

PACS numbers: 47.20.Ib, 47.61.-k, 62.20.Qp, 62.25.-g, 68.08.-p, 68.15.+e, 81.15.Rs

Експериментальне вимірювання товщини плівки на статичному плівкоутворювачі та плівковому відцентровому розпорошувачі

П. Є. Трофименко, М. В. Найда, О. В. Хоменко, Ю. І. Пушкарьов

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

Знання локальних і середніх товщин плівки на плівкоутворювачі необхідне для вивчення гідродинаміки течії, інтенсивності тепло- та масообмінів. Локальні значення товщини плівки потрібні для з'ясування гідродинамічної структури в конкретних умовах течії, вивчення особливостей динаміки руху тонкого рідинного шару та зміни інтенсивності тепло- та масообмінів у ньому. Локальні товщини плівки залежать від часу та густини зрошення, фізичних властивостей рідини, стану поверхні тощо. Відомо багато різних способів для міряння локальних товщин плівки. Нами розроблено новий метод і пристрій міряння локальних товщин плівок. У статті розглянуто методи та пристрої для експериментального визначення товщини плівки на статичному плівкоутворювачі, а також локальних товщин плівки, що витікає з плівкового відцентрового розпорошувача, а саме, принципові схеми експериментальних установок (стендів) для визначення товщини плівки. Стенд № 1 призначено 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 застосовувався електроконтактний метод. Стенд № 2 призначений для міряння локальних товщин плівки з плівкоутворювача відцентрового розпорошувача. Результати даних досліджень можна використовувати для промислового проектування розпорошувачів рідини. На обертових лопатях різної геометрії можна здійснити формування струменя рідини у тонку плівку. Сформувавши плівку потрібних параметрів, її можна диспергувати й одержати потрібну дисперсність порошин. Ці факти послужили обґрунтуванням для розробок плівкових розпорошувачів, що обертаються, в різних галузях промисловости.

Knowledge of the local and average film thicknesses on the film former is

necessary to study the hydrodynamics of the flow, the intensity of the heat and mass transfers. Local values of the film thickness are necessary to clarify the hydrodynamic structure under specific flow conditions, to study the features of the dynamics of the motion of a thin liquid layer and changes in the intensity of the heat and mass transfers in it. Local film thickness depends on the time and density of irrigation, the physical properties of the liquid and the state of the surface, and so on. Many different methods are known for measuring local film thicknesses. We have developed a new method and device for measuring local film thicknesses. The article considers methods and devices for experimental determination of film thickness on a static film former, as well as local film thicknesses flowing from a film centrifugal spray, namely, the schematic diagrams of experimental installations (stands) for determining the thickness of the film. Stand No. 1 is designed to study the thickness of the film, starting from a few nanometers, and the nature of the formation and movement of the film surface along the film former. The main parameters of film formation on static film formers include spreading width of the film, film thickness, liquid viscosity, surface tension, liquid density. The electrical contact method is used to measure the film thickness. Stand No. 2 is designed to measure local film thicknesses from a film former of a centrifugal atomizer. The results of these studies can be used for industrial design of liquid sprayers. On rotating blades of different geometry, it is possible to form a jet of liquid into a thin film. Having formed a film of the required parameters, it can be dispersed to obtain the desired dispersion of the spray. These facts served as a basis for the development of low-speed rotating film sprayers.

Ключові слова: плівка, експериментальний стенд, плівкоутворювач, рідина, локальна товщина, відцентровий розпорошувач.

Key words: film, experimental stand, film former, liquid, local thickness, centrifugal sprayer.

(Отримано 23 листопада 2021 р.; після доопрацювання — 9 грудня 2021 р.)

1. ВСТУП

У даний час у ряді виробництв використовуються як статичні плівкоутворювачі, так і відцентрові плівкові розпорошувачі [1–5]. Найбільшого поширення набув відцентровий плівковий розпорошувач. Даний тип розпорошувача має широку сферу застосування у харчовій, хемічній, фармацевтичній та інших галузях промисловости для тепло- та масообмінів між краплями рідини та газовою фазою в процесах розпорошувального сушіння, абсорбції, проведення міжфазних реакцій, охолодження рідин, кондиціонування газів та в інших подібних системах. Такий широкий спектр використання відцентрових плівкових розпорошувачів свідчить про високу ефективність роботи пристрою.

Висока ефективність роботи плівкових розпорошувачів залежить від параметрів плівки, що стікає з кромки розпорошувача, зокрема від швидкості руху плівки та розподілу її товщини на кромці плівкоутворювача. Однак розтікання плівки рідини під час її руху по стінці плівкоутворювача, що обертається, та розпад плівки, що стікає з кромки плівкоутворювача, а також мірювання її товщини ще недостатньо вивчено порівняно зі статичними плівкоутворювачами. Нами розроблено метод і пристрій не тільки для статичного плівкоутворювача, але і для мірювання локальних товщин плівок, що стікають з кромки плівкоутворювача плівкового відцентрового розпорошувача.

2. ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ СТЕНДІВ

На рисунку 1 показано схему одного з відомих стендів для вивчення товщини плівки, характеру формування та форми поверхні плівки за переміщення її на статичному плівкоутворювачі. Стенд включає резервуар 1 постійного рівня рідини, в днищі 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).

Для мірювання товщини плівки h застосовувався електроконтактний метод [1] (рис. 1). Голка, що переміщується мікрометром 4,

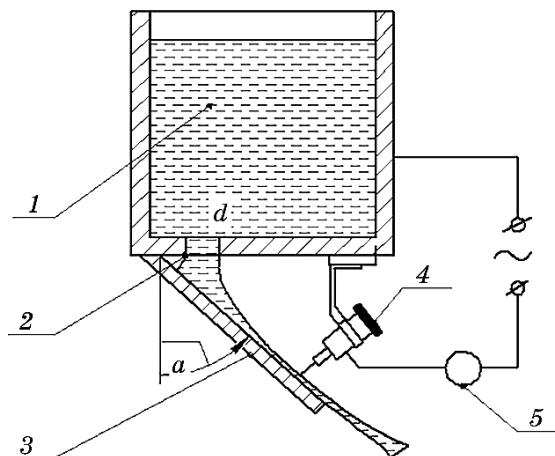


Рис. 1. Принципова схема стенда для контактних досліджень товщини рідкої плівки, а також поверхневих явищ, що відбуваються під час формування та руху рідких плівок на плоскому плівкоутворювачі.¹

в момент торкання поверхні рідини замикає електричне коло. Після перетворення струму можна виміряти не тільки середню товщину плівки, але й коливні процеси, що виникають на поверхні плівки та супроводжують процеси плівкоутворення. У дослідженнях за цією методикою рідини мають бути електропровідними, наприклад, це — звичайна вода або розчини речовин, які мають йонну провідність.

За методикою, наведеною в [1], товщина плівки на обертових плівкоутворювачах визначалася аналогічно, як це представлено на рис. 1. В силу великих відцентрових сил контактні голки у вигляді невеликого гребінця зміцнювалися на плівкоутворювачах, але через великі відцентрові сили та паразитні наведення в контактах, що труться, не з'єднувалися з електричним колом. Товщина плівки в цьому випадку визначається візуально за допомогою стробоскопічного освітлення методом реєстрації моментів торкання голками поверхні плівки, які супроводжуються виникненням пилоподібного мікрофакела в місці торкання голкою поверхні рідини.

Розглянемо деякі передумови, що використовуються в [2, 3] для обґрунтування вимірів і відповідних розрахунків. Теоретична аналіза процесу струминно-плівкового перебігу рідини на радіально розташованій пластині, що обертається, проводилася на різних моделях процесу, що спрощують завдання. Без урахування Кюріолісових сил таке завдання розглянуто у [4, 5]. Однак експериментальні дослідження та промислові випробування [2, 3] показали, що в даному випадку параметри розтікання рідкого струменя та розпорошення рідини значно відрізняються від розрахункових, зокрема одержаних у теоретичних дослідженнях [4, 5]. Поширені також оптичні, безконтактні, безперервні методи мірювання товщини плівки, які, крім складності конструкції, дають порівняно великі похибки мірювання [6–9].

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Найбільш потужні диспергатори одиничної продуктивності за рідиною, що розпорошується, за достатньо дрібнодисперсного складу розпилу — розпорошувачі, що обертаються. Головним питанням щодо вдосконалення даного типу розпорошувачів є вивчення оптимальних умов перетворення струменів рідини на тонкі плівки. Для одержання дрібнодисперсного складу розпилу на відцентровому розпорошувачі потрібно досягти якнайменшу товщину плівки на плівкоутворювачі.

Нами розроблено новий метод і пристрій мірювання локальних товщин плівок, що стікають з кромки плівкового відцентрового розпорошувача. Пропонований метод полягає в локальному улов-

люванні частини плівки або її фрагментів з подальшим накопиченням уловленої рідини у збірнику. Пропонований пристрій вказано на рис. 2. Пристрій складається з каналів плівкоутворювача 1, локального приймача рідини 2, показчика положення приймача 3, збірника рідини 4 та пристрою для точного позиціонування приймача 5.

Пропонований пристрій працює наступним чином. З кромки плівкоутворювача витікає рідина у вигляді плівки, яка на невеликій віддалі від кромки починає перетворюватися на краплі. Ці краплі мають радіальну та тангенціальну складові швидкості руху, що визначають швидкість руху плівки. Частина плівки потрапляє у приймач уловлювача рідини. Кількість крапель у середньому за один прохід плівки дорівнює об'єму плівки, яка перетворюється на краплі. Маса рідини, що вловлюється приймачем, дорівнює

$$\Delta m = \rho h s v t N,$$

де ρ — густина рідини, h — локальна товщина плівки, s — площа перерізу приймача, v — частота обертання, t — час відбору, N — кількість плівкоутворювачів на розпорозувальному диску.

Визначаючи на електронних вагах масу рідини, яка опинилася у збірнику, знаючи густину рідини, частоту обертання відцентрового розпорозувача, площу перерізу приймача, час відбору рідини та кількість плівкоутворювачів на диску, що розпорозує рідину, можна визначити середню локальну товщину плівки на кожному плівкоутворювачі:

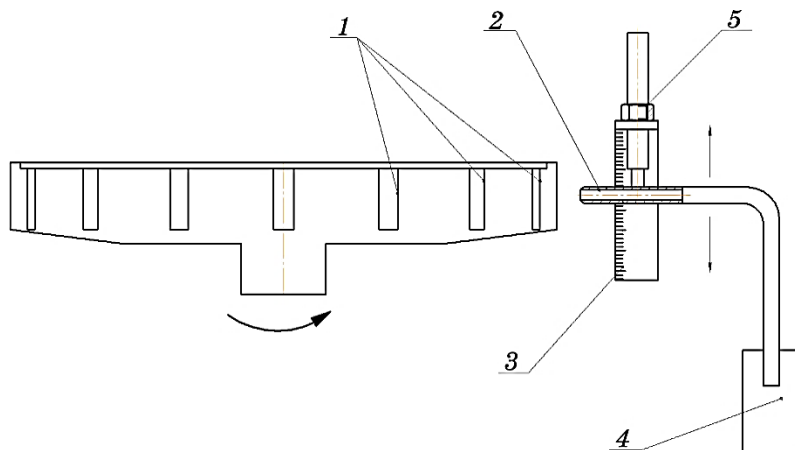


Рис. 2. Пристрій для мірювання локальних товщин плівок з плівкоутворювача відцентрового розпорозувача.²

$$h = \frac{\Delta m}{\rho s v t N}.$$

Нижче наведено приклад визначення локальних товщин плівок, що стікають з кромки плівкоутворювача відцентрового розпорощувача. Дослідження проводилися на відцентровому розпорощувачі; рідина, що розпорощується, — вода з водопроводу, температура рідини — кімнатна, частота обертання — 3000 об/хв. Точність мірянь щодо визначення локальних товщин плівок становить трохи більше 5%. У таблиці наведено значення товщини

ТАБЛИЦЯ. Значення товщини плівки залежно від положень краплеловлювача.³

Положення	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h , мкм	3,3	0,6	4,0	0,6	3,3	3,1	0,6	2,7	2,4	1,8

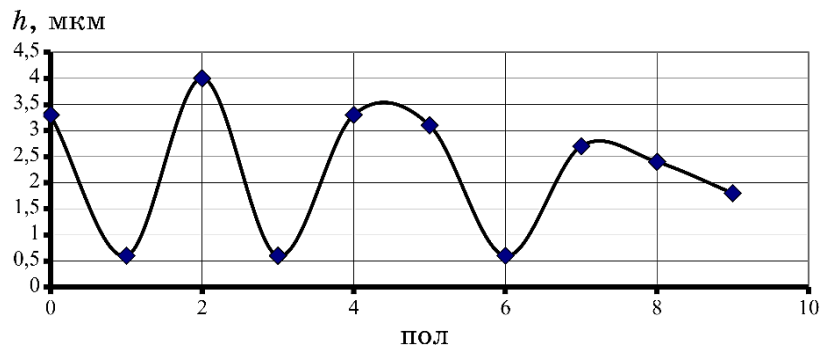


Рис. 3. Розподіл локальної товщини плівки у напрямі, перпендикулярному перебігу плівки.⁴

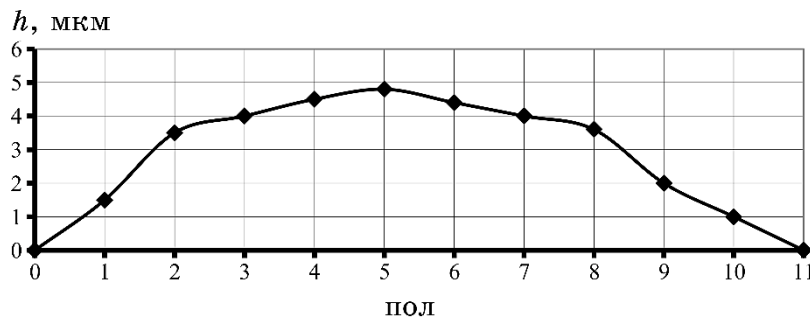


Рис. 4. Плавна зміна локальної товщини плівки у напрямку, перпендикулярному руху плівки.⁵

плівки залежно від положень краплеуловлювача. На рисунку 3 зображено розподіл товщини плівки щодо поверхні плівкоутворювача.

Як видно, величина товщини плівки є нерівномірною у перерізі, перпендикулярному швидкості руху плівки. Змінюючи входні параметри рідини на плівкоутворювачі, можна домогтися різних профілів товщини плівки, що витікає з кромки плівкоутворювача, наприклад, вказаних на рис. 4 та 5. На рисунку 4 продемонстровано плавну зміну локальної товщини плівки у напрямку, перпендикулярному перебігу плівки. На рисунку 5 вказано ідеальний розподіл локальної товщини плівки в напрямку, перпендикулярному перебігу плівки.

Одержані результати можуть бути зумовлені тим, що вода є незвичайною речовиною, і її властивості займають особливе місце серед явищ, пов'язаних із міжмолекулярними силами. Два типи «спеціальних взаємодій», — водневий зв'язок і гідрофобний ефект, — доречні для молекул води [10]. Зокрема, недавні дослідження сольватації та адсорбції у воді вуглецевих наночастинок продемонстрували, що густина рідини у молекулярно-тонкій плівці поблизу поверхні не є однорідною, а має осцилювальний профіль [11, 12]. Таким чином, на відміну від макроскопічного стану речовини, у таких плівках позиційне й орієнтаційне впорядкування молекул зумовлені не тільки взаємодією молекул рідини однієї з одною, а й значною близькістю до поверхонь [10–15]. Крім того, у рідкому стані зберігаються сильні міжмолекулярні зв'язки, які утворюються в льоді. Вони мають бути залежними від взаємної орієнтації молекул, оскільки вода вибирає тетраедричну координацію (чотири найближчі сусіди на молекулу) замість щільно пакованої (12 найближчих сусідів на молекулу).

Перелічені незвичайні властивості води вказують на те, що деякі сильні та залежні від орієнтації зв'язки включені у взаємодію між її молекулами [10]. Ці зв'язки називаються водневими.

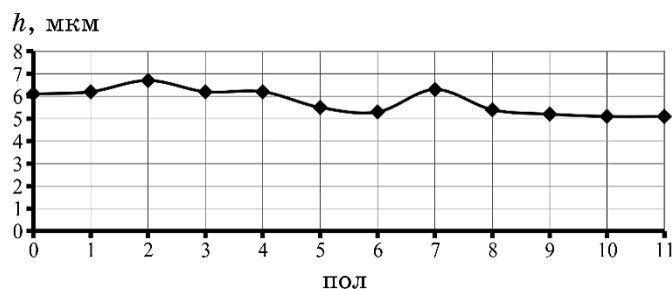


Рис. 5. Приблизно ідеальний розподіл локальної товщини плівки у напрямку, перпендикулярному до плівки.⁶

Вони відіграють особливо важливу роль у воді, оскільки кожний атом Оксигену із двома атомами Гідрогену даної молекули води можуть брати участь у чотирьох таких сполученнях з іншими молекулами — два включають її власні атоми Гідрогену, і два — неспарені електрони з атомами Гідрогену інших молекул води. Треба зазначити, що тетраедрична координація молекул води є причиною її незвичайної поведінки — більше, ніж самі по собі водневі зв'язки [10].

4. ВИСНОВКИ

З проведеного розгляду випливає, що визначення локальних значень товщини плівки необхідне для з'ясування гідродинамічної структури в конкретних умовах течії, вивчення особливостей динаміки руху тонкого рідинного шару та зміни інтенсивності тепло- та масообмінів у ньому. Продемонстровано, що локальні товщини плівки залежать від часу та густини зрошення, фізичних властивостей рідини, стану поверхні тощо. Запропоновано новий метод і пристрій для міряння локальних товщин плівок, стікаючих з кромки плівкоутворювача, що обертається, відцентрового розпорощувача, який уможливорює виміряти розподіл товщини плівки по плівкоутворювачу. Даний метод дасть змогу вивчати вплив різних параметрів на товщину плівки, а відповідно, і на дисперсність розпилу, на відміну від відомих способів для міряння локальних товщин плівки. Результати даних досліджень було використано для промислового проектування розпорощувачів рідини, які проходять випробування для подальшого впровадження в різні галузі промисловості, що, в свою чергу, дасть змогу зменшити енергозатрати.

Автори висловлюють подяку МОН України за фінансову підтримку роботи (проекти «Атомістичні та нелінійні моделі формування та тертя наносистем» та «Механізми формування та моделювання структурного стану плівок тугоплавких сполук с прогнозованими механічними характеристиками» (реєстр. № 0122U000776)).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. М. Тананайко, Е. Г. Воронцов, *Методи расчета и исследования пленочных процессов* (Київ: Техніка: 1975).
2. Л. М. Черняк, Растекание жидкой струи на вращающейся радиально расположенной пластине (лопасти), *Современные проблемы прикладной физики: Сборник научных трудов* (Київ: Министерство образования Украины: 1992), с. 212.
3. Л. А. Хохлов, *Теоретические основы химической технологии*, 15, № 3: 729 (1981).

4. N. Dombrowsky and T. L. Llogd, *Chem. Eng. Sci.*, **27**, Iss. 5: 1003 (1972); [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(72\)80015-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(72)80015-0)
5. W. R. Marshall and E. Seltzer, *Chem. Eng. Progr.*, **46**: 501 (1950).
6. И. В. Савельев, *Курс физики* (Москва: Наука: 2008).
7. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева, *Курс общей физики* (Санкт-Петербург: Лань: 2008).
8. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s1077>
9. 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_is_s3_p565p576_2020.pdf
10. J. N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces* (London: Academic Press: 1998).
11. S. R. Varanasi, O. A. Guskova, A. John, and J.-U. Sommer, *J. Chem. Phys.*, **142**: 224308 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4922322>
12. E. Di Biase and L. Sarkisov, *Carbon*, **94**: 27 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.06.056>
13. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *J. Frict. Wear*, **31**, No. 4: 308 (2010); <https://doi.org/10.3103/S1068366610040100>
14. A. V. Khomenko, D. V. Boyko, and M. V. Zakharov, *J. Frict. Wear*, **39**, No. 2: 152 (2018); <https://doi.org/10.3103/S106836661802006X>
15. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *Condens. Matter Phys.*, **9**: 695 (2006); <https://doi.org/10.5488/CMP.9.4.695>

REFERENCES

1. Yu. M. Tananaiko and E. G. Vorontsov, *Metody Raschyota i Issledovaniya Plyonochnykh Protsessov* [Methods of Calculation and Research of Film Processes] (Kiev: Tekhnika: 1975) (in Russian).
2. L. M. Chernyak, Rastekanie Zhidkoi Strui na Vrashchayushcheisya Radial'no Raspolozhennoi Plastine (Lopasti), *Sovremennyye Problemy Prikladnoi Fiziki: Sbornik Nauchnykh Trydov* (Kiev: Ministerstvo Obrazovaniya Ukrainy: 1992), p. 212 (in Russian).
3. L. A. Khokhlov, *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoy Tekhnologii*, **15**, No. 3: 729 (1981) (in Russian).
4. N. Dombrowsky and T. L. Llogd, *Chem. Eng. Sci.*, **27**, Iss. 5: 1003 (1972); [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(72\)80015-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(72)80015-0)
5. W. R. Marshall and E. Seltzer, *Chem. Eng. Progr.*, **46**: 501 (1950).
6. I. V. Savel'ev, *Kurs Fiziki* [Physics Course] (Moscow: Nauka: 2008) (in Russian).
7. S. Eh. Frish and A. V. Timoreva, *Kurs Obshchei Fiziki* [General Physics Course] (St. Petersburg: Lan': 2008) (in Russian).
8. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s1077>
9. 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_is

[s3_p565p576_2020.pdf](#)

10. J. N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces* (London: Academic Press: 1998).
11. S. R. Varanasi, O. A. Guskova, A. John, and J.-U. Sommer, *J. Chem. Phys.*, **142**: 224308 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4922322>
12. E. Di Biase and L. Sarkisov, *Carbon*, **94**: 27 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.06.056>
13. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *J. Frict. Wear*, **31**, No. 4: 308 (2010); <https://doi.org/10.3103/S1068366610040100>
14. A. V. Khomenko, D. V. Boyko, and M. V. Zakharov, *J. Frict. Wear*, **39**, No. 2: 152 (2018); <https://doi.org/10.3103/S106836661802006X>
15. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *Condens. Matter Phys.*, **9**: 695 (2006); <https://doi.org/10.5488/CMP.9.4.695>

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

¹ Fig. 1. Schematic diagram of the stand for contact studies of the thickness of the liquid film, as well as surface phenomena occurring during the formation and movement of liquid films on a flat film former.

² Fig. 2. Device for measuring local film thicknesses from centrifugal spray film former.

³ TABLE. Values of film thicknesses depending on positions of droplet catcher.

⁴ Fig. 3. Distribution of the local film thickness in the direction perpendicular to the film flow.

⁵ Fig. 4. Smooth change of local film thickness in the direction perpendicular to the movement of the film.

⁶ Fig. 5. Approximately ideal distribution of local film thickness in the direction perpendicular to the film.