

PACS numbers: 47.20.Ib, 47.27.wg, 47.61.-k, 62.20.Qp, 62.25.-g, 68.08.-p, 68.15.+e

Формування плівки рідини на статичному плівкоутворювачі

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

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

Розглянуто теоретичні засади перетворення струменя рідини в плівку на похилій площині. Одержані закономірності можуть бути використані для проєктування та виготовлення конструкцій низькоенергетичних (енергозберігаючих) інтенсивних розпоршувальних пристроїв, що служать для створення високорозвиненої поверхні контакту фаз у малогабаритних тепломасообмінних апаратах. У багатьох тепломасообмінних апаратах для одержання високорозвиненої міжфазної поверхні та підтримки високої швидкості оновлення поверхні контакту фаз використовується диспергування (розпоршення) тонких плівок рідини. Ретельне вивчення способів одержання тонких плівок з прийнятними для промисловості характеристиками та способів якісного диспергування їх за мінімального енергоспоживання не втратило свого значення і в наш час. Для низькоенергетичного (енергозберігаючого) диспергування рідини її треба спочатку перетворити в плівку за можливості мінімальної товщини, оскільки тільки в такій плівці навіть взагалі-то незначні за абсолютною величиною, викликані зовнішнім впливом, турбулентні флюктуації можуть пронизувати її наскрізь, і тим самим вони можуть зумовлювати практично миттєве, майже мимовільне диспергування (руйнування) рідкої плівки. Основне теоретичне завдання вирішення цієї проблеми — вибір таких конфігурацій плівкоутворювачів і режимів їхньої роботи, за яких сили, що діють на потік рідини і які визначають її диспергування, використовували б мінімальну кількість енергії, але одночасно найбільш ефективно діяли б на перетворення будь-якої форми рідкого струменя в тонку плівку. Нами обґрунтовано прості конструкції пристроїв для одержання плівок рівномірної товщини із необхідною для промисловості шириною. Основна ідея, закладена в принцип роботи статичного плівкоутворювача, дуже проста. Найпростіший з таких пристроїв — статичний плаский плівкоутворювач.

The theoretical foundations of converting a jet of liquid into a film on an inclined plane are considered. The obtained patterns can be used for the design and fabrication of structures of low-energy (energy-saving) intensive spray

devices, which serve to create a highly developed phase-contact surface in small-size heat–mass-exchange devices. In many heat–mass exchange apparatuses, to obtain a highly developed interfacial surface and to maintain a high rate of renewal of the phase-contact surface, dispersion (spraying) of thin liquid films is used. A thorough study of both methods for the fabrication of thin films with industry-acceptable characteristics and methods for their high-quality dispersion with minimal energy consumption has not lost its significance in our time. For the low-energy (energy-saving) dispersion of a liquid, it must first be turned into a film of the smallest possible thickness, since, only in such a film, even turbulent fluctuations insignificant in absolute value caused by external influence can penetrate it through, and thereby, they cause almost instantaneous, closed to spontaneous dispersion (destruction) of the liquid film. For the low-energy conversion of any form of the initial liquid jet into thin films of uniform thickness, it is necessary to choose such constructions of film formers, in which forces appear that ‘flatten’ a jet into a film, and for the occurrence of which, it is necessary to supply as low energy as possible. Gravitational forces and any other forces or their components, which are perpendicular to the velocity of fluid flow, are low-energy-consuming ‘free’ forces. According to the definition of work, forces directed perpendicular to the speed of movement of the body do not perform mechanical work, but they can most actively influence the processes of formation of thin films. Among such forces in rotating nozzles, the main role is assigned, as we shall see, to the Coriolis forces and forces arising from the components of centrifugal inertia forces. The main theoretical task of solving this problem is the choice of such film-forming configurations and their operating modes, under which the forces acting on the fluid flow and which determine the dispersion of the liquid, would use the minimum amount of energy, but, at the same time, would most effectively influence the conversion of any form of a liquid jet into a thin film. We have justified the simple design of devices for the fabrication of films of uniform thickness at the required width for the industry. The basic idea underlying the principle of operation of a static film former is very simple. The simplest of these devices is a static flat-film former.

Ключові слова: рідина, плівка, струмінь, диспергування, плівкоутворювач, турбулентність.

Key words: liquid, film, jet, dispersion, film former, turbulence.

(Отримано 11 січня 2020 р.; після доопрацювання — 8 лютого 2020 р.)

1. ВСТУП

Основою успішної роботи будь-яких технологічних тепломасообмінних процесів, явищ перенесення тепла та маси є одержання високорозвиненої поверхні контакту фаз, а також створення та підтримка умов для збереження максимальної швидкості оновлення цієї поверхні упродовж всього часу взаємодії фаз [1, 2]. У багатьох

тепломасообмінних апаратах для одержання високорозвиненої міжфазної поверхні та підтримки високої швидкості оновлення поверхні контакту фаз використовується диспергування (розпорошування) тонких плівок рідини [2].

Чому саме йдеться мова про тонкі плівки? Для відповіді на це запитання проаналізуємо основні процеси, які супроводжують перетворення рідини в краплі.

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 в диспергованому каплеподібному стані.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для однозначності подальших міркувань введемо позначення основних параметрів, що характеризують розглядувані процеси. Об'ємна витрата рідини Q [м³/с], що тече у вигляді плівки, дорівнює [3–7]

$$Q = u_s b h ,$$

де u_s — середня швидкість плівки рідини щодо плівкоутворювача через нормальний переріз [м/с], b — ширина плівки [м]; h — товщина плівки [м]. Мінімальна потужність N_K , яку необхідно надати рідині для переміщення її через диспергувальний пристрій, дорівнює кінетичній енергії, що витрачається в одиницю часу на переміщення рідини до крамок розпорошувача [3–7]:

$$N_K = \frac{1}{2} \rho Q u^2 = \frac{1}{2} \rho b h u_s u^2 .$$

Тут ρ — густина рідини [кг/м³], u — абсолютна швидкість рідини в момент сходу її з крамок розпорошувача [м/с]. Після сходу рідини з крамок розпорошувача їй додатково потрібно надати енергію для процесу розпорошення, мінімум якої дорівнює Гельмгольцовій вільній енергії, необхідній для створення загальної площі поверхні, утвореної краплями рідини, і для взаємної турбулізації потоків контактувальних фаз. Потужність N_F , що витрачається на створення вільної поверхні рідини, за законом збереження енергії [8–11] дорівнює

$$N_F = \frac{6 \sigma Q}{d_K} ,$$

де σ — коефіцієнт поверхневого натягу рідини [Дж/м²], d_K — середній діаметер крапель рідини [м]. Коефіцієнт корисної дії η будь-

якого диспергатора рідини дорівнює відношенню корисної частини енергії, тобто енергії, що витрачається для створення поверхні контакту і на турбулізацію фаз, до всієї енергії, що витрачається:

$$\eta = \frac{N_p}{N_D},$$

де N_p — корисна потужність, N_D — уся (повна) потужність, що витрачається на роботу диспергатора.

Повна потужність, незалежно від типу конструкції розпорошувача, складається з потужности N_L , що витрачається на транспортування рідини до самого виходу її з розпорошувача, та N_T — потужности, що витрачається на всілякі втрати через тертя (в трубах, механізмах і т. ін.). До цих складових необхідно додати N_{turb} — потужність, яка необхідна для перетворення рідини в метастабільний стан, і N_F — потужність, яка безпосередньо витрачається на збільшення поверхні контакту фаз.

Зменшувати енергію при диспергуванні рідини можна за рахунок складових енергії N_L , N_{turb} і в незначній мірі за рахунок N_T . Теоретично складову N_L можна зменшувати до зовсім малих значень. Для цього треба зменшувати складові швидкостей u і u_s рідини. Диспергатори з таким способом розпорошення рідини є — це електричні й ультразвукові диспергатори [2, 4, 5]. Швидкість переміщення рідини у них не відіграє істотної ролі. Тому витрати енергії необхідні тільки для подачі рідини до місця розпорошення, а це — взагалі-то незначна величина. Одночасно в таких розпорошувачах витрачається незначна кількість енергії і на турбулентну складову повної потужности N_{turb} .

Поверхня контакту фаз, утворена краплями розпорошеної рідини, обернено пропорційна середньому розміру крапель [2, 9, 12]. У свою чергу, під час розпорошування плівок рідини середній діаметер крапель пропорційний товщині h розпорошуваної плівки рідини [13, 14]. Тому для здійснення низькоенергетичного високоякісного та великотоннажного промислового контактного розпорошувального тепломасообміну необхідно одержувати в потрібній кількості та з найменшими витратами енергії стійкі рідинні плівки необхідної та стабільної товщини і за можливості ширші. З цих міркувань випливає, що ретельне вивчення способів одержання тонких плівок із прийнятними для промисловості характеристиками та способів якісного диспергування їх за мінімального енергоспоживання не втратило свого значення і в наш час.

3. РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОБЛЕМИ

Для обґрунтування шляхів вирішення поставленої проблеми необ-

хідно скористатися знанням фізичних властивостей рідин і відповідними гіпотезами. Вперше на цю проблему звернув увагу Ж. Буссінеск [10, 11, 15–19]. За його прогностичним уявленням рідина складається з окремих мікрооб’ємів, між якими є порожнечі (дірки). Турбулентний стан руху рідини зумовлено передачею енергії не всією рідиною, а окремими об’ємами всередині рідини. Із використанням поняття флюктуацій турбулентність пов’язана з виникненням флюктуацій швидкостей, густин (концентрації частинок), розмірів структурних елементів рідини і т. ін. За сучасними уявленнями первинні пульсації швидкостей можуть мати масштаб, який максимально допустимий для даного способу руху рідини.

Гіпотези Буссінеска надалі розвинули Рейнольдс, Прандтль, Ландау, Левич та інші [10, 11, 15–19].

Зокрема, Ландау та Левич висунули гіпотези, які дали можливість в деяких випадках одержати кількісні вирази для основних флюктувальних величин — лінійних розмірів пульсацій і пульсацій швидкостей. Сутність цих передумов, модифікованих нами для випадку руху рідини по твердій пластині — плівкоутворювачу, полягає в наступному.

При русі легкоплинних рідин (рідин типу води) як у ламінарному, так і в турбулентному режимах у місцях зіткнення рідини з твердою поверхнею утворюється межовий шар [9, 15, 20–22]. На відміну від ламінарного режиму при турбулентному режимі руху рідини цей тонкий межовий шар рідини вже не є ламінарним — в ньому навіть поблизу самої твердої поверхні починають виникати турбулентні пульсації швидкості Δu , які передаються сусіднім об’ємам рідини на певну віддаль L [9, 10, 15]. У разі, коли плівка має незначну товщину, флюктуації поширюються від твердої поверхні до вільної поверхні рідини. У результаті таких процесів кінематична та динамічна в’язкості рідин мають інші значення, ніж в разі ламінарного руху. Позначимо коефіцієнти в’язкості в цьому випадку через ν_{turb} [м²/с] і μ_{turb} [Па·с].

Величини турбулентної кінематичної в’язкості ν_{turb} і турбулентної динамічної в’язкості μ_{turb} можуть бути визначені з припущення, що енергія, яка надається рідині, витрачається в основному на збудження великомасштабних лінійних флюктуацій. Такі розрахунки наведено в [15]:

$$\nu_{turb} \cong \Delta u L = \frac{\partial u}{\partial L} L L, \quad \nu_{turb} = \alpha \frac{\partial u}{\partial L} L^2, \quad \mu_{turb} = \rho \nu_{turb}.$$

Механічне турбулентне напруження тертя τ_{turb} визначається стандартним способом за Ньютоновим законом в’язкого тертя [6–8, 18]. В цьому випадку градієнт швидкості береться рівним відношенню зміни швидкості на віддалі лінійного розміру флюктуації до розміру флюктуації:

$$\tau_{turb} = \frac{F}{S} = \mu_{turb} \left(\frac{\Delta u}{L} \right) = \alpha \rho L^2 \left(\frac{\partial u}{\partial L} \right)^2.$$

З цих припущень знаходиться величина флюктуації v_0 швидкості:

$$v_0 = \sqrt{\frac{\tau_{turb}}{\rho \alpha}}.$$

Тут L — лінійний розмір (масштаб) флюктуацій, α — коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу енергії між лінійними флюктуаціями ($\alpha = 0,17$ [9]). Під L у турбулентному режимі в разі руху тонкої рідкої плівки по плівкоутворювачу з великим наближенням до істинної картини можна прийняти товщину h тонкої плівки. З цих рівнянь випливає, що чим менше товщина h плівки рідини, тим сильніші відносні флюктуації швидкості та відповідні турбулентні напруження виникають у ній.

Виникнення описаних процесів у плівках зумовлює порівняльну легкість розриву суцільної тонкої плівки рідини, тобто її дроблення (диспергування). І що не менш важливе, що виникаючі турбулентні напруження збуджують все більш великомасштабні флюктуації не тільки середньої швидкості, але й просторові флюктуації концентрації частинок, що супроводжуються утворенням додаткової кількості флюктувальних пустот — дірок. Виникаючі дірки, як і будь-які порушення структури рідини, незалежно від походження їх під впливом турбулентного напруження збільшуються до мікрокаверн, порожнин, які пронизують всю товщу плівки. Саме такі процеси переводять рідину в метастабільний стан. Але для збудження великомасштабних пульсацій необхідно затратити енергію. Як відомо [6–8], енергія в одиниці об'єму рідини або газу визначає напруження, що виникає в них (зокрема тиск). У свою чергу, квадратами абсолютних величин лінійних розмірів флюктуацій швидкості визначається енергоспоживання [6, 7, 15]. Звідси випливає висновок про те, що для енергозбереження при диспергуванні рідин необхідно використовувати такі види руху та перетворення потоків рідин, в яких абсолютні максимальні розміри пульсацій були б мінімальними. А це, на підставі попередніх міркувань, можливе тільки в тонких плівках.

Як відомо, рідина за своєю структурою проявляє властивості кристалічних тіл [1, 6, 8, 9, 17, 20–23]. З теорії руйнування [10, 24] відомо, що будь-яка деформація після певного граничного критичного значення відбувається мимовільно майже без енергоспоживання. Оскільки рідина проявляє кристалічні властивості, то такі процеси мимовільного руйнування мають відбуватися не тільки в твердих тілах, але і в рідині. Це означає, що після приведення рідини в метастабільний стан, коли турбулентні пульсації виклика-

ють напруження вище меж міцності рідини [14, 15], рідина має мимоволі руйнуватися з дуже великою швидкістю і за надзвичайно невеликі проміжки часу.

Ці міркування показують, що для низькоенергетичного подрібнення рідини її спочатку треба перетворити в плівку за можливості мінімальної товщини h . Саме в такій плівці навіть взагалі-то невеликі за абсолютною величиною будь-які флюктуації можуть пронизувати її наскрізь, тобто вони стають більше критичних і тому зумовлюють практично миттєве руйнування плівки. Для енергозберігаючого перетворення будь-якого за формою первісного струменя рідини в тонкі плівки рівномірної товщини необхідно вибрати такі конструкції плівкоперетворення, в яких би виникали сили, що деформують товстий струмінь у плівку при витраті мінімальної кількості енергії. Малоенергомісткими, «даровими» силами є гравітаційні сили і будь-які інші сили або їхні складові, які спрямовані перпендикулярно швидкості руху і тому не виконують механічну роботу, але найсильнішим чином можуть впливати на процеси формування плівок. Серед таких сил, крім гравітаційних, основна роль відводиться Коріолісовим силам і складовим відцентрових сил інерції, які виявляються в обертових розпорошувачах.

4. РОЗТКАННЯ РІДИНИ НА СТАТИЧНОМУ ПЛІВКОУТВОРЮВАЧІ

Теорія розткання рідини розроблялася багатьма (див. наприклад [7, 18]). Після вивчення цих та інших робіт нами було обґрунтовано прості конструкції пристроїв для одержання плівок рівномірної товщини за потрібної для промисловості ширини. Найпростіший з таких пристроїв — статичний плаский плівкоутворювач. Головні елементи конструкції плаского статичного плівкоутворювача показано на рис. 1 [25].

Основна ідея, закладена в конструкцію та принцип роботи статичного плівкоутворювача, є простою [25–28]. Нехай кілька струменів рідини круглого, квадратного або багатокутнього перерізу вільно витікає вертикально вниз з отворів у горизонтальній пласкій плиті 1, що є основою для збірника рідини. Струмені без відбивання потрапляють на поверхню пласкої нерухомої пластини 2, встановленої під кутом до вертикалі, як показано на рис. 1. Пластина 2 є статичним плівкоутворювачем. Перетворення струменя в тонку плівку на ньому відбувається таким способом. Кожен струмінь падає на похилу пластину 2 і розтікається в різні боки. Первісна стадія перетворення окремого струменя в плівку є складною. Але після невеликої ділянки руху поверхня одиночної плівки стабілізується, а її поверхня стає практично паралельною поверхні пластини. На деякій віддалі окремі рідкі плівки зливаються в суцільну (перетин С–С на рис.

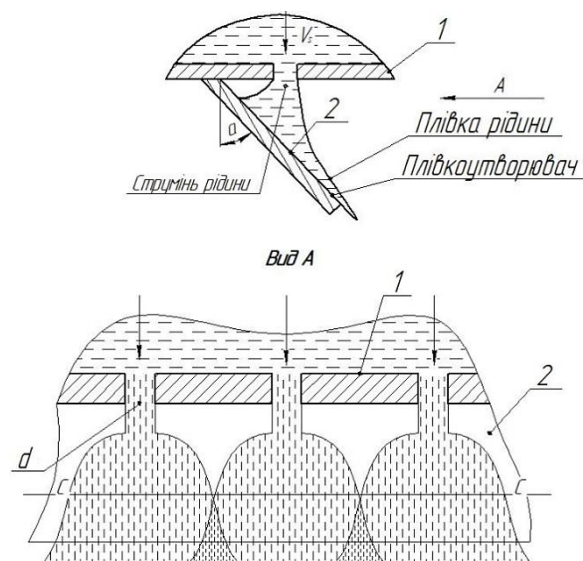


Рис. 1. Головні елементи конструкції плоского статичного плівкоутворювача.¹

1, вид А). Рухаючись далі вниз від перетину $C-C$, плівка додатково стабілізується (параметри її руху усереднюються), і суцільна плівка порівняно постійної товщини стікає з краєк плівкоутворювача. Схему для розрахунку параметрів одиночної плівки, що формується на статичному плівкоутворювачі, показано на рис. 2.

Побудуємо нерухому прямокутну систему координат так, щоб площина XOY збігалася з поверхнею пластини плівкоутворювача. Помістимо початок координат у точку перетину осі струменя з поверхнею плівкоутворювача. Додатній напрямок осі OX виберемо вниз по ходу основного потоку рідини. Вісь OY розташуємо перпендикулярно осі OX , як показано на рис. 2, а вісь OZ у такому випадку є нормальна до площини плівкоутворювача. Нехай для конкретності струмінь рідини — круглого перерізу, радіус якого $R = d/2$.

Особливість формування плівки рідини на плоскій пластині полягає в тому, що із направленням струменя по нормалі до поверхні пластини ($\alpha = 90^\circ$) вона розтікається симетрично на всі боки від точки падіння. А в разі руху під кутом $\alpha < 90^\circ$ вона відносно поверхні пластинки розтікається симетрично щодо площини XOZ , що підтверджується прямими спостереженнями і міряннями (рис. 1, 2).

В разі вільного руху струменя легкоплинних рідин, близьких за властивостями до води, зі швидкістю у 1–4 м/с і за початкової товщини плівки порядку від 5 до 20 мм, $Re = uh/v$ більше 2500, тобто навіть формально режим руху має бути явно турбулентним. Та й у точках зіткнення струменя та плівкоутворювача рідкий потік без-

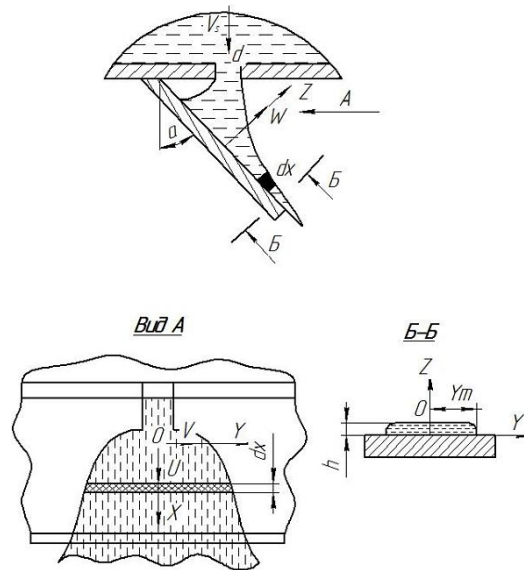


Рис. 2. Схема для розрахунку параметрів одиночної плівки, що формується на статичному плівкоутворювачі.²

перервно та максимально турбулізується. Однак після порівняно невеликої стабілізаційної ділянки, коли товщина плівки істотно зменшується, попервах турбулентні пульсації згасають, і рух переходить у рівномірно-турбулентний (ізотропно-турбулентний).

Такі режими руху потоку рідини описуються рівняннями, у яких, відповідно до основних гіпотез Рейнольдса, Буссінеска, Прандтля, Капиці, Кишиневського та ін. [8, 15, 16, 18], під швидкістю елемента рідини розуміють швидкість, усереднену по турбулентним пульсаціям швидкості (динамічну швидкість).

5. ВИСНОВКИ

Розглянуто теоретичні основи перетворення струменя рідини в плівку.

Розроблено схему для розрахунку параметрів одиночної плівки, що формується на статичному плівкоутворювачі.

Дані результати дають можливість розробити прості пристрої для одержання рівномірної товщини за необхідної для промисловости ширини та з мінімальними енерговитратами.

Автори висловлюють подяку МОН України за фінансову підтримку роботи (проект №0118U003584 «Атомістичне та статистичне представлення формування та тертя нанорозмірних систем»).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. Н. Стабников, *Изв. вузов СССР. Пищевая технология*, **6**: 100 (1968).
2. Д. Г. Пажи, А. А. Корягин, Э. Л. Ламм, *Распыливающие устройства в химической промышленности* (Москва: Химия: 1975).
3. Л. А. Вулис, В. П. Кашкаров, *Теория струй вязкой жидкости* (Москва: Наука: 1965).
4. Д. Г. Пажи, В. С. Галустов, *Основы техники распыливания жидкостей* (Москва: Химия: 1984).
5. Д. Г. Пажи, А. М. Прахов, *Химическое и нефтехимическое машиностроение*, **2**: 10 (1969).
6. И. В. Савельев, *Курс физики* (Москва: Наука: 2008), т. 1.
7. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева, *Курс общей физики* (Санкт-Петербург: Лань: 2008), т. 1.
8. Б. Т. Емцев, *Техническая гидромеханика* (Москва: Машиностроение: 1978).
9. А. Г. Касаткин, *Основные процессы и аппараты химической технологии* (Москва: Химия: 1971).
10. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Механика сплошных сред* (Москва: ГТИ: 1954).
11. В. Г. Левич, *Курс теоретической физики* (Москва: Физматиз: 1962), т. 1, 2.
12. В. М. Рамм, *Абсорбция газов* (Москва: Химия: 1976).
13. Бай Ши-и, *Теория струй* (Москва: ГИФМЛ: 1960).
14. М. Корнфельд, *Упругость и прочность жидкостей* (Москва–Ленинград: ГИТТЛ: 1951).
15. В. Г. Левич, *Физико-химическая гидродинамика* (Москва: АН СССР: 1952).
16. Л. Прандтль, Т. Карман, *Проблемы турбулентности* (Москва: ОНТИ: 1936).
17. Г. И. Тейлор, *Проблемы турбулентности* (Москва: ОНТИ: 1936).
18. У. Фрост, Т. Моулден, *Турбулентность, принципы и применения* (Москва: Мир: 1980).
19. И. О. Хинце, *Турбулентность* (Москва: Физматиз: 1963).
20. А. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *J. Frict. Wear*, **31**, No. 4: 308 (2010); <https://doi.org/10.3103/S1068366610040100>.
21. А. V. Khomenko and N. V. Prodanov, *J. Phys. Chem. C*, **114**, No. 47: 19958 (2010); <https://doi.org/10.1021/jp108981e>.
22. 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>.
23. Ю. М. Тананайко, Е. Г. Воронцов, *Методы расчета и исследования пленочных процессов* (Киев: Техника: 1975).
24. Я. И. Френкель, *Кинетическая теория жидкости* (Ленинград: Наука: 1975).
25. Л. М. Черняк, П. Е. Сущенко, В. И. Зимогляд, *Массообменный аппарат*, (А.С. СССР №8344980: 1977).
26. Л. М. Черняк, *Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по доводке и внедрению системы ППКА для улавливания содовой пыли на Крымском содовом заводе*. Отчёт НИР № 01860071895 (Сумы: СФТИ: 1988).
27. Л. М. Черняк, Г. Н. Ворошилов, В. Г. Ярошенко, Ю. А. Зимак, *Массообменный аппарат* (А.С. СССР №1075485: 1984).
28. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s107>.

REFERENCES

1. V. N. Stabnikov, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Pishchevaya Tekhnologiya*, **6**: 100 (1968) (in Russian).
2. D. G. Pazhi, A. A. Koryagin, and Eh. L. Lamm, *Raspylivayushchie Ustroistva v Khimicheskoy Promyshlennosti* [Spraying Devices in the Chemical Industry] (Moscow: Khimiya: 1975) (in Russian).
3. L. A. Vulis and V. P. Kashkarov, *Teoriya Struy Vязkoy Zhidkosti* [Theory of Viscous Fluid Jets] (Moscow: Nauka: 1965) (in Russian).
4. D. G. Pazhi and V. S. Galustov, *Osnovy Tekhniki Raspylivaniya Zhidkostey* [Basics of Spraying Liquids] (Moscow: Khimiya: 1984) (in Russian).
5. D. G. Pazhi and A. M. Prakhov, *Khimicheskoye i Neftekhimicheskoye Mashinostroenie*, **2**: 10 (1969) (in Russian).
6. I. V. Savel'ev, *Kurs Fiziki* [Physics Course] (Moscow: Nauka: 2008), vol. **1** (in Russian).
7. S. Eh. Frish and A. V. Timoreva, *Kurs Obshchey Fiziki* [General Physics Course] (St. Petersburg: Lan': 2008), vol. **1** (in Russian).
8. B. T. Emtsev, *Tekhnicheskaya Gidromekhanika* [Technical Hydromechanics] (Moscow: Mashinostroenie: 1978) (in Russian).
9. A. G. Kasatkin, *Osnovnyye Protsessy i Apparaty Khimicheskoy Tekhnologii* [Basic Processes and Apparatuses of Chemical Technology] (Moscow: Khimiya: 1971) (in Russian).
10. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Mekhanika Sploshnykh Sred* [Mechanics of Continua] (Moscow: GTI: 1954) (in Russian).
11. V. G. Levich, *Kurs Teoreticheskoy Fiziki* [Course of Theoretical Physics] (Moscow: Fizmatiz: 1962), vol. **1**, **2** (in Russian).
12. V. M. Ramm, *Absorbtsiya Gazov* [Gas Absorption] (Moscow: Khimiya: 1976) (in Russian).
13. Shih-I Pai, *Teoriya Struy* [Fluid Dynamics of Jets] (Moscow: GIFML: 1960) (in Russian).
14. M. Kornfeld, *Uprugost' i Prochnost' Zhidkostey* [Elasticity and Strength of Liquids] (Moscow–Leningrad: GITTL: 1951) (in Russian).
15. V. G. Levich, *Fiziko-Khimicheskaya Gidrodinamika* [Physical and Chemical Hydrodynamics] (Moscow: AN SSSR: 1952) (in Russian).
16. L. Prandtl and T. von Kármán, *Problemy Turbulentnosti* [Turbulence Problems] (Moscow: ONTI: 1936) (Russian translation).
17. G. I. Taylor, *Problemy Turbulentnosti* [Turbulence Problems] (Moscow: ONTI: 1936) (Russian translation).
18. W. Frost and T. H. Moulden, *Turbulentnost': Printsipy i Primeneniya* [Turbulence, Principles and Applications] (Moscow: Mir: 1980) (Russian translation).
19. J. O. Hinze, *Turbulentnost'* [Turbulence] (Moscow: Fizmatiz: 1963) (Russian translation).
20. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *J. Frict. Wear*, **31**, No. 4: 308 (2010); <https://doi.org/10.3103/S1068366610040100>.
21. A. V. Khomenko and N. V. Prodanov, *J. Phys. Chem. C*, **114**, No. 47: 19958 (2010); <https://doi.org/10.1021/jp108981e>.
22. 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>.

23. 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).
24. Ya. I. Frenkel', *Kineticheskaya Teoriya Zhidkosti* [Kinetic Fluid Theory] (Leningrad: Nauka: 1975) (in Russian).
25. L. M. Chernyak, P. E. Sushchenko, and V. I. Zimoglyad, *Massoobmennyy Apparat* [Mass Transfer Apparatus] (Authors' Certificate SSSR No. 8344980 (1977)) (in Russian).
26. L. M. Chernyak, *Nauchno-Issledovatel'skie i Opytno-Konstruktorskie Raboty po Dovidke i Vnedreniyu Sistemy PPKA dlya Ulavlivaniya Sodovoy Pyli na Krymskom Sodovom Zavode* [Research and Development Works on the Refinement and Implementation of the PACA System for Collecting Soda Dust at the Crimean Soda Plant] (Research Report No. 01860071895 (Sumy: SFTI: 1988)) (in Russian).
27. L. M. Chernyak, G. N. Voroshilov, V. G. Yaroshenko, and Yu. A. Zimak, *Massoobmennyy Apparat* [Mass Transfer Apparatus] (Authors' Certificate SSSR No. 1075485 (1984)) (in Russian).
28. P. Trofimenko and M. Naida, *Int. Appl. Mech.*, **53**, No. 1: 116 (2017); <https://doi.org/10.1007/s107>.

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

¹ Fig. 1. The main structural elements of flat static film former.

² Fig. 2. Scheme for calculating the parameters of a single film formed on a static film former.