

PACS numbers: 47.20.Ib, 47.61.-k, 62.20.Qp, 62.25.-g, 68.08.-p, 68.15.+e

Метод і пристрій для експериментального визначення параметрів плівкоутворення на статичних плівкоутворювачах

П. Є. Трофименко, М. В. Найда, О. В. Хоменко, А. М. Ліцман

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

Розглянуто методи та пристрої для експериментального визначення параметрів плівкоутворення на статичних плівкоутворювачах, а саме, принципові схеми експериментальних установок (стендів) для перевірки й уточнення деяких параметрів формування тонких плівок. Стенд № 1 призначений для досліджень локальних витрат рідини та поздовжніх складових швидкостей плівки (швидкостей уздовж течії рідини). Стенд № 2 — для вивчення товщини плівки, починаючи від декількох нанометрів, і характеру формування та переміщення поверхні плівки по плівкоутворювачу. До основних параметрів плівкоутворення на статичних плівкоутворювачах відносяться: ширина розтікання плівки, товщина плівки, в'язкість рідини, поверхневий натяг, густина рідини. Для міряння товщини плівки застосовувалася електроконтактна метода. В'язкість робочої рідини мірялася стандартними капілярними вискозиметрами. Коефіцієнт поверхневого натягу перевірявся також методом міряння висоти підйому рідини у капілярі відомого діаметра. Цей спосіб вимагає достатньо ретельної підготовки капіляра та дає великий розкид (похибку) вимірюваної величини. Густина досліджуваних рідин міряється набором стандартних ареометрів. Висока ефективність роботи плівкових розпорошувачів сильно залежить від перелічених параметрів плівки. В досліджах використовувалися: дистильована та технічна води, содові розчини різної концентрації, розчини гліцерину, пульпи з крейди та суспензій з двоокису титану. Для зміни поверхневого натягу додавалися поверхнево-активні речовини. Рідина витікала на різні підкладинки: з неіржавійної криці, звичайної криці, стопів алюмінію, текстоліту, фторопласту, вініпласту й оргскла. Експериментальні дослідження мають незначну похибку в порівнянні з теоретичними показниками. Результати даних досліджень можна використовувати для промислового проектування розпорошувачів рідини.

Methods and devices for the experimental determination of the parameters of film formation on the static film-forming materials are considered.

Namely, the schematic diagrams of experimental installations (stands) for checking and refining some parameters of formation of thin films. Stand No. 1 is intended for investigation of local liquid-flow rates and longitudinal components of film velocities (velocities along the liquid flow). Stand No. 2 is for studying the thickness of film, starting from a few nanometres, and the nature of formation and movement of film surface along the film-forming material. The main parameters of film formation on static film-forming agents include spreading width of film, film thickness, liquid viscosity, surface tension, liquid density. The electrical contact method is used to measure the film thickness. The viscosity of the working fluid is measured with standard capillary viscometers. The surface tension coefficient is also checked by measuring the height of liquid rise in a capillary of known diameter. This method requires a rather thorough preparation of the capillary and gives a large scatter (error) of the measured value. The density of the investigated liquids is measured by a set of standard hydrometers. The high efficiency of film sprayers strongly depends on the listed parameters of film. The experiments used distilled and industrial water, soda solutions of various concentrations, solutions of glycerine, chalk pulp and titanium dioxide suspensions. Surfactants are added to change the surface tension. The liquid flowed out onto various substrates: stainless steel, ordinary steel, aluminium alloys, textolite, fluoroplastic, vinyl plastic, and plexiglass. Experimental studies have a slight error in comparison with theoretical indicators. The results of these studies can be used for industrial design of liquid sprayers, which find their application in many industries (for heat and mass transfer between liquid droplets and gas phase in spray drying, absorption, interfacial reactions, cooling of liquids, gas conditioning and other similar processes).

Ключові слова: параметри плівки рідини, експериментальний стенд, плівкоутворювач, поверхневий натяг, в'язкість.

Key words: liquid-film parameters, experimental stand, film formation, surface tension, viscosity.

(Отримано 13 березня 2021 р.; після доопрацювання — 5 квітня 2021 р.)

1. ВСТУП

У ряді виробництв використовуються плівкові розпорошувачі. Даний тип розпорошувача має дуже широку сферу застосування в харчовій, хемічній, фармацевтичній та інших галузях промисловості для тепло- та масообміну між краплями рідини та газовою фазою в процесах розпорошувальної сушки, абсорбції, проведення міжфазних реакцій, охолодження рідин, кондиціонування газів та в інших подібних процесах [1–6].

Такий широкий спектр використання плівкових розпорошувачів вказує на високу ефективність роботи даного пристрою. Принцип роботи будь-якого диспергатора рідини (розпорошувача)

є наступним: незалежно від конструкції розпорошувача в нього надходить суцільна рідина, а після процесу розпорошення вона знаходиться вже у диспергованому каплеподібному стані.

Висока ефективність роботи плівкових розпорошувачів сильно залежить від параметрів плівки, яка стікає з кромки розпорошувача; а саме, до основних параметрів плівкоутворення на статичних плівкоутворювачах відносяться: ширина розтікання плівки, товщина плівки, в'язкість рідини, поверхневий натяг, густина рідини.

2. ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ ПЛІВКОВИХ РОЗПОРОШУВАЧІВ

Принципові схеми експериментальних установок (стендів) для перевірки й уточнення деяких параметрів формування тонких плівок показано на рис. 1, 2.

Стенд на рисунку 1 призначений для досліджень локальних витрат рідини та поздовжніх складових швидкостей плівки (швидкостей вздовж течії рідини).

Основними елементами стенда по рис. 1 є: резервуар — бак *1* постійного рівня H рідини, у дніщі якого розташовано одне або кілька отворів *2* діаметром d , які служать для витікання рідини; пластини-плівкоутворювачі *3* з різних матеріалів, які можуть

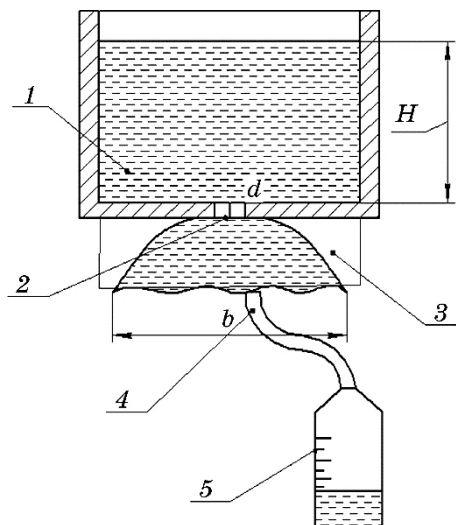


Рис. 1. Принципова схема одного зі стендів для міряння локальних витрат рідини в плівках на статичних плівкоутворювачах. *1* — бак з рідиною; *2* — отвір для витікання рідини; *3* — статичний плівкоутворювач; *4* і *5* — локальний пробовідбірник і вимірник витрати рідини.¹

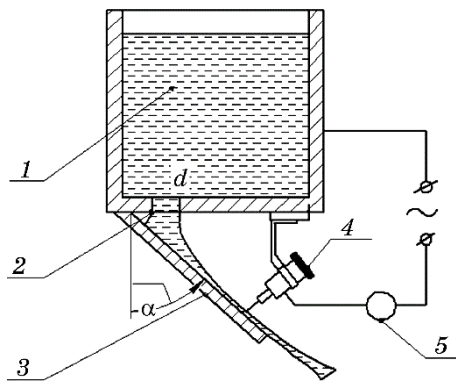


Рис. 2. Принципова схема стенда для контактних досліджень товщини рідкої плівки, а також поверхневих явищ, що відбуваються упродовж формування та руху рідких плівок на плоскому плівкоутворювачі.²

встановлюватися під різними кутами α ; приймач 4 збірника локального витратоміра 5. Наконечник приймача 4 виконаний таким чином, що практично не робить турбулізаційного впливу на лінії течії рідини в плівці; це — прямокутня, загострена на виході трубка зі стінками товщиною у 0,2–0,3 мм.

Ширина розтікання плівки b міряється міліметровою лінійкою, яка розташована над плівкою і може переміщатися уздовж течії. Візуальна точність мірянь півширини плівки — близько одного міліметра.

Отвори 2 виконано так, що можуть в процесі досліджень замінюватися. Найчастіше використовуються отвори діаметром у 8–10–11–12–14–16–18–20 мм. Цей вибір розмірів отворів не є випадковим. Саме такі розміри отворів найчастіше вигідно використовувати та використовуються в промисловості для порівняно грубого диспергування рідин.

На рисунку 2 представлено один зі стендів для вивчення товщини плівки та характеру формування і переміщення поверхні плівки по плівкоутворювачу.

Стенд включає: резервуар постійного рівня рідини, в дніщі якого передбачено один або кілька отворів 2, що служать для витікання рідини та початкового формування струменя; плоский змінний плівкоутворювач 3; електроконтактний пристрій — мікрометр 4 з індикаторним пристроєм 5 (міліамперметр змінного струму або спеціальна електронна інтегрувальна схема з осцилографом).

У дослідженнях за цією методикою рідини мають бути обов'язково електропровідними; наприклад, це — звичайна вода або розчини речовин, які мають йонну провідність.

Стенди на рисунках 1, 2 уможливають вивчати характеристики плівкоутворення на пласкій пластинці як поодиноких плівок, так і умови злиття окремих плівок у суцільну плівку.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для міряння товщини плівки h застосовувалася електроконтактна метода [1–9] (рис. 2). Переміщувана по висоті мікрометром голка в момент торкання поверхні рідини замикає електричний ланцюг. Після перетворення струму можна виміряти не тільки середню товщину плівки, але і коливні процеси, які виникають на поверхні плівки та супроводжують плівкоутворення.

Локальні витрати рідини уздовж ширини плівки визначалися об'ємною методою за схемою на рис. 1. Потім обчислювалися локальні середні швидкості течії рідини на ділянках плівки за співвідношенням

$$u = \frac{\Delta Q}{hQ\Delta b},$$

де ΔQ — локальна витрата рідини на ділянці плівки; Δb — ширина ділянки, відповідна ширині пробовідбірника 4; h — товщина плівки на даній ділянці.

В'язкість робочої рідини мірялася стандартними капілярними віскозиметрами, такими, як ВПЖ-1, призначеними для визначення кінематичної в'язкості згідно з ГОСТ 33-66. Міряння в'язкості за допомогою віскозиметрів такого типу є найбільш достовірними. Однак методу й апаратуру було вдосконалено.

Прилади використаного типу засновано на використанні Пуазейлевої формули [10–14]

$$V = \frac{\pi r^4}{8\mu L} (P_1 - P_2) t,$$

де V — об'єм рідини, що протікає за час t по капіляру радіусом r і довжиною L під впливом різниці тисків $P_1 - P_2$; μ — динамічна в'язкість рідини.

Перепад тисків у встановленому вертикально капілярі висотою (довжиною) L дорівнює $P_1 - P_2 = \rho g L$. Для конкретного віскозиметра радіус, довжина капіляра L і об'єм V рідини, що протікає через капіляр, постійні. Тоді, позначивши

$$\frac{\pi r^4}{8V} g = C_k,$$

знаходимо динамічну та кінематичну в'язкості: $\mu = C_k \rho t$ [Па·с] та

$$v = C_k t \text{ [м}^2/\text{с]}.$$

В основу вдосконаленої методики мірювання поверхневого натягу покладено Ляплясову формулу [10, 11].

$$P = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

Для сферичної бульбашки, що знаходиться всередині рідини,

$$P = 2\sigma/r,$$

де P — додатковий (Ляплясів) тиск всередині під викривленою поверхнею рідини, σ — коефіцієнт поверхневого натягу, r_1, r_2 — головні радіуси кривини у даній точці поверхні (знаки їх визначаються за правилом: якщо радіус спрямований всередину бульбашки в рідині, то він позитивний, іншими словами, Ляплясів тиск стискає рідину).

Якщо скляний капіляр розташувати так, щоб він торкався поверхні досліджуваної рідини, і продувати через нього газ, будуть утворюватися бульбашки, тиск в яких залежить від коефіцієнта поверхневого натягу. Якщо цю рідину замінити стандартною, коефіцієнт поверхневого натягу якої відомий, то для неї

$$P_0 = 2\sigma_0/r_0.$$

Для одного і того ж капіляра r і r_0 є рівними. Тому для них тиск, що створений різними рідинами, пов'язується залежністю

$$\sigma = (P/P_0)\sigma_0,$$

де σ_0 — коефіцієнт поверхневого натягу відомої рідини.

Слід мати на увазі наступне: розмір утвореної бульбашки в загальному випадку залежить від коефіцієнта поверхневого натягу рідини. Тому в якості стандартної треба використовувати рідину, коефіцієнт поверхневого натягу якої добре відомий і не сильно відрізняється від досліджуваної.

Для мірювання коефіцієнта поверхневого натягу в посудину з герметичною пробкою заливається досліджувана рідина. Трубку-капіляр пропущено через пробку в рідину. Один кінець капілярної трубки торкається поверхні рідини, а другий — виведений у навколишню атмосферу. Посудину з'єднано з мікроманометром. Якщо у верхній частині посудини дуже повільно створювати розрідження, що міряється мікроманометром, то на кінчику капілярної трубки утворюється та зростає бульбашка повітря. Коли бульбашка зривається, починається утворення наступної і т.д.

Після мірювання максимального тиску в посудині для стандарт-

ної та досліджуваної рідин знаходять коефіцієнт поверхневого натягу σ досліджуваної рідини. Частота утворення бульбашок має бути невеликою, щоб виключити вплив інерційності мікроманометра та забезпечити умови утворення бульбашок, які подібні до рівноважних. Практично ця частота не повинна перевищувати 1–2 бульбашки в хвилину.

Коефіцієнт поверхневого натягу перевірявся також методом міряння висоти підйому рідини в капілярі відомого діаметра. Цей спосіб вимагає достатньо ретельної підготовки капіляра та дає великий розкид (похибки) вимірюваної величини.

Густина досліджуваних рідин міряється набором стандартних ареометрів згідно з ГОСТ 1300-57.

У дослідах використовувалися: дистильована та технічна води, содові розчини різної концентрації, розчини гліцерину, пульпи з крейди та суспензій з двоокису титану.

Для зміни поверхневого натягу додавалися поверхнево-активні речовини. Рідина витікала на різні підкладинки: з неіржавійної криці, звичайної криці, стопів алюмінію, текстоліту, фторопласту, вініпласту й оргскла.

Наведемо приклад типових досліджень з формування плівок питної та технічної вод на гладких підкладинках.

Спочатку було досліджено загальні закономірності витікання рідини — витрата та коефіцієнт витрати.

На рисунку 3 представлено експериментальну залежність об'ємної витрати Q технічної води від діаметрів отворів витікання рідини d та напору H для плаского плівкоутворювача, встановленого під кутом $\alpha = 45^\circ$ до вертикалі; $a = 30$ мм — віддаль від місця торкання плівкоутворювача до центру отвору для витікання рідин (рис. 2).

Для адекватного комплексного розв'язання рівнянь руху з заданим напором і коефіцієнтом K_s змішання швидкостей рідини необхідно точно знати коефіцієнт витрати. Тому завжди мають бути проведені міряння реальних коефіцієнтів витрати та, відповідно, коефіцієнтів змішання.

Рисунок 4 дає уявлення про експериментальну ширину b розтікання рідкого струменя в залежності від напору H і діаметра d отвору витікання технічної води для плаского плівкоутворювача, встановленого під кутом $\alpha = 45^\circ$.

4. ВИСНОВОК

Порівнюючи результати останніх графіків з теоретично одержаними величинами b , можна перекоонатися, що вони в межах похибок мірянь збігаються з точністю до 5–7%. Це вказує на те, що експериментально одержані параметри плівок за різних ре-

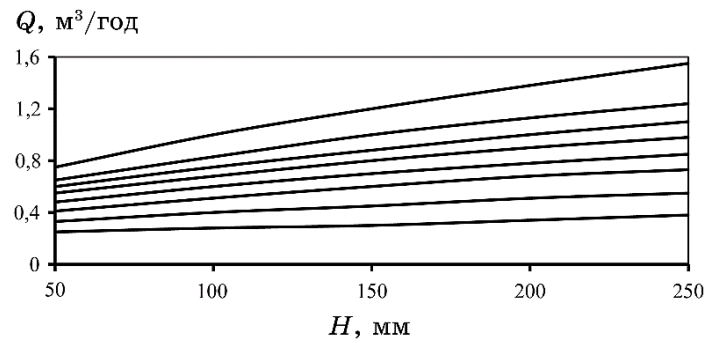


Рис. 3. Залежність об'ємної витрати Q технічної води від напору H (у мм). $\alpha = 45^\circ$. Криві 1–8 відповідають діаметрам отворів витікання рідини, які мають значення 10–12–14–15–16–17–18–20 мм відповідно.³

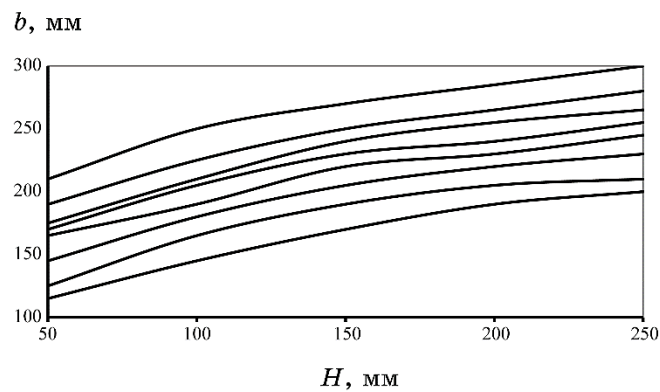


Рис. 4. Експериментальна залежність ширини b розтікання рідкої плівки від напору H на плоскому плівкоутворювачі, що встановлений під кутом у 45° до вертикалі; $a = 30$ мм. Криві 1–8 відповідають діаметрам отворів витікання рідини, які мають значення 10–12–14–15–16–17–18–20 мм відповідно.⁴

жимів витікання в межах похибок мірянь не суперечать висновкам з розв'язків застосованих рівнянь. Зокрема, з рисунку 4 видно, що за напору вище 200 мм припиняється помітне розтікання вільного струменя рідини. Цей експериментальний факт треба використовувати для розрахунку промислових статичних плівкоутворювачів, оптимальні напори рідин типу води в яких не перевищують 150–200 мм.

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

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Э. Г. Братута, А. Р. Переселков, *Инженерно-физический журнал*, **27**, № 5: 923 (1974).
2. Э. Г. Братута, *Диагностика капельных потоков при внешних воздействиях* (Киев: Техника: 1987).
3. Ю. М. Тананайко, Е. Г. Воронцов, *Методы расчета и исследования пленочных процессов* (Киев: Техника: 1975).
4. М. Вискс, А. Даклер, *Новый метод измерения распределения размеров капель электропроводной жидкости в двухфазном потоке* (Москва: Наука: 1970).
5. 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).
6. Э. Г. Братута, Л. А. Заночкин, *Энергетическое машиностроение*, **38**: 71 (1984).
7. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *J. Frict. Wear*, **31**, No. 4: 308 (2010); <https://doi.org/10.3103/S1068366610040100>
8. A. V. Khomenko, N. V. Prodanov, and B. N. J. Persson, *Condens. Matter Phys.*, **16**, 33401 (2013); <http://www.icmp.lviv.ua/journal/zbirnyk.75/33401/art33401.pdf>
9. L. S. Metlov, M. M. Myshlyaev, A. V. Khomenko, and I. A. Lyashenko, *Tech. Phys. Lett.*, **38**, Iss. 11: 972 (2012); <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785012110107>
10. И. В. Савельев, *Курс физики. Т. 1* (Москва: Наука: 2008).
11. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева, *Курс общей физики. Т. 1* (Санкт-Петербург: Лань: 2008).
12. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s1077>
13. Л. М. Черняк, М. В. Найда, С. Г. Гончарук, П. М. Трактиренко, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, **2**: 54 (2015); <https://journals.khnu.km.ua/index.php/MeasComp/issue/download/126/votp-2015-2>
14. P. E. Trofimenko, M. V. Naida, and A. V. Khomenko, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **18**, No. 3: 565 (2020); https://www.imp.kiev.ua/nanosys/media/pdf/2020/3/nano_vol18_iss3_p565p576_2020.pdf

REFERENCES

1. Eh. G. Bratuta and A. R. Pereselkov, *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal*, **27**, No. 5: 923 (1974) (in Russian).
2. Eh. G. Bratuta, *Diagnostika Kapel'nykh Potokov pri Vneshnikh Vozdeystviyakh* [Diagnostics of Drip Flows under External Influences] (Kiev: Tekhnika: 1987) (in Russian).
3. Yu. M. Tananayko and E. G. Vorontsov, *Metody Rashchyota i Issledovaniya Plyonochnykh Protessov* [Methods of Calculation and Investigation of Film

- Processes] (Kiev: Tekhnika: 1975) (in Russian).
4. M. Wicks and A. E. Dukler, *Novyy Metod Izmereniya Raspredeleniya Razmerov Kapel' Elektroprovodnoy Zhidkosti v Dvukhfaznom Potoke* [A New Method for Measuring the Size Distribution of Electrically Conductive Liquid Droplets in a Two-Phase Flow] (Moscow: Nauka: 1970) (in Russian).
 5. Eh. G. Bratuta, *Diagnostika, Raschyot 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. Tekhn. Sci.) (Kharkov: KhPI: 1986) (in Russian).
 6. Eh. G. Bratuta and L. A. Zanochnik, *Energeticheskoye Mashinostroenie*, **4**: 71 (1984) (in Russian).
 7. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *J. Frict. Wear*, **31**, No. 4: 308 (2010); <https://doi.org/10.3103/S1068366610040100>
 8. A. V. Khomenko, N. V. Prodanov, and B. N. J. Persson, *Condens. Matter Phys.*, **16**: 33401 (2013); <http://www.icmp.lviv.ua/journal/zbirnyk.75/33401/art33401.pdf>
 9. L. S. Metlov, M. M. Myshlyayev, A. V. Khomenko, and I. A. Lyashenko, *Tech. Phys. Lett.*, **38**, Iss. 11: 972 (2012); <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785012110107>
 10. I. V. Savel'ev, *Kurs Fiziki* [Physics Course]. *Vol. 1* (Moscow: Nauka: 2008) (in Russian).
 11. S. Eh. Frish and A. V. Timoreva, *Kurs Obshej Fiziki* [General Physics Course]. *Vol. 1* (St. Petersburg: Lan': 2008) (in Russian).
 12. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s1077>
 13. L. M. Chernyak, M. V. Naida, S. G. Goncharuk, and P. M. Traktirenko, *Vymiryval'na ta Obchyslyval'na Tekhnika v Tekhnologichnykh Protsesakh*, **2**: 54 (2015) (in Russian).
 14. P. E. Trofimenko, M. V. Naida, and A. V. Khomenko, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **18**, No. 3: 565 (2020) (in Ukrainian); https://www.imp.kiev.ua/nanosys/media/pdf/2020/3/nano_vol18_iss3_p565_p576_2020.pdf

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

¹ Fig. 1. Schematic diagram of one of the stands for measuring local fluid flow in films on static film formers. 1—tank with liquid; 2—hole for fluid leakage; 3—static film former; 4 and 5—local sampler and liquid flow meter.

² Fig. 2. Schematic diagram of the stand for contact studies of the thickness of the liquid film as well as surface phenomena, which occur during the formation and movement of liquid films on a flat film former.

³ Fig. 3. The dependence of the volume flow Q of technical water on the pressure head H (in mm). $\alpha = 45^\circ$. Curves 1–8 are corresponding to the diameters of the fluid outlets, which have values of 10–12–14–15–16–17–18–20 mm, respectively.

⁴ Fig. 4. Experimental dependence of the width b of the liquid film on the pressure head H on a flat film former, set at an angle of 45° to the vertical; $a = 30$ mm. Curves 1–8 are corresponding to the diameters of the fluid outlets, which have values of 10–12–14–15–16–17–18–20 mm, respectively.