

УДК 532.5

Лептюхов І.І., аспірант, кафедра теплотехніки та енергозбереження, ІЕЕ

МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ПЛІВКИ РІДИНИ ГЛАДКОЮ ПОВЕРХНЕЮ НА БАЗІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Робота стосується CFD-моделювання в'язкісно-гравітаційної плівкової течії рідини на твердій поверхні з кутом нахилу 90° , за основу якого взято експериментальні дослідження. Моделювання проведено в програмному пакеті ANSYS з використанням вбудованих програм Fluent і CFD-Post. Отримано значення відсотку змоченої поверхні, яке порівнюється з експериментальними даними.

Спираючись на експериментальні дані потоку плівкової течії декількох авторів, виконано аналіз, пов'язаний з визначенням основних параметрів, що впливають на плівковий потік.

Результати моделювання зведено в табличну форму та проаналізовано. Отримані висновки свідчать про необхідність подальшого дослідження процесу гравітаційно-в'язкої плівкової течії рідини гладкою поверхнею з крайовим кутом змочування.

Ключові слова: плівкова течія, крайовий кут змочування, в'язкісно-гравітаційний потік, CFD-моделювання.

The work concerns CFD-modeling of viscous-gravitational film flow of a liquid on a solid surface with an angle of inclination of 90° , which is based on experimental studies. The simulation was performed in the ANSYS software package using the built-in Fluent and CFD-Post programs. The value of the percentage of wetted surface is obtained, which is compared with the experimental data.

Based on the experimental data of the film flow of several authors, the analysis was performed to determine the main parameters that affect the film flow.

The simulation results are summarized in tabular form and analyzed. The obtained conclusions indicate the need for further study of the process of gravitational-viscous film flow of a liquid with a smooth surface with a contact angle.

Keywords: film flow, contact angle, viscosity-gravity flow, CFD modeling.

Вступ

Спираючись на інформаційні технології, простіше, ефективніше та дешевше провести аналіз апарату за допомоги комп'ютерної моделі, не виконуючи його попереднього конструювання. Сучасне програмне забезпечення дозволяє створити моделі, які максимально наближені до реальності. Теоретичні спроби опису даного виду потоку були зроблені Хоблером [1-5], Хартлі [6], Трела [7, 8] та іншими дослідниками в даній галузі. Дана робота є продовженням попередніх робіт авторів [9] у напрямку CFD-моделювання плівкової течії рідини.

Мета роботи:

Моделювання потоку плівки рідини гладкою поверхнею на базі експериментальних досліджень, порівняння результатів та отримання стандартного набору вхідних даних для подальшого моделювання з крайовим кутом змочування.

Проведене дослідження має вивчити вплив яких саме параметрів має найбільший вклад

у розвиток в'язкісно-гравітаційного потоку плівки рідини. Використовуючи CFD-моделювання було виконано перевірку вбудованої теоретичної моделі у ANSYS. Модель порівнювалася з експериментальними даними [10] за допомоги відсотку змоченої поверхні установки. Дослідження проводиться з геометричною моделлю, яка представлена у вигляді каналу прямокутної форми. Отримані результати, які представляють собою аналіз експериментальних даних, було проаналізовано та визначено, які ж з фізичних параметрів мають найбільший вплив на в'язкісно-гравітаційний потік.

Матеріал і результати досліджень

Автор [10], з результатами публікації якого було проведено порівняння розробив модель для імітації руху водяної плівки по твердому тілу. Порівняння моделі плівки також проводилося з експериментальним вимірюванням товщини плівки, швидкості руху та масової витрати рідини. Отримано залежності для визначення товщини (1) та швидкості руху плівки рідини (2):

$$\delta = \left(\frac{3\nu^2}{g \sin \theta_{inc}} \right)^{1/3} Re_f^{1/3} \quad (1)$$

$$U = \left(\frac{\nu g \sin \theta_{inc}}{3} \right)^{1/3} Re_f^{2/3} \quad (2)$$

де: ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості води, м²/с;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 θ_{inc} – кут нахилу установки.

Експеримент виконувався з різними значеннями витрати рідини та з двома варіантами кута нахилу потоку до горизонту.

Основні параметри експериментального стенду можна побачити у табл. 1

Таблиця 1 – Основні параметри експериментальної установки за [10]

Розміри моделі	610 мм – ширина; 1220 мм – довжина
Матеріал стінки	Акрил
Середній кут змочування	75°
Нахил стінки	5° та 90°
Витрата рідини	50, 150, 200, 400 г/м/с
Ширина щілини входу рідини	1 мм

На основі даних параметрів було побудовано 3D модель установки у програмному комплексі ANSYS Fluent, сітку якої зображено на рис. 1.

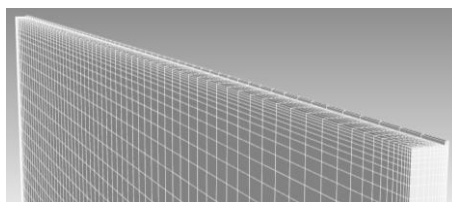


Рисунок 1 – Загальний вигляд розрахункової сітки моделі

Для проведення моделювання було обрано 2 варіанти вхідних даних: кут нахилу моделі – 90° з витратами 150 г/м/с та 400 г/м/с. Решта параметрів аналогічні тим, що вказані у табл.

1.

Результати експерименту

На рис. 2 зображено результати моделі автора (e-f) у порівнянні з експериментом (a-d).

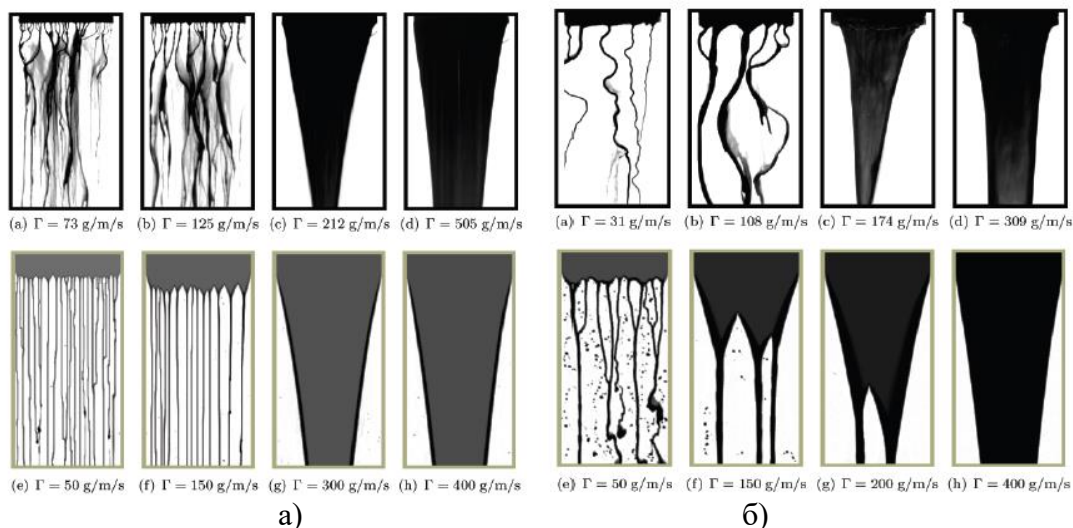


Рисунок 2 – Порівняння результатів моделювання з експериментом
а) нахил моделі 90°; б) нахил моделі 5°

Як видно з рис. 1, змочена поверхня відображена чорним кольором, а суха – білим. При малих витратах у обох випадках спостерігається часткове змочування поверхні, спричинене струмковим потоком. Через збільшення масової витрати до критичної точки та подальше її зростання поверхня стає змоченою. Перехід від струмкового потоку до нерозривного потоку плівки відбувається між 108 г/м/с та 174 г/м/с (рис. 2б), і 125 г/м/с та 212 г/м/с (рис. 2а).

Результати моделювання

На рис. 3 зображено результати моделювання у програмному комплексі ANSYS Fluent.

Для якісної перевірки результатів порівняно результати моделювання з даними експерименту за допомогою відсотка змоченої поверхні рідиною. Результати зведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння даних моделювання з результатами автора [10]

Витрата, г/м/с	Модел ь [10]	Експеримент [10]	Модел ь
400	73%	69%	75,1%
150	18%	29%	28,2%

Похибки відносно експерименту – 2,8% та 8,8% для витрати 150 г/м/с та 400 г/м/с відповідно.

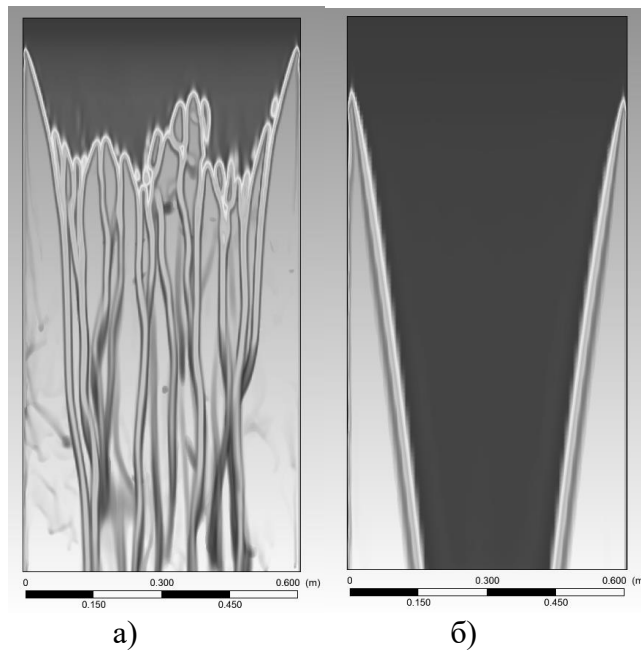


Рисунок 3 – Результати моделювання у ANSYS Fluent за різної витрати
а) 150 г/м/с; б) 400 г/м/с

Кут змочування

Автор у своїй роботі [10] не змінював кут змочування поверхні рідиною, який відіграє важливу роль у розтіканні рідини по поверхні на ряду з коефіцієнтом шорсткості поверхні.

Математична модель для даного параметру має значну вагу для подальшої роботи.

Оглянувши публікації не було знайдено моделей, але ряд науковців проводили експериментальні дослідження [11] [12] [13]. Вищезгадані автори також займались дослідженням $\Gamma_{\min}$ [кг/м/с] – критичної густини змочування, яка в свою чергу є також важливим параметром при проектуванні плівкових апаратів. Дана величина характеризує певну мінімальну масову витрату рідини, при якій буде відбуватися розрив плівки. Як видно з рис. 4а, було виконано дослідження, пов'язане з визначенням

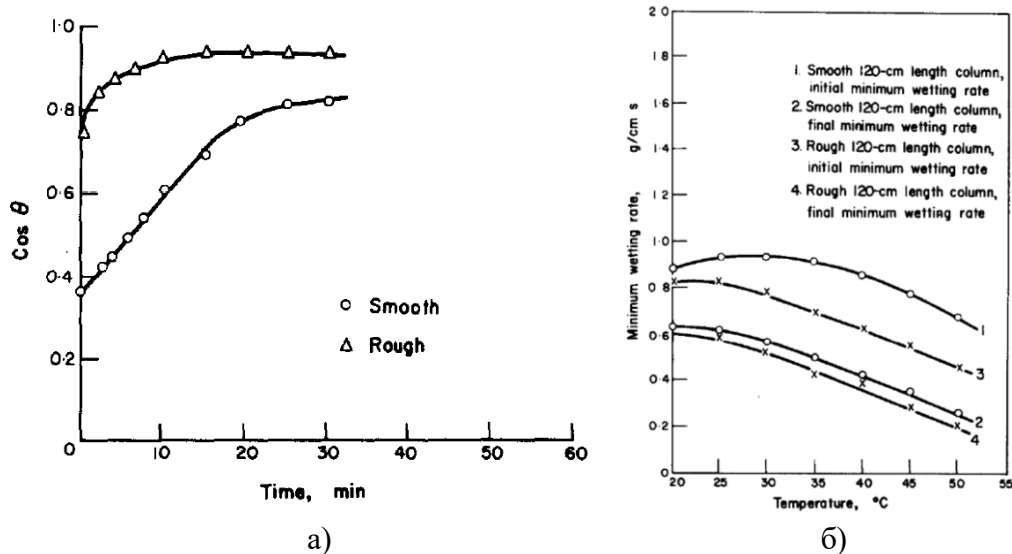


Рисунок 4 – Експериментальні дані кута (а) та критичної густини (б) змочування [11]
кута змочування сталльної пластини водою при шорсткій та гладкій поверхні. Спостерігається

зміна кута змочування у часі. Заміри виконувались за температури 20°C.

На рисунку 4б зображено залежність величини критичної густини змочування від температури плівки на гладкій та шорсткій поверхні.

Автор у своїй публікації [13] виконав огляд математичних моделей які були отримані різними вченими для параметру критичної густини змочування. Усі рівняння зведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Критична густина змочування

Workers	Equation		Basis of derivation of the Equation	Applicability
Hartley and Murgatroyd ³⁾	$\Gamma/\mu=0.803 (\rho\sigma^3/\mu^4g)^{0.2}$	(1)	Minimum total energy rate, theoretical	Case I, II
Ponter, Davies, Ross and Thornley ⁴⁾	$\Gamma/\mu=1.116 (1-\cos \theta)^{0.6} (\rho\sigma^3/\mu^4g)^{0.2}$	(2)	Momentum balance, theoretical	Case I, II
Hobler and Czajka ⁴⁾	$4\Gamma/\mu=0.6513 (1-\cos \theta)^{0.6} (\rho\sigma^3/\mu^4g)^{0.325}(\sin \beta)^{2/3}$	(3)	Correlation of experimental data, semitheoretical	Case II
Iijima and Kuzuoka ⁵⁾	$m\rho^2/\mu^{0.4}=0.11 \log(\sigma/7.0)$ [CGS]	(4)	Correlation of experimental data, empirical	Case I

Існує декілька математичних моделей для даного параметру.

Також розглянуто останню по хронології публікацію з подібною тематикою [14]. Автор досліджував власну експериментальну модель плівкової течії та порівнював її з математичними моделями вказаними у табл. 3. Було виведено рівняння для критичної густини змочування на базі досліджень [14]:

$$\Gamma_{\min} = 0.13((1 - \cos \theta)\sigma)^{0.764} \rho^{0.255} \mu^{-0.018} \quad (3)$$

Автор наголошує, що дана модель потребує додаткової перевірки.

Висновки

Виконавши моделювання отримано похибки з експериментом [10] 2,8% та 8,8% для витрати 150 г/м/с та 400 г/м/с відповідно. В подальшій роботі великий інтерес має дослідження впливу кута змочування на плівковий потік.

Розглянувши велику кількість математичних моделей для параметру критичної густини змочування можна зробити висновок, що досі немає уніфікованої моделі.

З вищезгаданих рівнянь отримано, що найбільший вплив на параметр критичної густини змочування має шорсткість поверхні, коефіцієнт поверхневого натягу та крайовий кут змочування поверхні рідиною.

Отримані результати свідчать про необхідність подальшого удосконалення як теоретичного, так і модельного опису процесу гравітаційно-в'язкої плівкової течії рідини гладкою поверхнею з кутом нахилу та крайовим кутом змочування.

Список використаної літератури

1. Hobler, T. Wetting minimum of a surface (in Polish). Chemia. Stosowana., Ser. B 1. 1964, pp.145-159.
2. Hobler, T., and J. Czajka. Experimental verification of the theory of minimum spraying of a surface (in Polish), Chemia Stosowana., Ser. 1965, pp.201-214.
3. Hobler, T., and J. Czajka. Minimum wetting of a flat surface (in Polish). Chemia Stosowana 2. 1968, pp.169-186.
4. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных пленках. – К.: Техніка. – 1972. – 196 с.

5. Кутепов А.М., Полянин А.Д., Запрянов З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А. Химическая гидродинамика: справочное пособие. – М.: Квантум. – 1996. – 336 с.
6. Hartley DE, Murgatroyd W. Criteria for the break-up of thin liquid layers flowing isothermally over solid surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1964, 7(9), pp.1003-1015.
7. Trela M. Minimum wetting rate for a decelerating liquid film. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1988, 9(4), pp.415-420.
8. Trela M. A semi-theoretical model of stability of vertical falling liquid films. *Chemical Engineering Science*. 1994, 49(7), pp.1007-1013.
9. Лептюхов І.І., Баранюк О.В., Студенець В.П. Модель в'язкістно-гравітаційної течії водяної плівки на гладкій поверхні у середовищі ANSYS Fluent // Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», Київ, ІЕЕ, КІП ім. Ігоря Сікорського; 2018, с.177-184.
10. K. V. Meredith, A. Heather, J. de Vries & Y.Xin A numerical model for partially-wetted flow of thin liquid films. *FM Global, Research Division, USA OpenCFD, UK*, 2011.
11. A. B. Ponter, G. A. Davies, T. K. Ross and P. G. Thornley, The influence of mass transfer on liquid film breakdown, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10(3), pp. 349-352, 1967.
12. Ponter, A.B. & Aswald, K.M., Minimum thickness of a liquid film flowing down a vertical surface—validity of Mikielewicz and Moszynski equation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 20(5), pp. 575 – 576, 1977.
13. Kazunori Watanabe, Tsuyoshi Munakata, Akira Matsuda, Minimum wetting rate on wetted-wall column. 1975.
14. K. R. Morison, Q. A. G. Worth, N. P. O'dea, Minimum wetting and distribution rates in falling film evaporators. *University of Canterbury, Christchurch, New Zealand*, 2006.