 мм в повітрі — близько 1 м/с [1]. Для таких розмірів крапель за відповідно підбраної аеродинаміки газорідинних потоків можна порівняно просто уникнути особливо шкідливого наслідку дрібнокрапельного розпорошення — віднесення крапель за межі розпоро-

шувальних контактних апаратів. Та й відносна кількість дрібних крапель за великокрапельного способу розпорощення є невеликою. Тому загальне винесення рідини за рахунок дрібних крапель може перебувати в межах норм гранично допустимих концентрацій викидів за мінімальних енергетичних і апаратних витрат.

Особливості великокрапельного розпорощування показують, що його можна та потрібно використовувати в простих за конструкцією тепломасообмінних контактних апаратах. Але в таких апаратах необхідно створити умови, які б забезпечували високу ефективність їхньої роботи за мінімального енергоспоживання на сам процес розпорощення рідини та інші витрати енергії, пов'язані з використанням у контактних апаратах зазначених розмірів крапель.

Більшості з перерахованих вимог відповідає пневмоплівковий розпорощувач. Для найбільш тонких тепломасообмінних процесів (наприклад для розпорощувального сушіння) раціонально використовувати малооборотні плівкові розпорощувачі з формуванням плівок на вдосконалених конструкціях плівкоутворювачів.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ КОНТАКТУ ФАЗ

Поверхня контакту фаз визначається сукупною поверхнею всіх крапель, що беруть активну участь у аналізованому процесі. Звертаємо увагу на поняття «активне». Активними називають такі краплі, поверхня яких може проводити контактний тепломасообмін з навколишньою газовою фазою значно швидше, ніж він проводиться на чисто молекулярному рівні.

Нагадаємо коротко принцип роботи пневмоплівкових розпорощувачів. Окремі струмені рідини зі збірника 1 (рис. 1) через

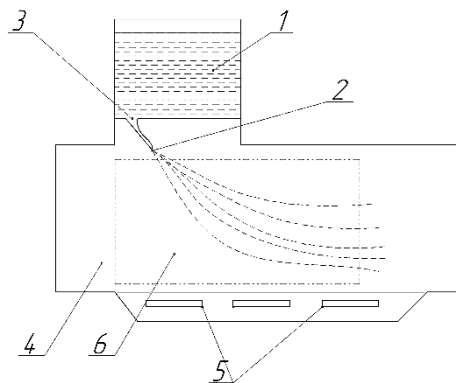


Рис. 1. Експериментальний стенд пневмоплівкового розпорощувача.¹

отвори 3, розтікаючись по похилій пластині 2, перетворюються на одиночні плівки, які на кожній пластині зливаються в суцільну тонку плівку. Суцільна плівка рідини, сходячи з кромки пластини-плівкоутворювача, потрапляє в розпорошувальну камеру — газохідний канал 4 прямокутного або іншого перерізу, вздовж якого рухається газовий потік, що розпорошує плівку рідини.

Для фотореєстрації розмірів і процесів диспергування застосовувався дзеркальний фотоапарат, який робив фотографії через прозору пластину в корпусі 6. Освітлювачі 5 — імпульсні джерела світла з регульованими характеристиками в герметичному корпусі з охолодженням дистильованою водою та повітрям уможливили проводити освітлення, змінюючи кути падіння світла та тривалість освітлення, необхідні для того чи іншого конкретного дослідження.

Розміри крапель визначалися кількома способами. Зокрема, часто використовувався метод безпосереднього фотографування факела рідини, який розпорошується в пневмоплівковий розпорошувач, з порівняно тривалою витримкою порядку 10^{-3} – 10^{-2} с. Приклад такого фотознімка представлено на рис. 2. На ньому зображено факел із крапель розпорошеної пневмоплівковим розпорошувачем технічної води з кутом установки пластин у 45° , швидкістю повітря у каналі пневмоплівкового розпорошувача у 10 м/с, напором води у 250 мм; час експозиції — $0,5 \cdot 10^{-3}$ с.

На рисунку 3 представлено факел від розпорошення технічної води у відцентровому розпорошувачі (швидкість обертання — 3000 об/хв). Міряючи ширину «кометних хвостів», знаходять ширину зображення крапель на фотографіях, а співвідносячи їх із розмірами маркера (дротів діаметром у 1–3 мм), визначають справжні розміри крапель. А за часом експозиції та довжиною «хвоста» у кожній краплі знаходять абсолютну швидкість краплі.

Проте цей метод, хоч і наочний, але через нерізкість більшості крапель на фотографії його результати далекі від досконалості. Нерізкість зумовлено фізичною природою фотооб'єктивів — невеликою глибиною різкості короткофокусних фотооб'єктивів і сумарною роздільною здатністю фотооб'єктиву та фотозображення.

Відомо кілька інших методів реєстрації крапель. Найпростіший — метод кольорових крапель на фільтрувальному папері [2, 3]. Він полягає у мірянні діаметрів кольорових плям, утворених під час падіння крапель на висушений фільтрувальний папір, попередньо просочений будь-яким індикатором, що дає кольорове забарвлення плями. Цей метод є придатним для міряння крапель діаметром близько 0,5 мм. Дрібніші краплі дають дуже нерозбір-



Рис. 2. Факел від розпилення технічної води в пневмоплівковий розпилювач.²

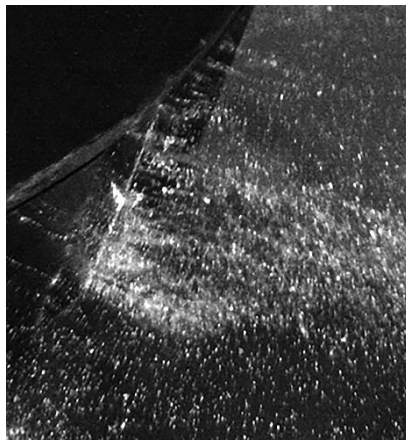


Рис. 3. Факел від розпилення технічної води в відцентровому розпилювачі.³

ливі розпливчасті плями, які практично неможливо вірогідно зареєструвати. Великі краплі за великої швидкості, як показали наші дослідження, розбиваються в момент падіння на дрібні; тому результати мірянь також спотворюються.

Серед інтегральних методів широкою популярністю користуються електроконтактні методи [4, 5]. Вони працюють за принципом замикання електропровідною краплею рідких тонких металевих голків. На віддалі між голками за кількістю замикань голків краплями води за певних припущень [6] одержують інтегральну криву розподілу. Саме припущення про інтегральний вид функції розподілу крапель, а не абсолютний вимір відносного розміру крапель істотно знецінює електроконтактні методи мірянь діаметрів крапель. Тому електроконтактні методи особливо важ-

ливі лише для виявлення та міряння крапель максимальних розмірів.

Оптичні методи міряння розмірів крапель [7–9] засновано на мірянні світлового потоку, що розсіяний або пройшов через шар певної товщини факела крапель розпорошеної рідини. Оптичні методи дають переважно відносне значення середніх розмірів частинок у факелі, тобто за допомогою цього метода можна порівнювати відносні розміри частинок у цьому факелі з факелом, прийнятим за зразок. В оптичних методах визначення характеристик так званої кривої розсіяння — найуразливіше місце, оскільки її перебіг залежить від розмірів крапель. Зазначимо, що, наприклад, в апараті поверхневих сил оптичні інтерференційні методики дають змогу міряти віддаль між молекулярно-гладкими поверхнями з точністю до 0,1 нм [10–13].

Спеціальні фотографічні методи дослідження дають найбільш точну картину розподілу частинок за розмірами у факелі розпорошеної рідини [14–17].

Найбільш продуктивним у дослідженнях дисперсного складу дрібних крапель є метод уловлювання крапель в імерсійну рідину. Нами проведено вивчення досвіду дослідників, які раніше застосовували такий метод. Розглянемо його деякі технічні й інші особливості.

На рисунку 4 показано пласкопаралельну кювету, що використовується для уловлювання крапель в імерсійну рідину. Пристрій кювети: на звільнену від желатини фотопластинку наклеюється пластинка із пластику з отвором діаметром близько 40 мм. Скляна пластинка покривається твердим прозорим шаром речовини, що не змочується краплями досліджуваної рідини. У цю кювету наливається імерсійна рідина. Вимоги до імерсійної рідини, що використовується для уловлювання крапель: вона має бути незмішуваною та хемічно інертною за відношенням щодо рідини, яку розпорошують, мати за можливістю більш високу

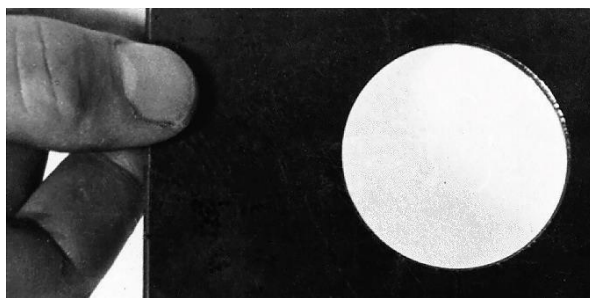


Рис. 4. Кювета для уловлювання слабо інтенсивних потоків крапель в імерсійну рідину.⁴

в'язкість (за низької в'язкості рідини кювету не можна нахилити або переносити під час відбору проб). Імерсійна рідина має мати низький поверхневий натяг, щоб найбільш дрібні краплі могли проникнути через поверхневий шар імерсійної рідини, а густина імерсійної рідини має бути приблизно рівною густині крапель досліджуваної рідини. Крім того, імерсійна рідина має бути оптично однорідною та прозорою.

Виходячи з наведених вище вимог, підбір речовини для імерсійної рідини здійснюється експериментально. Такий підбір рідини та товщини її шару в кюветі є особливо необхідним у разі малого поверхневого натягу та в'язкості досліджуваних рідин, і особливо, коли краплі летять зі швидкістю у 20 м/с і вище. У разі маленьких в'язкості та товщини шару імерсійної рідини краплі, що проникають в імерсійну рідину, можуть повторно розбиватися на скляну підкладку за порівняно невеликої товщини шару рідини. А за великої в'язкості імерсійної рідини швидкі краплі можуть розбиватися, навіть ударяючись об поверхню самої імерсійної рідини. І в першому та в другому випадках зареєстровані розміри та кількості крапель і їхні розміри відрізнятимуться від дійсних значень.

Про наявність процесів дроблення крапель на поверхні шару, що вловлює, або за удару об скло можна судити за утворенням біля «великих крапель» деякої кількості дрібних крапель-супутників, поверхнева концентрація яких різко відрізняється від концентрації розташованих крапель в цілому по кюветі. Повторне дроблення добре відрізняється під вимірювальним мікроскопом. Якщо кількість крапель з віддаленням від великої краплі на віддаль більше $2d_k$ різко зменшується, то має місце повторне

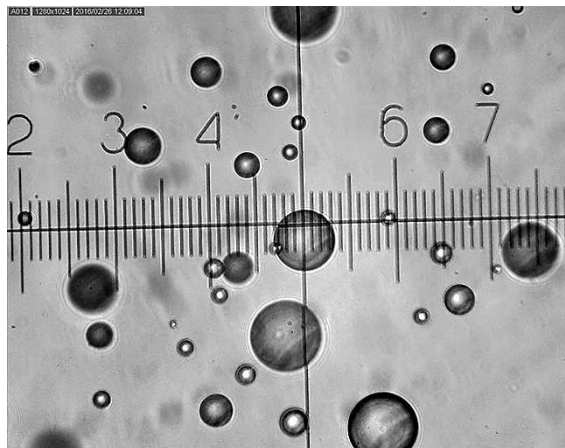


Рис. 5. Приклад уловлювання крапель у кювету з імерсійною рідиною.⁵

дроблення великих крапель на дрібні. Приклад уловлювання крапель в імерсійну рідину наведено на рис. 5.

4. ВИМОГИ ДО КОНСТРУКЦІЇ ПРОБОВІДБІРНИКА

Пробовідбірник має бути достатньо компактним, уможливити варіювати час експозиції, виключати допуск крапель до імерсійного середовища до та після відбору проби, запобігати вторинному дробленню крапель і потраплянню сторонніх бризок, а також мінімально впливати на досліджувані потоки крапель і газової фази. Для не дуже щільних потоків крапель і порівняно невеликих швидкостей газу пробовідбірник є щілинним закривом, в який встановлюється кювета з імерсійною рідиною. Основа закриву — щілина, що рухається, з обох боків якої знаходиться екран, що не пропускає краплі. Натяжна пружина уможливає міняти час експозиції кювети під потоком крапель. Краплі, що осіли в імерсійній рідині, негайно фотографуються мікрофотоустановкою (рис. 6).

Мікрофотоустановка включає інструментальний дослідний вимірювальний мікроскоп, що забезпечує можливість фіксування та точного переміщення кювети, та вимірювальний мікроскоп типу МИР-2 або аналогічний, що забезпечує фотографування дзеркальним фотоапаратом мікрометричної шкали з ціною поділу у

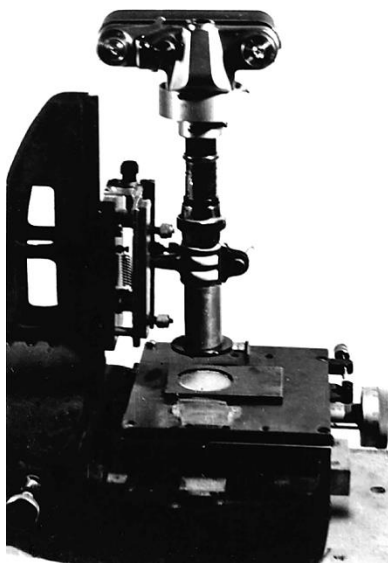


Рис. 6. Мікрофотоустановка для одержання фотозображень крапель і мірювання їхніх розмірів в імерсійній рідині.⁶

0,05 мм на тлі вимірюваних крапель. Як освітлювальний пристрій використовувався електронний освітлювач із регульованою енергією спалаху. Фотографування проводилося за допомогою цифрової камери DinoEye; за допомогою неї зображення передавалося на монітор комп'ютера.

5. ВИСНОВКИ

1. Для розробки майбутніх розпорошувальних апаратів важливе місце посідає дослідження поверхні контакту фаз. Особлива увага приділяється дослідженню утворення крапель та їхніх розмірів, що потім впливає на галузь використання розпорошувальних апаратів.

2. Нині є декілька методів реєстрації крапель: фотореєстрація, метод кольорових крапель, інтегральний метод, оптичний метод.

3. Найбільш продуктивний у дослідженнях дисперсного складу дрібних крапель — метод уловлювання крапель в імерсійну рідину.

4. Фотографії, одержані даним методом, дають уявлення про якість результатів, одержуваних під час реєстрації крапель.

Автори висловлюють подяку МОН України за фінансову підтримку роботи (проект «Механізми формування та моделювання структурного стану плівок тугоплавких сполук с прогнозованими механічними характеристиками», № 0122U000776).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. Н. Ужов, А. Г. Вальдберг, *Подготовка промышленных газов к очистке* (Москва: Химия: 1975).
2. А. М. Ластовцев, *Труды МИХМ*, 11: 41 (1957).
3. А. Вегенер, *Термодинамика атмосферы* (Москва–Ленинград: ОНТИ: 1935) (пер. з нім.).
4. Л. М. Левин, *Исследование по физике грубодисперсных аэрозолей* (Москва: АН СССР: 1961).
5. М. Викс, А. Даклер, *Новый метод измерения распределения размеров капель электропроводной жидкости в двухфазном потоке. Достижения в области теплообмена* (Москва: Мир: 1970), с. 24 (пер. з англ.).
6. Э. Г. Братута, *Диагностика, расчет и интенсификация процессов с дисперсными газожидкостными потоками в объектах энергетики металлургии и аппаратах защиты окружающей среды* (дис. д-ра техн. наук) (Харьков: ХПИ: 1986).
7. Э. Г. Братута, Л. А. Заночкин, *Энергетическое машиностроение*, 38: 71 (1984).
8. Н. А. Фукс, *Успехи химии*, V, вып. 12: 1652(54) (1936).
9. Г. К. Лебедюк, Б. К. Барляев, *Химическая промышленность*, 1: 48 (1967).

10. A. V. Khomenko, Ya. A. Lyashenko, and L. S. Metlov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **30**, No. 6: 859 (2008) (in Russian).
11. A. V. Khomenko, Ya. A. Lyashenko, and V. N. Borisyyuk, *Fluct. Noise Lett.*, **9**, No. 1: 19 (2010); <https://doi.org/10.1142/S0219477510000046>
12. A. Khomenko, M. Khomenko, B. Persson, and K. Khomenko, *Tribol. Lett.*, **65**, No. 2: 71 (2017); <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0853-5>
13. A. V. Khomenko, N. V. Prodanov, and B. N. J. Persson, *Condens. Matter Phys.*, **16**, No. 3: 33401 (2013); <https://doi.org/10.5488/CMP.16.33401>
14. А. И. Родионов, А. М. Кашников, *Химическая промышленность*, **3**: 209 (1967).
15. В. М. Ефимов, А. М. Искольдский, Ю. Е. Нестерихин, *Электронно-оптическая фотосъемка в физическом эксперименте* (Новосибирск: Наука: 1978).
16. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s1077>
17. P. E. Trofimenko, M. V. Naida, and A. V. Khomenko, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **18**, Iss. 3: 565 (2020); <https://doi.org/10.15407/nnn.18.03.565>

REFERENCES

1. V. N. Uzhov and A. G. Val'dberg, *Podgotovka Promyshlennykh Gazov k Ochistke* [Preparation of Industrial Gases for Purification] (Moskva: Khimiya: 1975) (in Russian).
2. A. M. Lastovtsev, *Trudy MIKhM*, **11**: 41 (1957) (in Russian).
3. A. Wegener, *Termodinamika Atmosfery* [Thermodynamics of the Atmosphere] (Moskva–Leningrad: ONTI: 1935) (Russian translation).
4. L. M. Levin, *Issledovanie po Fizike Grubodispersnykh Aehrozoley* [Research on the Physics of Coarse Aerosols] (Moskva: AN SSSR: 1961) (in Russian).
5. M. Wicks III and A. E. Dukler, *Novyy Metod Izmereniya Raspredeleniya Razmerov Kapel' Ehlektroprovodnoy Zhidkosti v Dvukhfaznom Potoke. Dostizheniya v Oblasti Teploobmena* [A New Method for Measuring the Size Distribution of Electrically Conductive Liquid Droplets in a Two-Phase Flow. Advances in Heat Transfer] (Moskva: Mir: 1970), p. 24 (Russian translation).
6. E. G. Bratuta, *Diagnostika, Rashchyot i Intensifikatsiya Protsessov s Dispersnyimi Gazozhidkostnymi Potokami v Ob'yektakh Ehnergetiki Metallurgii i Apparatakh Zashchity Okruzhayushchey Sredy* [Diagnostics, Calculation and Intensification of Processes with Dispersed Gas–Liquid Flows in Energy Facilities of Metallurgy and Environmental Protection Devices] (Thesis of Disser. for Dr. Techn. Sci.) (Kharkov: KhPI: 1986) (in Russian).
7. E. G. Bratuta and L. A. Zanochnik, *Energeticheskoye Mashinostroyeniye*, **4**: 71 (1984) (in Russian).
8. N. A. Fuchs, *Uspekhi Khimii*, **V**, No. 12: 1652(54) (1936) (in Russian).
9. G. K. Lebedyuk and B. K. Barlyaev, *Khimicheskaya Promyshlennost'*, **1**: 48 (1967) (in Russian).
10. A. V. Khomenko, Ya. A. Lyashenko, and L. S. Metlov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **30**, No. 6: 859 (2008) (in Russian).
11. A. V. Khomenko, Ya. A. Lyashenko, and V. N. Borisyyuk, *Fluct. Noise Lett.*,

- 9, No. 1: 19; <https://doi.org/10.1142/S0219477510000046>
12. A. Khomenko, M. Khomenko, B. Persson, and K. Khomenko, *Tribol. Lett.*, **65**, No. 2: 71 (2017); <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0853-5>
13. A. V. Khomenko, N. V. Prodanov, and B. N. J. Persson, *Condens. Matter Phys.*, **16**, No. 3: 33401 (2013); <https://doi.org/10.5488/CMP.16.33401>
14. A. I. Rodionov and A. M. Kashnikov, *Khimicheskaya Promyshlennost'*, **3**: 209 (1967) (in Russian).
15. V. M. Efimov, A. M. Iskol'dskiy, and Yu. E. Nesterikhin, *Ehlektronno-Opticheskaya Fotos'yomka v Fizicheskoy Ehksperimente* [Electron-Optical Photography in a Physical Experiment] (Novosibirsk: Nauka: 1978) (in Russian).
16. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s1077>
17. P. E. Trofimenko, M. V. Naida, and A. V. Khomenko, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **18**, Iss. 3: 565 (2020); <https://doi.org/10.15407/nnn.18.03.565>

Sumy State University,
2, Rimsky-Korsakov Str.,
UA-40007 Sumy, Ukraine

¹ Fig. 1. Experimental stand of air-film sprayer.

² Fig. 2. Torch from spraying technical water in air-film sprayer.

³ Fig. 3. Torch from spraying technical water in a centrifugal sprayer.

⁴ Fig. 4. Ditch to capture low-intensity flows of droplets in the immersion fluid.

⁵ Fig. 5. Example of trapping drops in a cuvette with immersion fluid.

⁶ Fig. 6. Microphoto installation for obtaining photo images of drops and measuring their size in immersion liquid.