

М. Ф. Григоренко, Є. П. Черніговцев\*

**ВИВЧЕННЯ КАПІЛЯРНИХ ЯВИЩ НА МІЖФАЗОВІЙ ПОВЕРХНІ  
РІДИНА<sub>1</sub>—ТВЕРДЕ ТІЛО—РІДИНА<sub>2</sub> З ВИКОРИСТАННЯМ  
МОДЕЛЬНИХ СИСТЕМ, ЩО ІМІТУЮТЬ СТАН  
МІКРОГРАВІТАЦІЇ/НЕВАГОМОСТІ**

Для ряду контактних модельних пар: оливкова, рицинова олія—скло, парафіноване скло; вода—скло, парафіноване скло; вода/етанол—скло, парафіноване скло — методом лежачої краплі на повітрі проведено дослідження змочування. З урахуванням отриманих відеозйомкою даних вивчено у динаміці особливості змочування та розтікання для рідини (олія), що контактує з твердою поверхнею (скло, парафіноване скло), зануреною в іншу рідину (вода, розчин вода/етанол), котра не змішується з першою та має густину, що дорівнює такій для зазначеного розчину (імітуючи у такий спосіб стан мікрогравітації/невагомості) — на границі розділу рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub>. Отримані результати можуть мати деякі практичні застосування, зокрема, для моделювання та вивчення капілярно-транспортних процесів, розділення та очищення рідин за умов мікрогравітації та розробки відповідних космічних технологій.

*Ключові слова:* змочування, розтікання, парафіноване скло, міжфазова границя, рідини що не змішуються, мікрогравітація, моделювання.

**Вступ**

Капілярні процеси — розтікання та змочування при контактуванні твердої поверхні з рідиною за умов присутності другої рідкої фази (що не змішується з першою) — на міжфазовій границі рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub> вивчені не так широко, як для систем тверде тіло—рідина—газ, що пов'язане з експериментальними труднощами. Застосування низькотемпературних прозорих систем дає можливість подолати ці труднощі та використати дані моделі для дослідження високотемпературних (у тому числі непрозорих) систем. Окрім того, варіюванням густин зазначених рідин можна імітувати умови, що відповідають різним силам тяжіння чи їх відсутності (мікрогравітація, невагомість). Окремі досліді типу дослідів Плато проведено нами раніше [1], де у статистиці були виміряні контактні кути для аніліну на різних підкладках у водному розчині солі (сила тяжіння на краплі не діяла).

У даній роботі ставилось завдання експериментально у динаміці дослідити закономірності змочування та розтікання рідин по твердих поверхнях, занурених у другу рідину, що не змішується з першою (міжфазова поверхня рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub>), для ряду систем з метою моделювання поведінки рідин і відповідних капілярних явищ при контакті з твердою фазою за умов невагомості/мікрогравітації.

---

\* 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.

### Методика проведення експериментів

Досліди по змочуванню та розтіканню проводили з використанням розробленого спеціального універсального випробувального стенду (рис. 1) [2] за двома методами: а) крапля досліджуваної рідини знаходиться на незмочуваній поверхні (наприклад, у випадку контактної пари вода—парафінований графіт, парафіноване скло) і пластинка, що вивчається (скло, кварц, сапфір), підводиться за допомогою штока зверху до контакту з краплею [3]; б) досліджувана пластинка знаходиться знизу, а крапля відповідної рідини викапується шприцем зверху (див. схему експерименту на рис. 2, а). Стенд також дозволяє здійснювати досліди по змочуванню за методом підведення пухирця газу (наприклад, гелію) під підкладку, яка знаходиться у досліджуваній рідині. Діаметр голки шприца дорівнював 0,5 мм, крапель — 2—3 мм, крапля падала з висоти 0,3—0,4 мм.

При вивченні капілярних явищ (змочування, розтікання) у системі рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub> (пробні досліди проведені раніше [4]) у прозорій кюветі, наприклад, із водно-спиртовим розчином розмішували краплю рослинної олії, що не змішується з даним розчином і має густину, яка дорівнює густині зазначеного розчину. До краплі сферичної форми, що плавала в об'ємі розчину (знаходилась у стані невагомості), з використанням спеціального пристрою (штоку) підводили скляну (при

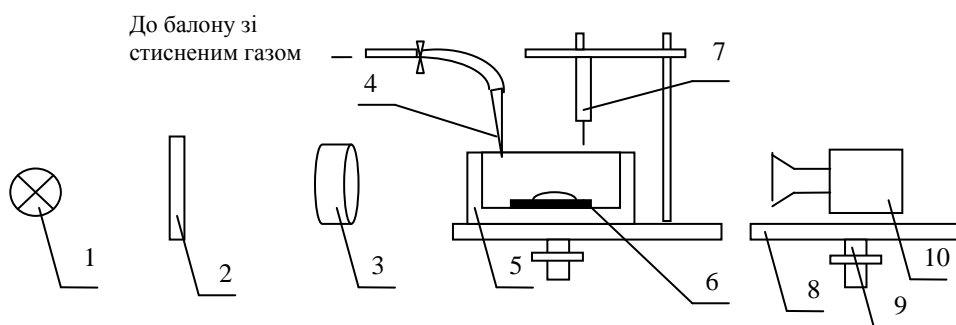


Рис. 1. Схема випробувального стенду для експериментального дослідження змочування та розтікання рідин по твердих підкладках на міжфазовій поверхні рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub> у модельних системах, що імітують умови мікрогравітації та зниженої невагомості: 1 — освітлювальна лампа; 2 — матове скло; 3 — конденсор; 4 — скляний капіляр; 5 — кювета; 6 — досліджувана підкладка з краплею; 7 — дозувальний шприц; 8 — столик; 9 — регулювальний гвинт; 10 — відеокамера

Fig. 1. Test bench diagram for experimental study of wetting and spreading of liquids over solid supports at the liquid<sub>1</sub>—solid—liquid<sub>2</sub> interface for model systems imitating microgravity/zero—gravity states: 1 — illuminating lamp; 2 — ground glass; 3 — condenser; 4 — glass capillary; 5 — optical cell; 6 — support with a drop studied; 7 — metering syringe; 8 — table; 9 — governing screw; 10 — video camera

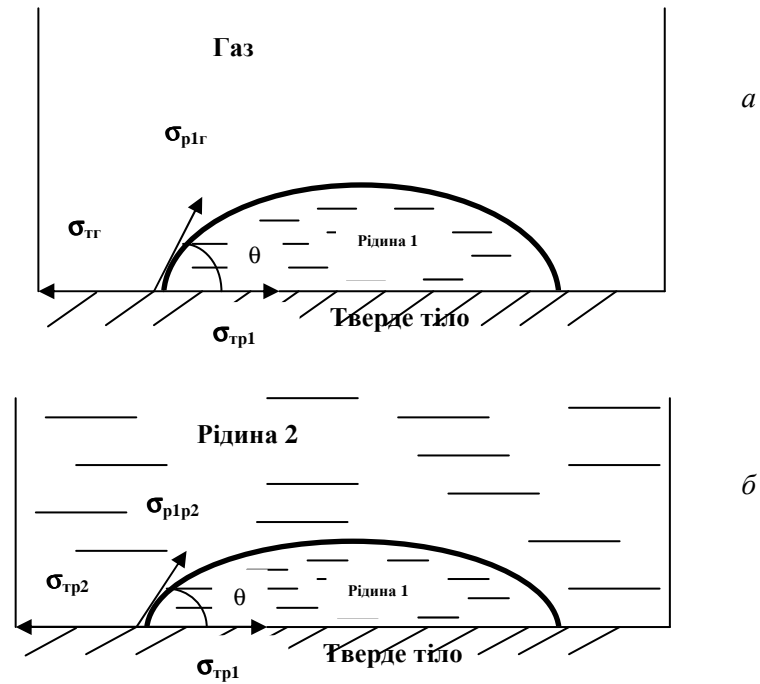


Рис. 2. Схеми експериментів: *a* — на повітрі; *б* — у присутності другої рідини;  $\theta$  — крайовий кут змочування;  $\sigma$  — міжфазові та поверхневі енергії на границях розділу тверде тіло—газ (тг); тверде тіло—рідина<sub>1</sub> (тр<sub>1</sub>); рідина<sub>1</sub>—газ (р<sub>1г</sub>); тверде тіло—рідина<sub>2</sub> (тр<sub>2</sub>); рідина<sub>1</sub>—рідина<sub>2</sub> (р<sub>1р<sub>2</sub></sub>)

Fig. 2. Experiment diagrams: *a* — in the air atmosphere; *б* — in the presence of second liquid;  $\theta$  — wetting angle;  $\sigma$  — interphase and surface energies at the solid—gas (sg), solid—liquid<sub>1</sub>(sl<sub>1</sub>), liquid<sub>1</sub>—gas (l<sub>1g</sub>), solid—liquid<sub>2</sub> (sl<sub>2</sub>), liquid<sub>1</sub>—liquid<sub>2</sub> (l<sub>1l<sub>2</sub></sub>) boundaries

необхідності парафіновану) пластинку до її контакту з краплею. В іншому випадку крапля олії, що знаходилась у водно-спиртовому розчині другої концентрації, повільно падала на пластинку, імітуючи знижену відносно земної силу тяжіння (рис. 2, *б*). Спостережувані процеси в усіх випадках фіксувались відеокамерою, отримані дані (виміри крайових кутів змочування та деяких лінійних параметрів) обробляли на комп'ютері.

### ***Результати досліджень та їх обговорення***

На першому етапі вивчали змочування для ряду контактних пар рідина—тверде тіло (оливкова олія, рицинова олія—скло, парафіноване скло; вода—скло, парафіноване скло; вода/спирт—скло, парафіноване скло), котрі, як передбачалось, могли бути задіяні у дослідженні систем рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub>. Ці досліди проводили на повітрі.

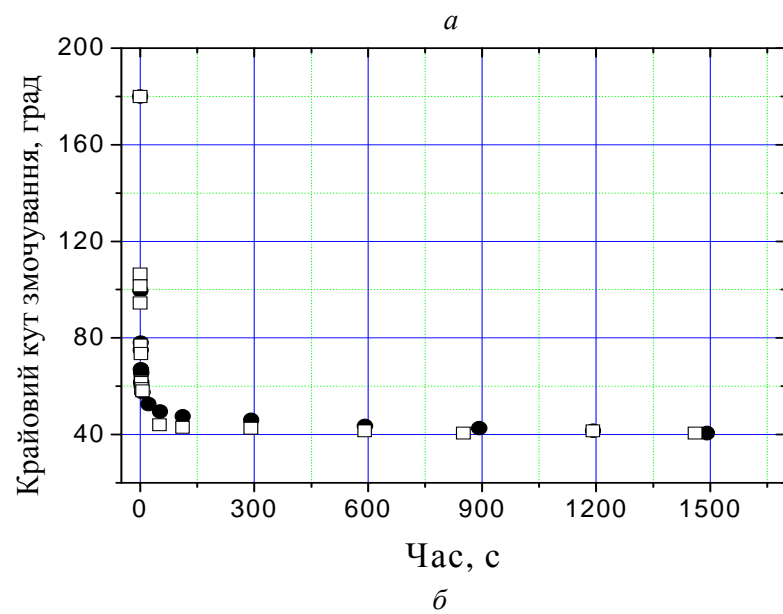
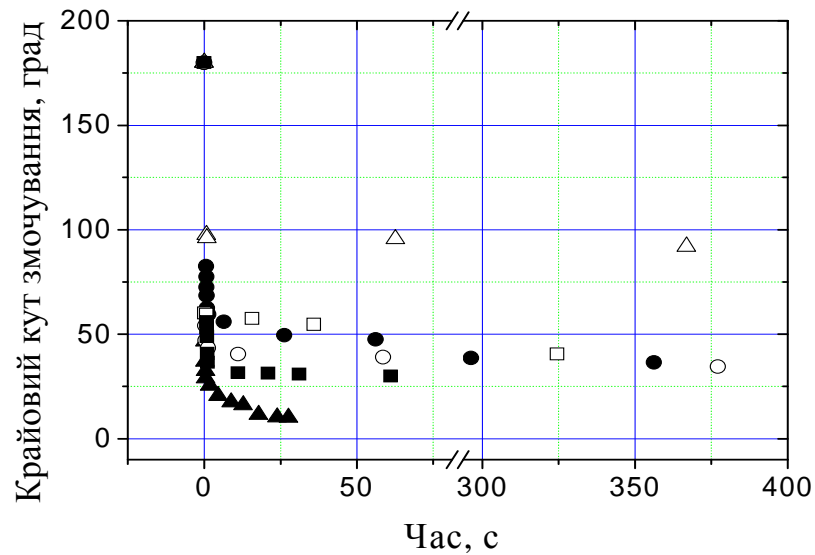


Рис. 3. Змочування підкладок із скла та парафінованого скла рядом рідин на повітрі: *a* — парафіноване скло—вода ( $\Delta$ ); парафіноване скло—вода/спирт ( $\square$ ); парафіноване скло—оливкова олія ( $\bullet$ ); скло—вода ( $\circ$ ); скло—оливкова олія ( $\blacksquare$ ); скло—вода/спирт ( $\blacktriangle$ ); *b* — скло—рицинова олія ( $\bullet$ ); парафіноване скло—рицинова олія ( $\square$ )

Fig. 3. A plot of contact angle vers. time for a number of liquids on glass and paraffined glass supports in the air atmosphere: *a* — paraffined glass—water ( $\Delta$ ); paraffined glass—water/ethanol ( $\square$ ); paraffined glass—olive oil ( $\bullet$ ); glass—water ( $\circ$ ); glass—olive oil ( $\blacksquare$ ); glass—water/ethanol ( $\blacktriangle$ ); *b* — glass—castor oil ( $\bullet$ ); paraffined glass—castor oil ( $\square$ )

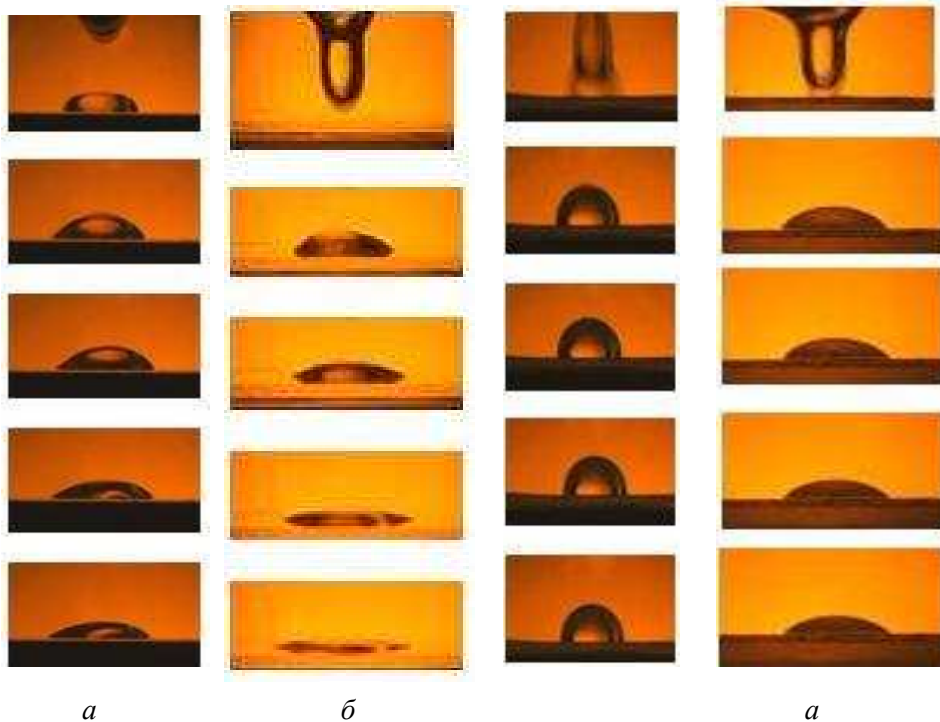


Рис. 4. Відеограми змочування та розтікання на повітрі для систем: *а* — скло—вода (час розтікання  $\tau = 586$  с, кінцевий крайовий кут змочування  $\theta = 33^\circ$ ); *б* — скло—вода/спирт ( $\tau = 28$  с,  $\theta = 10^\circ$ ); *в* — парафіноване скло—вода ( $\tau = 605$  с,  $\theta = 91^\circ$ ); *г* — парафіноване скло—вода/спирт ( $\tau = 325$ ,  $\theta = 40^\circ$ )

Fig. 4. Wetting and spreading videograms in the air atmosphere for some systems: *a* — glass—water (time of spreading  $\tau = 586$  s, final wetting angle  $\theta = 33^\circ$ ); *б* — glass—water/ethanol ( $\tau = 28$  s,  $\theta = 10^\circ$ ); *в* — paraffined glass—water ( $\tau = 605$  s,  $\theta = 91^\circ$ ); *г* — paraffined glass—water/ethanol ( $\tau = 325$  s,  $\theta = 40^\circ$ )

В результаті експериментів отримано часові залежності контактного кута для зазначених систем (характерні графіки представлені на рис. 3).

Відеограми розтікання зазначених рідин по склу та парафінованому склу на повітрі подані на рис. 4, 5.

Особливості змочування та розтікання у вивчених системах на повітрі можна пояснити сукупною дією таких чинників, як поверхневий натяг, в'язкість та природа твердої підкладки. Контактні кути для досліджених систем виявляють експоненційний спад із часом (рис. 3). Характерним є швидке зниження контактного кута на першій стадії після здійснення контакту і значно менші швидкості змочування на наступних стадіях процесу. В цілому, за цими характеристиками результати для даних систем подібні до раніше отриманих [4] для систем з фізичним типом взаємодії. Знайдено, що найгірше змочування демонструє система парафіноване скло—вода з контактним кутом від  $\sim 98$  до кінцевого крайового кута змочування  $\sim 90^\circ$  (який досягається впродовж біля 10 хв)

(рис. 3 та 4, *в*), а найкраще змочування характерне для системи скло—вода/спирт з крайовим кутом  $\sim 10^\circ$ , який досягається приблизно за 30 с (рис. 3 та 4, *б*). Крайові кути змочування для систем скло, парафіноване скло—оливкова олія складають, відповідно, 26 та  $36^\circ$  при часі розтікання приблизно 4 та 6 хв (рис. 3, 5). У випадку систем скло, парафіноване скло—рицинова олія (рис 3, *б* та 5, *в*) кінцеві крайові кути приблизно збігаються і складають близько  $40^\circ$  при більшому, ніж для зазначених систем, часі розтікання (25 хв), що зумовлено високою в'язкістю рицинової олії (987 сПз).

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). Як видно на рис. 6, 7, при повільному падінні краплі оливкової олії на парафіновану скляну пластинку, котрі знаходяться у водно-спиртовому розчині (що відповідає зниженій у порівнянні із земною величиною сили тяжіння, наприклад як на Місяці), у момент контакту відбувається

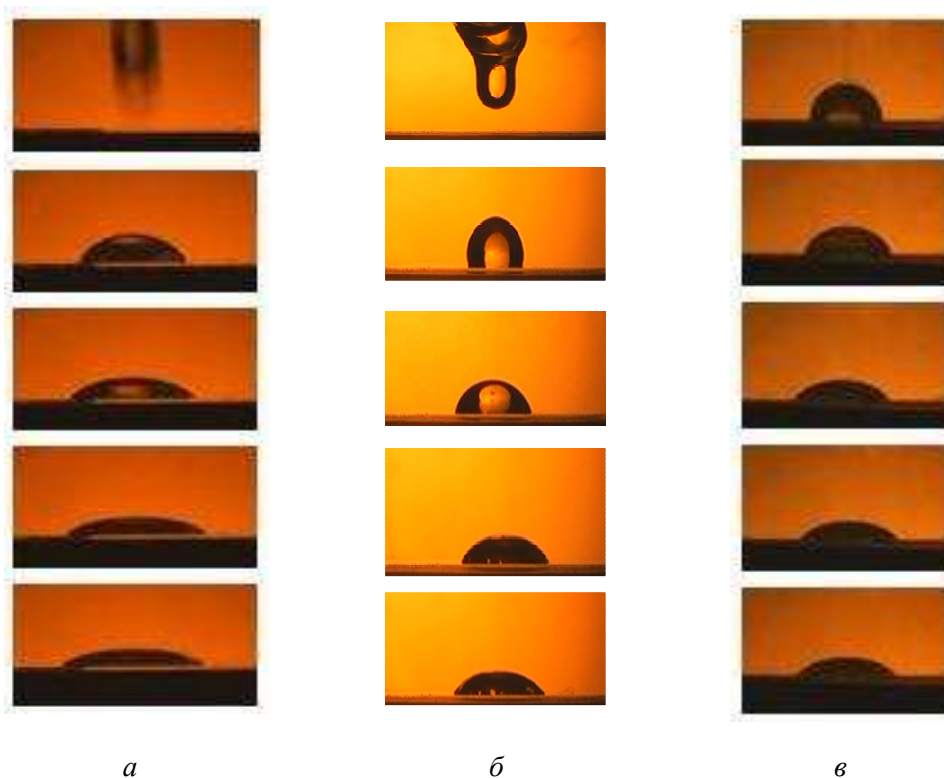


Рис. 5. Відеограми змочування та розтікання на повітрі для систем: *a* — скло—оливкова олія ( $\tau = 265$  с,  $\theta = 26^\circ$ ); *б* — парафіноване скло—оливкова олія ( $\tau = 356$  с,  $\theta = 36^\circ$ ); *в* — скло—рицинова олія ( $\tau = 1500$  с,  $\theta = 40^\circ$ )

Fig. 5. Wetting and spreading videograms in the air atmosphere for some systems: *a* — glass—olive oil ( $\tau = 265$  s,  $\theta = 26^\circ$ ); *б* — paraffined glass—olive oil ( $\tau = 356$  s,  $\theta = 36^\circ$ ); *в* — glass—castor oil ( $\tau = 1500$  s,  $\theta = 40^\circ$ )

вितискання водно-спиртового розчину олією (олія краще змочує парафіноване скло, ніж водно-спиртовий розчин (рис. 3, *a*) і рух міжфазової границі до встановлення рівноважної форми краплі олії на склі під шаром водного спиртового розчину з кінцевим кутом змочування близько  $27^\circ$ . Процес триває приблизно 5,3 с. Додамо, що крива 1 на рис. 7 відповідає краплі такої самої олії, що знаходилась у стані невагомості (плавала в об'ємі розчину) і контактувала з парафінованою підкладкою [4]. Відмінність у ході кривих обумовлена, очевидно, головним чином різними капілярними властивостями вивчених систем, зокрема відмінністю міжфазових енергій на відповідних границях розділу (див. схему на рис. 2, *b*) і також густин застосованих водно-спиртових розчинів, аніж відмінністю у силах тяжіння для даних двох випадків.

Для систем з рициновою олією (досліди проводили за умов дуже повільного падіння краплі — "мікрогравітації"), незважаючи на близькість крайових кутів змочування для підкладок із скла та парафінованого скла на повітрі (рис. 3, *b*), спостерігається значна відмінність у величинах кутів та кінетиці розтікання для підкладок обох видів при використанні водно-спиртового розчину (рис. 8, 9). Рицинова олія практично не змочує скляну підкладку ( $\theta = 139^\circ$ ,  $\tau = 25$  хв). У той же час парафіноване скло добре змочується цією олією ( $\theta = 27^\circ$ ,  $\tau = 2$  хв). Цей результат свідчить про комбінований вплив оточуючого краплю середовища (заміна повітря на водно-спиртовий розчин з відповідною зміною міжфазових та поверхневих енергій) та високої в'язкості рицинової олії на процеси змочування та розтікання.

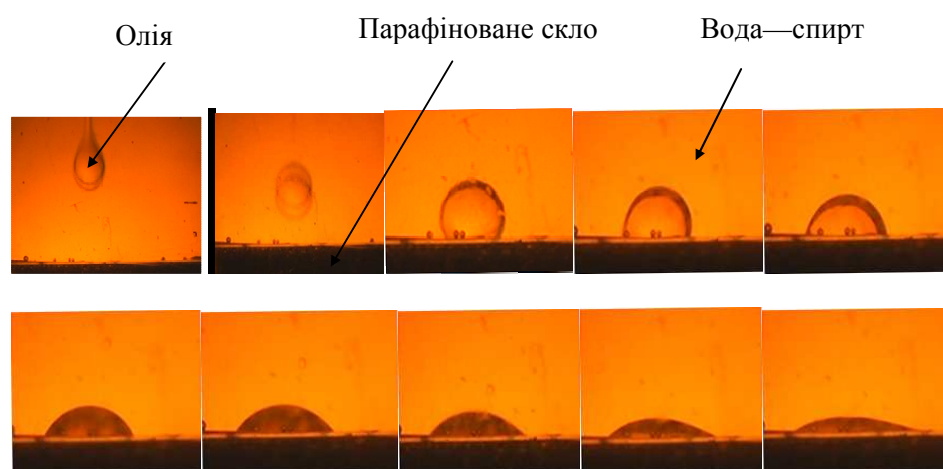


Рис. 6. Кінетика розтікання у системі олія—парафіноване скло/вода—спирт (для випадку зниженої у порівнянні із земною сили тяжіння) ( $\tau = 5,3$  с,  $\theta = 27^\circ$ )

Fig. 6. Spreading kinetics in the olive oil—paraffined glass—water/ethanol system (under decreased (in comparison with terrestrial) gravity state) ( $\tau = 5,3$  s,  $\theta = 27^\circ$ )

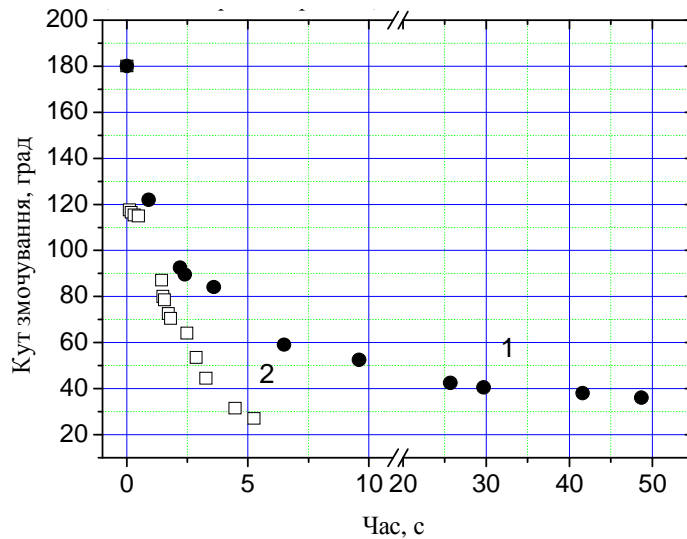
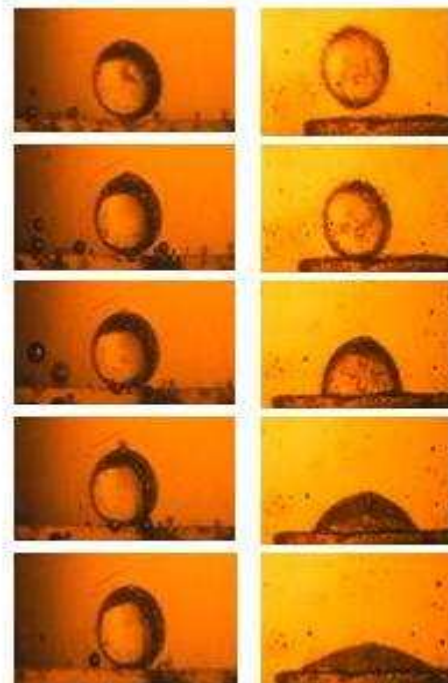


Рис. 7. Змочування у системі парафіноване скло—оливкова олія (водно-спиртовий розчин) за умов невагомості/мікрогравітації (1) та зниженої у порівнянні із земною сили тяжіння (2)

Fig. 7. Wetting kinetics in the olive oil—paraffined glass—water/ethanol solution system under microgravity/zero-gravity state (1) and under decreased (in comparison with terrestrial) gravity state (2)

Рис. 8. Змочування у системах:  
*a* — вода/спирт—рицинова олія—скло ( $\tau = 1300$  с,  $\theta = 139^\circ$ );  
*б* — вода/спирт—рицинова олія—парафіноване скло ( $\tau = 120$  с,  $\theta = 27^\circ$ )

Fig. 8. Wetting kinetics for: *a* — water/ethanol—castor oil—glass ( $\tau = 1300$  s,  $\theta = 139^\circ$ ); *б* — water/ethanol—castor oil—paraffined glass ( $\tau = 120$  s,  $\theta = 27^\circ$ ) systems





б

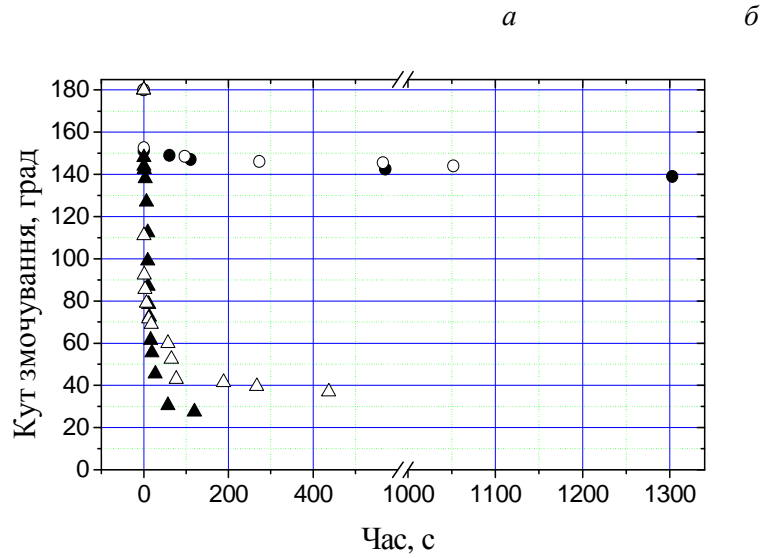


Рис. 9. Кінетика змочування у системах вода/спирт—рицинова олія—скло (●, ○), вода/спирт—рицинова олія—парафіноване скло (△,▲): ●, ○, △,▲ — окремі досліді

Fig. 9. Wetting kinetics for: water/ethanol—castor oil—glass (●, ○), water/ethanol—castor oil—paraffined glass (△,▲): ●, ○, △,▲ — separate experiments

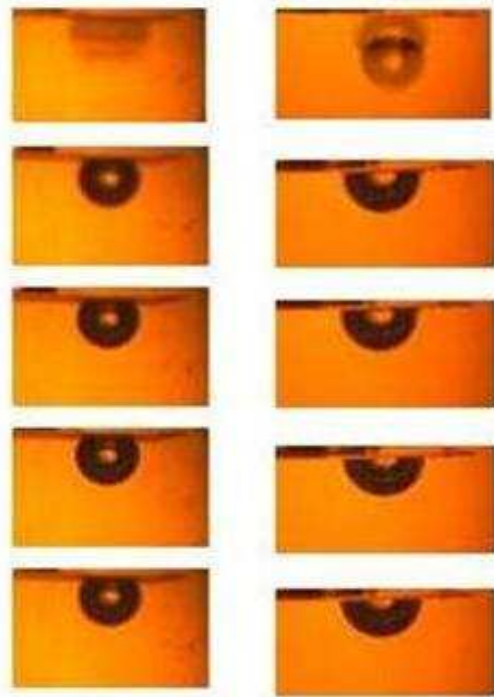


Рис. 10. Відеограми (зверху вниз) прилипання пухирців гелію до: а — скла (час витримки  $\tau = 316$  с,  $\theta = 127^\circ$ ); б — парафінованого скла ( $\tau = 293$  с,  $\theta = 80^\circ$ ) у водному середовищі

Fig. 10. Videograms (top-down) of helium gas bubbles sticking to: а — glass support (exposure time  $\tau = 316$  s,  $\theta = 127^\circ$ ); б — paraffined glass ( $\tau = 293$  s,  $\theta = 80^\circ$ ) in the aqueous medium

*a*

*б*

Отримані результати показали, що підбором контактуючих з рідинами твердих елементів з відповідною змочуваністю можна збирати та видаляти краплі олії (олійної емульсії) із розчину, котрий погано змочує зазначену підкладку, або видаляти газові пухирці з метою очищення рідин. Для ілюстрації останнього проведено досліди, в яких пухирці газу (гелію) підводились за допомогою скляного капіляра під скляну підкладку та підкладку, покриту парафіном (рис. 10, *a*, *б* відповідно), котрі знаходились у воді. Як видно на рис. 10, *a*, пухирець газу утворює при контакті зі скляною підкладкою у воді контактний кут близько  $127^\circ$  (тобто вода добре змочує скло), тоді як при контакті з парафінованою скляною підкладкою контактний кут складає  $80^\circ$  (тобто вода погано змочує парафін). Очевидно, що у першому випадку пухирець газу є нестійким на поверхні скла та погано прилипає до нього, а у другому — прилипання буде досить міцне і пухирець може бути вилучений із води.

### **Висновки**

Розроблено та виготовлено спеціальний універсальний випробувальний стенд, котрий дозволяє проводити експериментальне вивчення за різними методами процесів змочування та розтікання у низькотемпературних модельних системах тверде тіло—рідина—газ, рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub>, що імітують умови невагомості/мікрогравітації.

Методом лежачої краплі на повітрі вивчено процеси змочування рідинами поверхонь твердих тіл для ряду контактних модельних пар: оливкова, рицинова олія—скло, парафіноване скло; вода—скло; парафіноване скло; вода/етанол—скло, парафіноване скло. Знайдено, що найгірше змочування демонструє система парафіноване скло—вода з крайовим кутом змочування близько  $90^\circ$ , а найкраще змочування характерне для системи скло—вода/спирт з крайовим кутом  $\sim 10^\circ$ .

З урахуванням отриманих даних для окремих контактних пар методом відеозйомки вивчено у динаміці особливості змочування та розтікання при контакті рідини з твердою поверхнею (скло, парафіноване скло), зануреною у другу рідину (вода, водно-спиртовий розчин), що не зміщується з першою та має густину, котра дорівнює чи близька до такої для зазначеного розчину (імітуючи у такий спосіб стан мікрогравітації/невагомості) на міжфазовій поверхні рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub>.

Отримані результати — зокрема, різні та досить сильно відмінні ступені змочування та швидкості переміщення міжфазової поверхні рідина—тверде тіло для деяких контактних пар, можуть знайти практичне застосування, наприклад, для моделювання і вивчення цілеспрямованого капілярно-транспортного переносу рідин та їх очищення за умов мікрогравітації і також при розробці відповідних космічних технологічних процесів.

РЕЗЮМЕ. Для ряда контактных модельных пар: оливковое, касторовое масло—стекло, парафинированное стекло; вода—стекло; парафинированное стекло; вода/этанол—стекло, парафинированное стекло методом лежащей капли на воздухе проведены исследования смачиваемости. С учетом полученных

видеосъемкою данных изучены в динамике особенности смачивания и растекания для жидкости (масло), контактирующей с твердой поверхностью (стекло, парафинированное стекло), погруженной в другую жидкость (вода, раствор вода/этанол), которая не смешивается с первой и имеет плотность, равную таковой для указанного раствора (имитируя таким образом состояние микрогравитации-невесомости), на границе раздела жидкость<sub>1</sub>—твердое тело—жидкость<sub>2</sub>. Полученные результаты могут иметь некоторые практические применения, в частности, для моделирования и изучения капиллярно-транспортных процессов, разделения и очистки жидкостей в условиях микрогравитации и разработки соответствующих космических технологий.

**Ключевые слова:** смачивание, растекание, парафинированное стекло, межфазная граница, несмешивающиеся жидкости, микрогравитация, моделирование.

1. *Найдич Ю. В.* Форма поверхности жидкости и капиллярные явления при пониженном ускорении силы тяжести или в невесомости применительно к проблемам космического материаловедения (технология порошковой металлургии: пропитка, жидкофазное спекание, сварка, пайка) / [Ю. В. Найдич, В. А. Евдокимов, Д. И. Куркова и др.] // *Космічна наука і технологія*. — 2004. — 9, № 3. — С. 59—67.
2. *Найдич Ю. В.* Контактные явления в металлических расплавах. — К. : Наук. думка, 1972. — 196 с.
3. *Найдич Ю. В.* Кінетика змочування та розтікання Ni та NiPd розплавів по поверхнях карбиду кремнію та скловуглецю / Ю. В. Найдич, М. Ф. Григоренко, В. В. Полуянська // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. — 1999. — Вып. 34. — С. 18—26.
4. *Григоренко М. Ф.* Дослідження змочування та кінетики розтікання у деяких модельних системах з фізичним типом взаємодії / Н. Ф. Григоренко, Е. П. Черниговцев, В. В. Полуянська // Там же. — 2012. — Вып. 45. — С. 48—54.

Надійшла 08.08.14

**Grigorenko M., Chernigovtsev E.**

#### **CAPILLARY PHENOMENA STUDIES AT LIQUID<sub>1</sub>—SOLID—LIQUID<sub>2</sub> INTERPHASE USING MODEL SYSTEMS IMITATING MICROGRAVITY/ZERO—GRAVITY STATES**

For a number of contacting model pairs: olive, castor oil—glass, paraffined glass; water—glass; paraffined glass; water/ethanol—glass, paraffined glass wetting studies in the air atmosphere were performed by a sessile drop method. Taking into account data obtained wetting and spreading peculiarities were studied in dynamics by video filming for liquid (oil) contacting with solid surface (glass, paraffined glass) immersed in another liquid (water, water-ethanol solution) immiscible with the first one and having density equal to that of said solution (thus imitating microgravity/zero-gravity state) — at liquid<sub>1</sub>—solid—liquid<sub>2</sub> interface. The results obtained can have some practical application in particular for modeling and studying the processes of purposeful liquid capillary transportation, liquids separation and purification at microgravity conditions and development of appropriate space technologies.

**Keywords:** wetting, spreading, paraffined glass, interphase, immiscible liquids, microgravity, modeling.