

М. Ф. Григоренко, Є. П. Черніговцев, Ю. В. Найдіч\*

## МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ ПОВЕРХНІ РІДИНИ ТА КАПІЛЯРНО-ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ У РІДИНАХ ЗА УМОВ РІЗНИХ ВЕЛИЧИН ГРАВІТАЦІЙНОЇ ДІЇ

З допомогою розрахунків на основі комп'ютерного інтегрування класичних рівнянь капілярності з ілюстративною метою визначено форми крапель деяких рідин на твердій поверхні за земних умов та умов, що імітують мікрогравітацію або знижену (відносно земної) силу тяжіння. Показано закономірну зміну форми краплі залежно від величини гравітації-тяжіння до сфери за умови послаблення останньої. Таким чином, можна прогнозувати форму краплі конкретної рідини залежно від величини сили тяжіння за земних умов, не проводячи складних натурних експериментів, що може мати важливе значення для практики паяння чи зварювання у космічному середовищі. В процесі експериментальних досліджень вивчено капілярний транспорт рідин за умов, що імітують стан мікрогравітації. Показано, що відповідним підбором ступенів змочування контактуючих пар система діє як капілярна помпа і може знайти практичне застосування для цілеспрямованого селективного транспортування рідин та їх очищення за умов мікрогравітації/невагомості.

*Ключові слова:* моделювання, форма поверхні рідини, змочування, розтікання, міжфазова поверхня, рідини, що не змішуються, стани мікрогравітації/невагомості.

### Вступ

Як зазначалося раніше [1], форма поверхонь крапель рідин (у тому числі рідких металів), менісків при контакті з твердими поверхнями, а також капілярно-транспортні процеси можуть відігравати суттєву роль у ряді технологій у металургії, наприклад для реалізації електрозварних процесів, зокрема формування зварного шва, валка наплавленого металу, в процесі лиття сплавів, пайці. Важливу роль мають капілярно-транспортні процеси для подавання чи перекачування рідкого палива, що контактує з твердими стінками баків (трубопроводів). Особливу актуальність це набуває при польотах у космос та на інші планети, розробці космічних технологій, тобто за умов змінної гравітації/ мікрогравітації або її повній відсутності (невагомості). Окрім безпосереднього дослідження даних явищ у космічному просторі, являє інтерес прогнозування та моделювання капілярної поведінки рідин за земних умов. У ряді попередніх робіт нами вивчався вплив як зниженої, так і підвищеної сили тяжіння на крайовий кут змочування і було встановлено його незалежність від сили тяжіння. Також проведено окремі експерименти типу дослідів Плато, де у статистиці виміряно контактні кути для аніліну на різних підкладках у водному розчині солі (сила тяжіння на краплі не діяла) [1—3]. Метою даної роботи є як теоретичне (розрахункове) прогнозування форм крапель різних рідин на твердих підкладках залежно від величини сили тяжіння, так і

\* М. Ф. Григоренко — кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ; Є. П. Черніговцев — науковий співробітник цієї ж установи; Ю. В. Найдіч — академік НАН України, доктор технічних наук, професор, завідуючий відділу цієї ж установи.

експериментальне моделювання капілярно-транспортних процесів з використанням низькотемпературних систем.

### *Розрахункові дослідження форм крапель рідини на твердій поверхні*

Відомо, що форма краплі рідини на твердій підкладці (для  $\theta > 90^\circ$ ) може бути охарактеризована параметром сферичності — відношенням  $x/z$ , де  $x$  — половина екваторіального діаметра краплі;  $z$  — відстань від екватора до вершини. За малих значень сили тяжіння  $g$  або малого об'єму краплі мають форму, близьку до сфери. За  $g = 0$  утворюється ідеальна сфера. Експериментально ситуацію для конкретного навколишнього середовища (на Місяці, Марсі, у відкритому космосі) можливо спостерігати лише за умов космічного польоту або у складних спеціальних дослідженнях. Проте ряд важливих даних може бути отриманий в результаті теоретичного аналізу рівнянь, що описують форму поверхні рідини.

У даній роботі методом розрахунку (більш детально див. [1]) на основі комп'ютерного інтегрування класичних рівнянь капілярності (рівняння Лапласа—Ейлера) з ілюстративною метою визначено форми крапель деяких рідин на твердій поверхні за земних умов та умов, що імітують мікрогравітацію або знижену (відносно земної) силу тяжіння (як на Місяці та Марсі) (рис. 1 та 2. Як видно з наведених результатів, при послабленні гравітації і відповідному підвищенні ролі поверхневих сил форма краплі на твердій підкладці закономірно змінюється і тяжіє до сфери ( $x/z \rightarrow 1$ ). Особливо цей ефект виражений при зміні величини  $g$  у широкому діапазоні (рис. 1). Тобто у такий спосіб можна прогнозувати

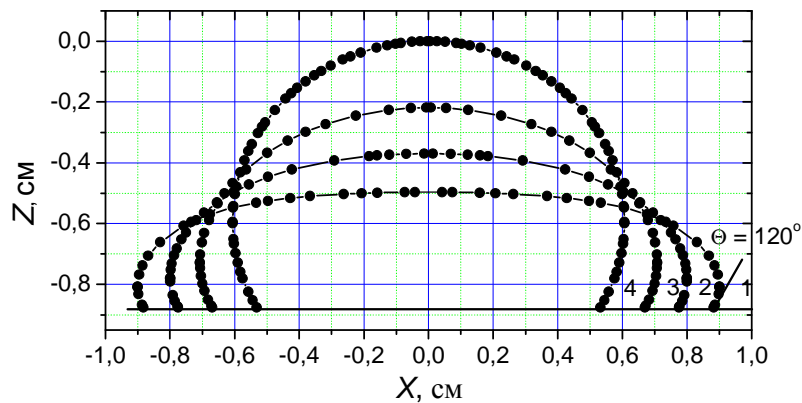


Рис. 1. Розрахункові форми крапель розплавленого свинцю ( $\sigma = 447$  мДж/м<sup>2</sup>,  $\rho = 10,69$  г/см<sup>3</sup>), що спираються на тверду поверхню, для краплі об'ємом  $0,76$  см<sup>3</sup> при різних значеннях прискорення  $g$ : 1 — 980; 2 — 490; 3 — 196; 4 —  $9,8$  см/с<sup>2</sup>

Fig. 1. Calculated forms of drops of molten lead ( $\sigma = 447$  mJ/m<sup>2</sup>,  $\rho = 10,69$  g/cm<sup>3</sup>), that lean against a hard surface, for a drop with volume  $0,76$  cm<sup>3</sup> at different values of acceleration  $g$ : 1 — 980; 2 — 490; 3 — 196; 4 —  $9,8$  cm/s<sup>2</sup>

форму краплі конкретної рідини залежно від величини сили тяжіння, не проводячи складних натурних експериментів, наприклад, на Місяці та Марсі, що може мати важливе значення для практики паяння чи зварювання.

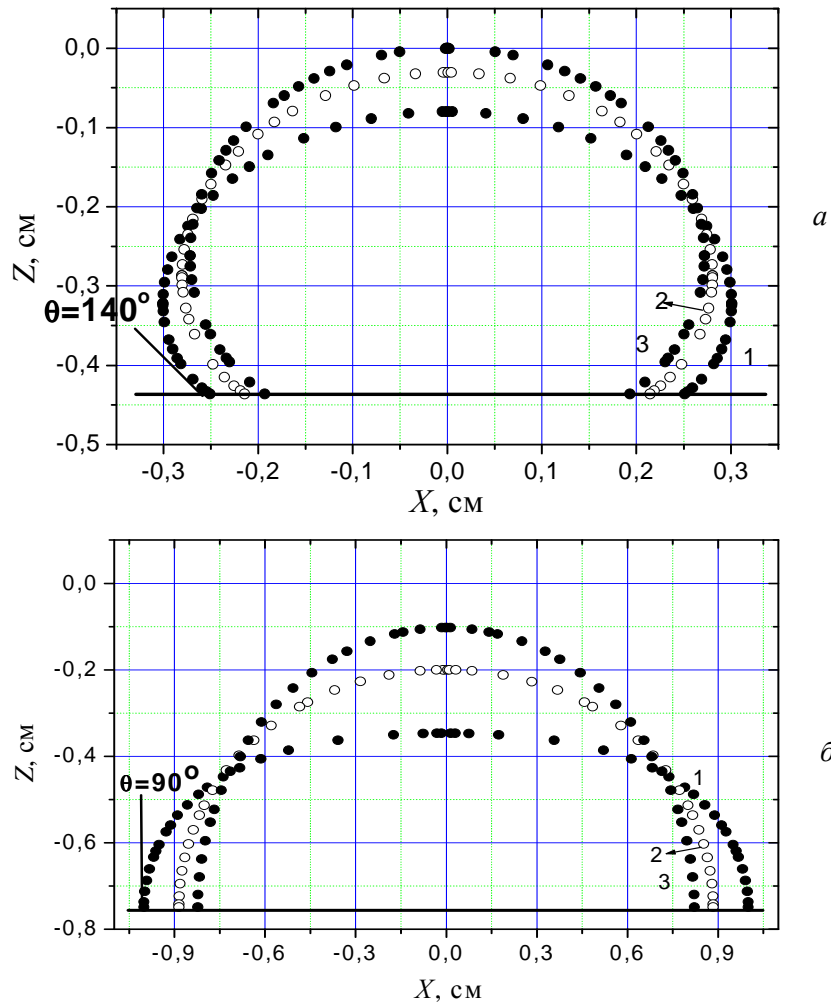


Рис. 2. Приклади розрахункових форм крапель на твердих підкладках за різних умов гравітації: *a* — Au ( $\sigma = 1130 \text{ мДж/м}^2$ ,  $\rho = 17 \text{ г/см}^3$ ,  $V = 0,074 \text{ см}^3$ ,  $\theta = 140^\circ$ ); *б* —  $H_2O$  ( $\sigma = 72 \text{ мДж/м}^2$ ,  $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$ ,  $V = 0,91 \text{ см}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ ); 1 — Земля ( $g = 980 \text{ см/с}^2$ ); 2 — Марс ( $g = 386 \text{ см/с}^2$ ); 3 — Місяць ( $g = 162 \text{ см/с}^2$ )

Fig. 2. Examples of calculated forms of drops on hard supports at different gravitational conditions: *a* — Au ( $\sigma = 1130 \text{ mJ/m}^2$ ,  $\rho = 17 \text{ g/cm}^3$ ,  $V = 0,074 \text{ cm}^3$ ,  $\theta = 140^\circ$ ); *б* —  $H_2O$  ( $\sigma = 72 \text{ mJ/m}^2$ ,  $\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$ ,  $V = 0,91 \text{ cm}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ ); 1 — Earth ( $g = 980 \text{ cm/s}^2$ ); 2 — Mars ( $g = 386 \text{ cm/s}^2$ ); 3 — Moon ( $g = 162 \text{ cm/s}^2$ )

Очевидно, що за різних величин гравітації буде змінюватися й висота підйому рідин у капілярах, яка визначається за відомою формулою висоти підняття рідини у капілярі. Для прикладу, висота підйому води у скляному капілярі за різних умов гравітації буде наступна: 1 — 2,67 см (Земля), 2 — 6,76 см (Марс), 3 — 16,1 см (Місяць), ( $\sigma = 72$  мДж/м<sup>2</sup>,  $\theta_{\text{скло-вода}} = 25^\circ$ ,  $\rho = 1,0$  г/см<sup>3</sup>,  $r_{\text{капіл}} = 0,05$  см).

**Моделювання капілярно-транспортних процесів у рідинах за умов мікрогравітації та інших значеннях гравітаційної дії**

Інша можливість експериментального моделювання капілярних та капілярно-транспортних процесів за земних умов, що імітують стани невагомості/мікрогравітації, полягає у використанні рідин, котрі не змішуються одна з одною і мають рівні/відмінні густини. Методика проведення дослідів по змочуванню та розтіканню рідин по твердих поверхнях за зазначених умов та схема випробувального стенду описані раніше [4] (рис. 3).

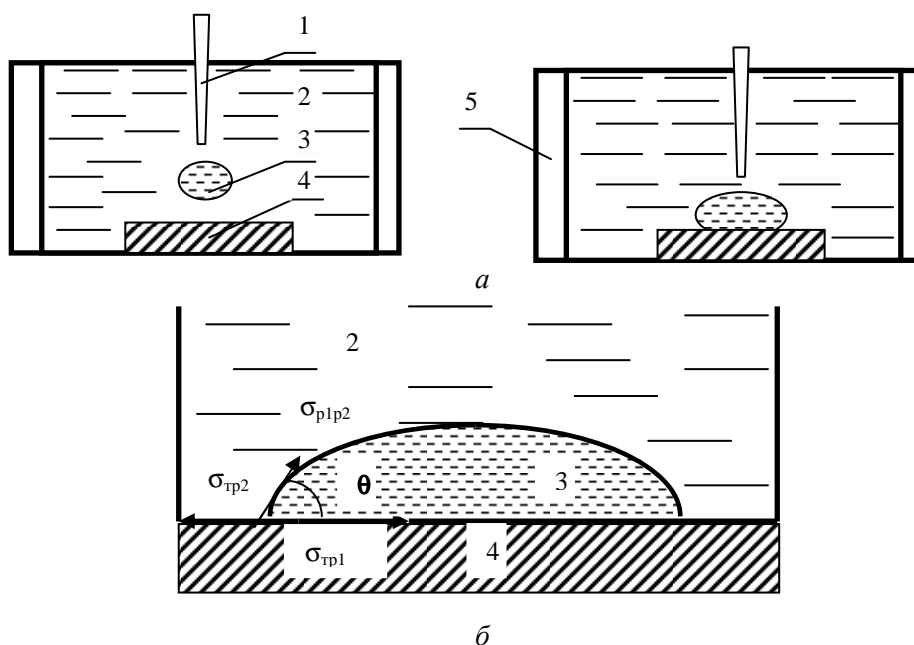


Рис. 3. Схема експериментів (а) та розподіл міжфазових і поверхневих енергій на границях розділу: тверде тіло—рідина 1 ( $\sigma_{\text{тp1}}$ ); тверде тіло—рідина 2 ( $\sigma_{\text{тp2}}$ ); рідина 1—рідина 2 ( $\sigma_{\text{p1p2}}$ ); 1 — капіляр; 2 — рідина 1; 3 — рідина 2; 4 — тверде тіло; 5 — прозора кювета;  $\theta$  — крайовий кут змочування

Fig. 3. Experiment diagrams (a) and distribution of interphase and surface energies at the solid—liquid 1 ( $\sigma_{\text{тp1}}$ ), solid—liquid 2 ( $\sigma_{\text{тp2}}$ ), liquid 1—liquid 2 ( $\sigma_{\text{p1p2}}$ ) boundaries (б); 1 — capillary; 2 — liquid 1; 3 — liquid 2; 4 — solid; 5 — transparent cuvette;  $\theta$  — wetting angle

З використанням зазначеної методики на першому етапі з метою пошуку необхідних контактних пар вивчали змочування на повітрі для ряду систем рідина—тверде тіло: оливкова олія, рицинова олія—скло, парафіноване скло; вода—скло, парафіноване скло; вода/спирт—скло, парафіноване скло з отриманням в результаті експериментів часових залежностей контактного кута для даних систем. З урахуванням одержаних даних на другому етапі досліджували змочування та розтікання при контактуванні твердої поверхні з рідиною за умов присутності другої рідкої фази (що не змішується з першою), тобто у системі рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub> (рис. 3, а). Варіюючи густину, наприклад, рідини 1 — водно-спиртового розчину (відносно рідини 2—крапля олії), імітували стан невагомості/мікрогравітації або зниженої у порівнянні із земною величині сили тяжіння. Спостережувані процеси в усіх випадках фіксувалися відеокамерою, отримані дані (значення крайових кутів змочування та деяких лінійних параметрів) обробляли на комп'ютері.

Як показали отримані результати [4], основні закономірності капілярних процесів (змочування, розтікання) зберігаються й за умов невагомості/мікрогравітації та інших величин гравітаційної дії. Тобто в процесі повільного падіння краплі оливкової олії на парафіновану скляну пластинку, котра знаходиться у водно-спиртовому розчині (що відповідає зниженій у порівнянні із земною величині сили тяжіння), у момент контакту відбувається закономірне витискання водно-спиртового розчину олією (олія краще змочує парафіноване скло, ніж водно-спиртовий розчин) і рух міжфазової границі до встановлення рівноважної форми краплі олії на склі під шаром водного спиртового розчину з кінцевим кутом змочування  $\theta = \sim 27^\circ$  (рис. 4). Процес триває приблизно 5,3 с. Додамо, що подібні результати отримані також для краплі олії, котра до контакту знаходилася у стані невагомості (плавала в об'ємі розчину) і приводилася у контакт із парафінованою підкладкою [5] (рис. 5).

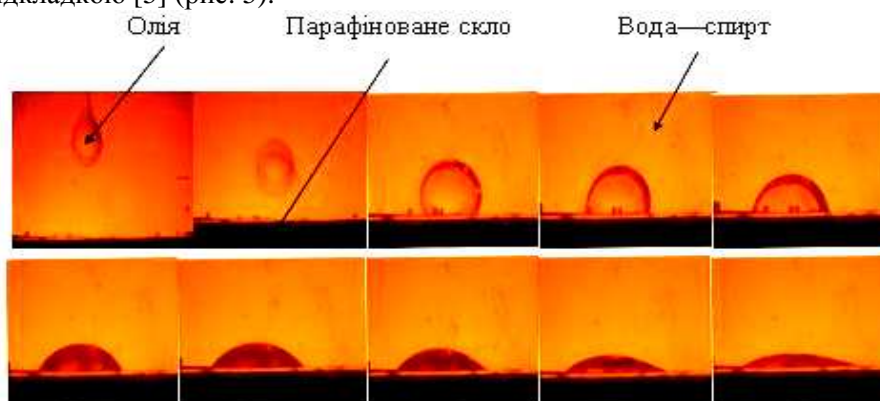


Рис. 4. Кінетика розтікання у системі олія—парафіноване скло/вода—спирт (випадок зниженої у порівнянні із земною сили тяжіння) ( $\tau = 5,3$  с,  $\theta = 27^\circ$ )

Fig. 4. Spreading kinetics in the olive oil—paraffined glass—water/ethanol system (under decreased (in comparison with terrestrial) gravity state ( $\tau = 5,3$  s,  $\theta = 27^\circ$ ))

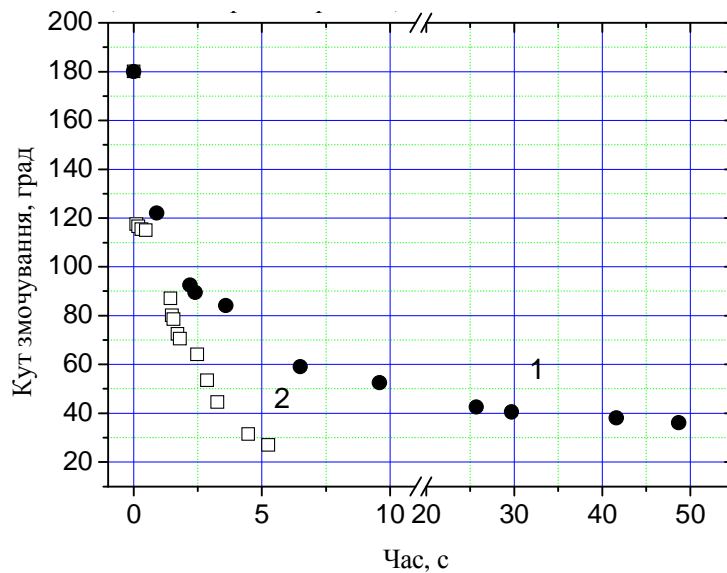


Рис. 5. Змочування у системі парафіноване скло—оливкова олія (водно/спиртовий розчин) за умов невагомості/мікрогравітації (1) та зниженої у порівнянні із земною силою тяжіння (2)

Fig. 5. Wetting kinetics in the olive oil—paraffined glass—water/ethanol solution system under microgravity/zero-gravity state (1) and decreased (in comparison with terrestrial) gravity state (2)

Відмінність у ході кривих (рис. 5) зумовлена, очевидно, головним чином різними капілярними властивостями вивчених систем, зокрема відмінністю міжфазових енергій на відповідних границях розділу (рис. 3, б) і також густин застосованих водно-спиртових розчинів, аніж відмінністю у силах тяжіння для даних двох випадків.

На наступному етапі ставилася задача і були проведені відповідні експерименти по вивченню цілеспрямованого транспорту рідини по капіляру для ряду модельних систем, зокрема переміщення рицинової олії уздовж скляного парафінованого капіляру. У цьому разі у водно-спиртовий розчин поміщували парафінований зсередини скляний капіляр і вводили у розчин краплю рицинової олії за умов невагомості останньої. Потім капіляр обережно підводили до краплі, розпочинався процес всмоктування рицинової олії всередину капіляра (рицинова олія добре змочує парафіноване скло —  $\theta = 27^\circ$ ,  $\tau = 2$  хв і практично не змочує скляну підкладку —  $\theta = 139^\circ$ ,  $\tau = 25$  хв) (рис. 6).

Зазначимо, що швидкість переміщення олії у часі зростає (рис. 7), це можна пояснити, на наш погляд, збільшенням капілярного тиску через зменшення радіуса кривизни краплі олії у міру зменшення її об'єму. Таким чином, розглянута система діє, фактично, як капілярна помпа і може знайти практичне застосування для цілеспрямованого селективного капілярного транспорту рідин за умов мікрогравітації. Кінетику переміщення фронту олії в капілярі фіксували відеокамерою (рис. 8).

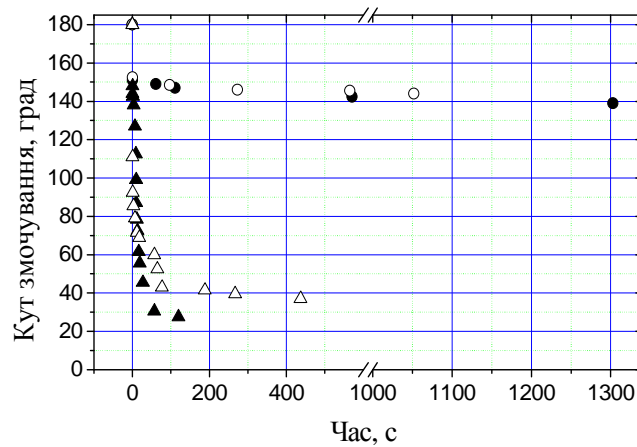


Рис. 6. Кінетика змочування у системах вода/спирт—рицинова олія—скло (●, ○), вода/спирт—рицинова олія—парафіноване скло (Δ, ▲) — окремі досліди

Fig. 6. Wetting kinetics for: water/ethanol—castor oil—glass (●, ○); water/ethanol—castor oil—paraffined glass (Δ,▲). ●, ○, Δ,▲ — separate experiments

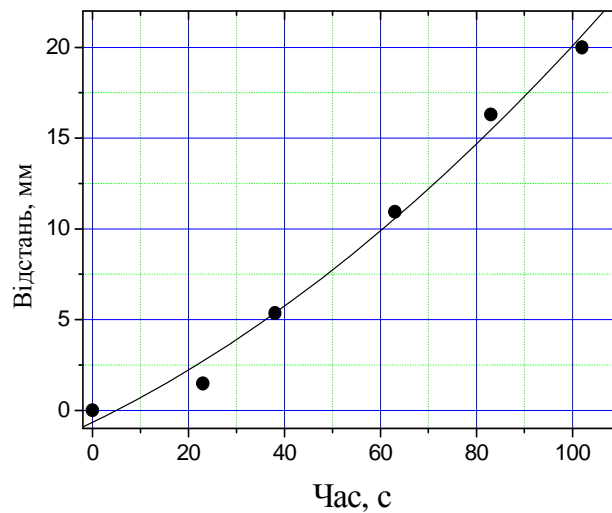


Рис. 7. Кінетика переміщення фронту рицинової олії у парафінованому скляному капілярі у водно-спиртовому розчині

Fig. 7. Kinetics of a castor oil edge movement in a paraffined glass capillary immersed in a water-ethanol solution

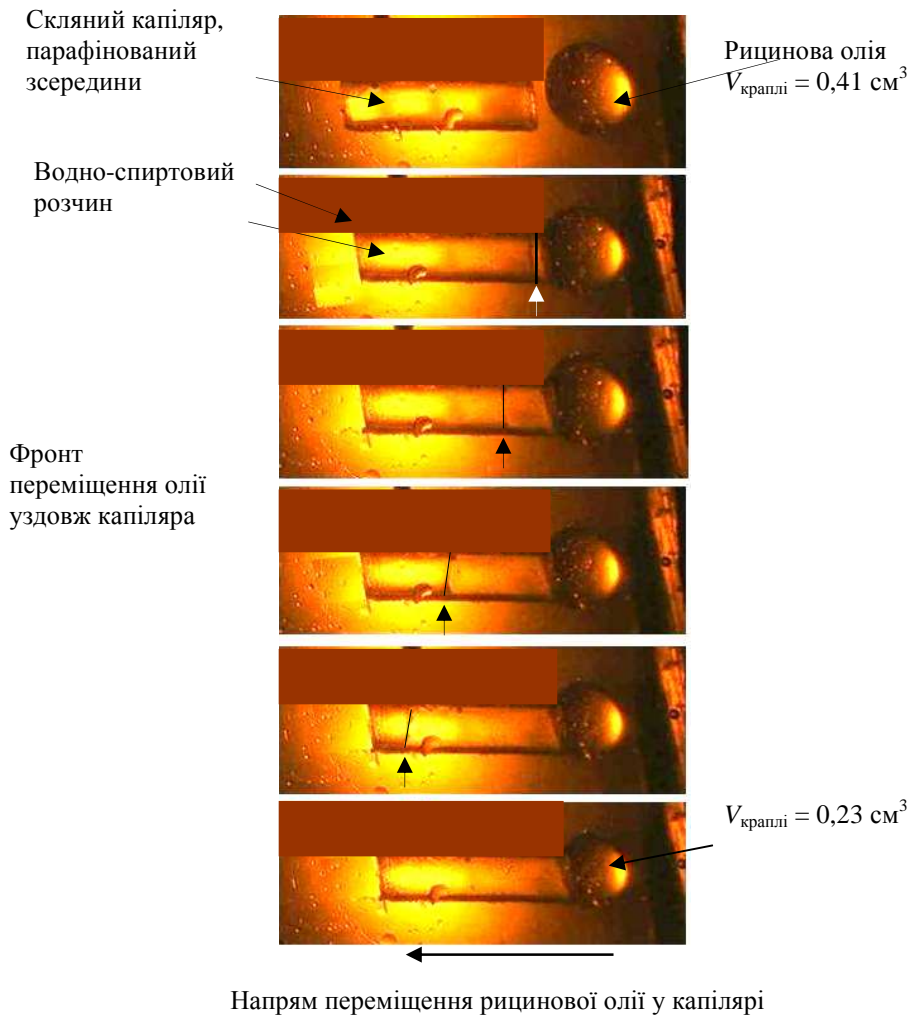


Рис. 7. Відеограма спрямованого транспорту олії у парафінованому капілярі у водно-спиртовому середовищі (x2,5, час заповнення капіляра  $\tau = 104$  с, середня швидкість  $v = 0,152$  мм/с, діаметр капіляра  $d = 4,0$  мм, довжина капіляра  $l = 20,3$  мм)

Fig. 7. Directed oil transportation videogram in a paraffined glass capillary immersed in a water—ethanol medium (x2,5, time of a capillary filling 104 s, mean velocity  $v = 0,152$  mm/s, capillary diameter  $d = 4,0$  mm, capillary length  $l = 20,3$  mm)

### Висновки

Методом розрахунків на основі комп'ютерного інтегрування класичних рівнянь капілярності з ілюстративною метою визначено форми крапель деяких рідин на твердій поверхні за земних умов та умов, що імітують мікрогравітацію або знижену (відносно земної) силу тяжіння. Показано, що з послабленням гравітації і відповідним підвищенням ролі



поверхневих сил форма краплі на твердій підкладці змінюється і тяжіє до сфери. Тобто у такий спосіб за наземних умов можна прогнозувати форму краплі конкретної рідини залежно від величини сили тяжіння, не проводячи складних натурних експериментів, що може мати важливе значення для практики, наприклад, паяння чи зварювання у космічному середовищі.

З використанням раніше створеної апаратури та отриманих даних по змочуванню та розтіканню на границі розділу у системах рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub> проведено експериментальні дослідження капілярного транспорту рідин за умов, що імітують стан мікрогравітації. Показано, що за відповідного підбору ступенів змочування контактуючих пар система діє як капілярна помпа і може знайти практичне застосування для цілеспрямованого селективного транспортування рідин та їх очищення за умов мікрогравітації.

Додамо, що вибрані для експериментів низькотемпературні прозорі рідини представляються також корисними в плані моделювання і візуалізації поведінки і механізмів розтікання для високо-температурних/низькотемпературних непрозорих капілярних систем.

**РЕЗЮМЕ.** Расчетным путем на основе компьютерного интегрирования классических уравнений капиллярности с целью иллюстрации определены формы капель некоторых жидкостей на твердой поверхности в земных условиях и условиях, имитирующих микрогравитацию или пониженную (относительно земной) силу тяжести  $g$ . Показано закономерное изменение формы капли в зависимости от величины гравитации — стремление к сфере при ослаблении величины  $g$ . Таким образом, возможно прогнозирование формы капли конкретной жидкости в зависимости от величины силы тяжести в земных условиях, не проводя сложных натурных экспериментов, что может иметь важное значение для практики, например, пайки или сварки в космической среде. В ходе экспериментальных исследований изучен капиллярный транспорт жидкостей в условиях, имитирующих состояние микрогравитации. Показано, что при соответствующем подборе степеней смачивания контактирующих пар система действует как капиллярный насос и может найти практическое применение для целенаправленного селективного транспортирования жидкостей и их очистки в условиях микрогравитации/невесомости.

**Ключевые слова:** моделирование, форма поверхности жидкости, смачивание, растекание, межфазная поверхность, несмешивающиеся жидкости, состояния микрогравитации/невесомости.

1. *Найдич Ю. В.* Форма поверхности жидкости и капиллярные явления при пониженной силе тяжести или в невесомости применительно к проблемам космического материаловедения (технологии порошковой металлургии: пропитка, жидкофазное спекание, сварка, пайка) / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, В. А. Евдокимов и др.] // Космічна наука і технологія. — 2004. — **10**, № 2/3. — С. 59—67.

2. *Найдич Ю. В.* Влияние гравитации на смачивание и капиллярные явления в контактных системах жидкость—твердое тело / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Т. В. Стецюк и др.] // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 5. — С. 50—55.
3. *Найдич Ю. В.* Исследование возможного действия различных уровней силы тяжести на смачивание жидкостями твердых тел. Для космического эксперимента "материал—пайка" / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Т. В. Стецюк и др.] // Космічні дослідження в Україні: Звіт до COSPAR, 2014. — С. 133—137.
4. *Григоренко М. Ф.* Вивчення капілярних явищ на міжфазній поверхні рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub> з використанням модельних систем, що імітують стан мікрогравітації/невагомості / М. Ф. Григоренко, Є. П. Черніговцев // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2014. — Вып. 47. — С. 14—24.
5. *Григоренко М. Ф.* Дослідження змочування та кінетики розтікання у деяких модельних системах з фізичним типом взаємодії / М. Ф. Григоренко, Є. П. Черніговцев, В. В. Полуянська // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2012. — Вып. 45. — С. 48—54.

Надійшла 08.07.17

**Grigorenko M., Chernigovtsev E., Naidich Y.**

**Modeling of a fluid surface shape and capillary—transport processes in the liquids under different values of gravitational forces**

By a calculation way, on the basis of computer integration of classic equations of capillarity with the purpose of illustration the forms of drops of some liquids on a hard support under the earth conditions and conditions, imitating a microgravity or decreased (relative to earth) gravity are calculated. The appropriate change of a form of drop is shown to depend on the value of gravitation — tendency to the sphere shape at the weakening of g. In this way it's possible to forecast the form of a drop of a concrete liquid depending on the value of gravity under terrestrial conditions, without a need to conduct difficult special experiments, and that can be of a practical importance, for example, for soldering or welding processes in the space. By way of experimental researches the capillary transport of liquids is studied under the conditions, imitating the state of microgravity. It is shown that at a proper selection of wetting degrees of contacting pairs the system operates as a capillary pump and can find practical application for purposeful selective liquid transportation and its purification under the microgravity/zero-gravity states.

**Keywords:** modeling, fluid surface shape, wetting, spreading, interphase, immiscible liquids, microgravity/zero-gravity states.