

І. І. Габ, Т. В. Стецюк, Б. Д. Костюк*

**МЕТОДИЧНО-АПАРАТУРНА РОЗРОБКА ДЛЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМОЧУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ
НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИМИ РІДИНАМИ
В ЗЕМНИХ УМОВАХ ТА ПРИ ДІЇ МІКРОГРАВІТАЦІЇ
НА БОРТУ МКС**

Розроблено методику вимірювання крайових кутів змочування низькотемпературними рідинами твердих поверхонь неметалевих матеріалів та металів, як в земних умовах, так і в умовах мікрогравітації на борту МКС. Розроблено та виготовлено стенд для виконання досліджень за даною методикою.

Ключові слова: методика, мікрогравітація, крайовий кут змочування, низькотемпературна рідина, МКС.

Вступ

Явище змочування твердого тіла рідиною — особливо важливий фактор у перебігу капілярних явищ. Нагадаємо, що ступінь змочування характеризується крайовим кутом змочування, що утворюється між поверхнею рідини (площина, дотична до поверхні) та поверхнею твердого тіла у точці дотику поверхонь. Коли $\Theta < 90^\circ$ — рідина змочує тверде тіло; якщо $\Theta > 90^\circ$ — має випадок незмочування. Крайовий кут визначається сукупністю поверхневих енергій границь розділу рідина—газ, рідина—тверде тіло, тверде тіло—газ.

В теорії капілярності фундаментальним законом є рівняння для крайового кута змочування Θ

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{\text{тг}} - \sigma_{\text{тр}}}{\sigma_{\text{рг}}}, \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{тг}}$, $\sigma_{\text{тр}}$, $\sigma_{\text{рг}}$ — поверхневі енергії на межах розділу тверде тіло—газ, тверде тіло—рідина, рідина—газ відповідно.

Цей закон було сформульовано біля 200 років тому (Юнг, 1804 р. [1]); незважаючи на широке користування ним у практиці, до теперішнього часу точиться дискусія щодо його справедливості. Зокрема, багато заперечень стосується можливої залежності крайового кута змочування від гравітації, яка у явному вигляді у рівняння не входить. Сумніви з цього приводу висловлювали ряд вчених [2—4].

* І. І. Габ — кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ; Т. В. Стецюк — науковий співробітник цієї ж установи; Б. Д. Костюк — кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник цієї ж установи.

Експерименти російських вчених на космічних апаратах “Салют-6” та “Союз” [5] теж можуть бути інтерпретовані як такі, що свідчать на користь деякого впливу гравітації на крайовий кут змочування.

Експериментально стан зниженої дії гравітації аж до невагомості можна моделювати в земних умовах кількома методами. В наших раніше виконаних дослідженнях було обрано метод лежачої краплі на плоскій поверхні твердої фази і варіювання об'єму краплі (зменшення), в якій дія гравітації становить малу величину порівняно з дією поверхневих та капілярних властивостей [6—8]. Крайовий кут залишався незмінним при зменшенні такої штучної гравітації $g = g_0$ ($9,8 \text{ м/с}^2$) до $g \sim 0,1g_0$.

Для перевірки правдивості рівняння Юнга необхідно виконати комплекс досліджень зі змочування низькотемпературними рідинами твердих поверхонь за єдиною методикою в земних умовах та в умовах дії мікрогравітації на борту міжнародної космічної стації (МКС). В даній роботі наведено результати таких досліджень.

Методично-апаратурна розробка

Стенд для дослідження змочування краплями низькотемпературних рідин твердих поверхонь на Землі та в умовах МКС

Під низькотемпературними рідинами в даному випадку слід розуміти звичайні рідини, зокрема воду, гліцерин та деякі інші при кімнатній температурі (18—20 °С). Ці рідини погано змочують такі матеріали, як кварцове скло, сапфір та інші, і будуть утворювати на підкладках з наведених матеріалів чітко окреслені краплі, які можна буде фіксувати за допомогою цифрової фотокамери. За контурами краплі та підкладки можна буде визначити крайовий кут змочування Θ підкладок рідинами.

Для визначення крайових кутів змочування різними рідинами твердих поверхонь неметалевих та металевих підкладок, як на Землі, так і на МКС, був розроблений та виготовлений працюючий макет спеціального стенду (рис. 1).

Раніше нами був розроблений для цих цілей стенд, що описаний у роботі [9], але він виявився досить громіздким, важким та недосконалим, а це робить неможливим його використання на борту МКС. Розроблений зараз стенд є доволі компактним, легким та вдосконалим, що може забезпечити подавання рідини на поверхню зразка з високою точністю як зверху, так і знизу через отвір в центрі зразка. Даний стенд має габарити 315 x 210 x 290 мм та важить 1,9 кг.

Стенд являє собою основу 1 (рис. 2) у вигляді пластини завтовшки 3 мм, виконаної з легких сплавів на основі алюмінію (дюраль та ін.), на якій змонтовано всі вузли та деталі самого стенду. На основі встановлена цифрова фотокамера 3 за допомогою кріплення 2, яке дозволяє фіксувати камеру нерухомо, а також і переміщувати її вздовж паза в основі для наведення на об'єкт для отримання чіткого зображення краплі на підкладці. Безпосередньо на основі закріплений вузол подавання рідини знизу 14. Підкладка 6 з краплею 5 розміщені на столику, який нерухомо закріплений на основі. Столик з підкладкою та краплею закритий від зовнішнього середовища негерметичним футляром 4 з органічного скла,

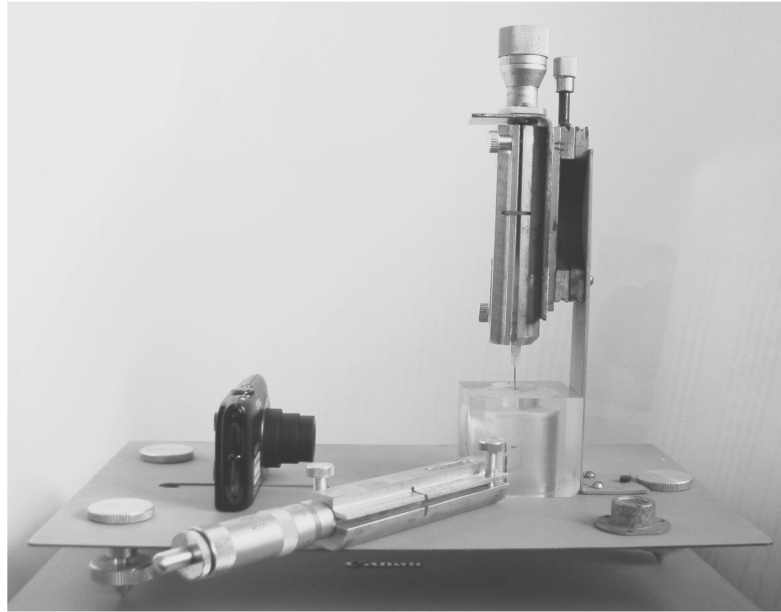


Рис. 1. Загальний вигляд випробувального стенда для визначення крайового кута змочування низькотемпературними рідинами твердих поверхонь

Fig. 1. General view of stand for contact wetting angle measurement during wetting of firm surfaces by low temperature liquids

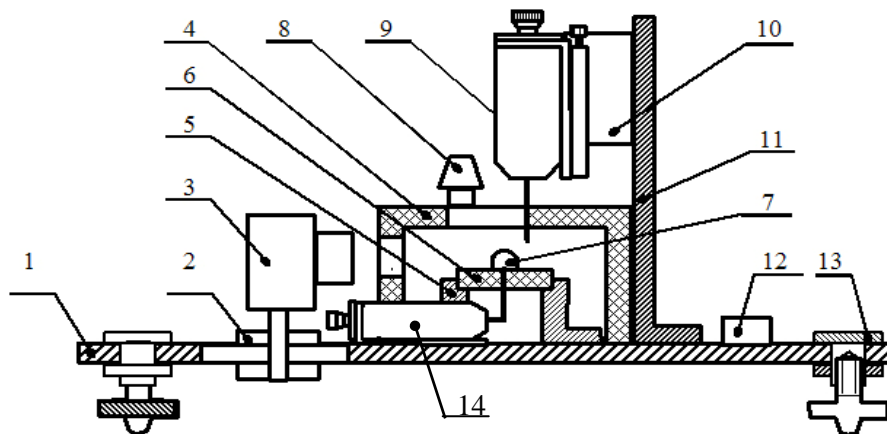


Рис. 2. Схема випробувального стенда для визначення крайового кута змочування низькотемпературними рідинами твердих поверхонь: 1 — основа; 2 — вузол кріплення фотокамери; 3 — цифрова фотокамера; 4 — футляр; 5 — столик; 6 — підкладка; 7 — крапля; 8 — лампочка; 9 — вузол подавання рідини зверху; 10 — вставка; 11 — кронштейн; 12 — рівень; 13 — регулюєма опора; 14 — вузол подавання рідини знизу

Fig. 2. Scheme of stand for contact wetting angle measurement during wetting of firm surfaces by low temperature liquids: 1 — basis; 2 — photocamera fastening assembly; 3 — digital photocamera; 4 — case; 5 — table; 6 — lining; 7 — drop; 8 — bulb; 9 — liquid supplying assembly from top; 10 — insert; 11 — bracket; 12 — level; 13 — support; 14 — liquid supplying assembly from below

який має отвори для фотографування краплі та для попадання на нього світла від освітлювача 8. Ці отвори закриті прозорими вікнами із оптичного скла, а крім них, є ще отвір для голки шприцу, яка може діставатися до поверхні самої підкладки. На металевому кронштейні 10, виконаному з легкого металевого сплаву, зокрема дюралі, і нерухомо закріпленому на основі 1, прикріплений вузол подавання рідини зверху 9. Безпосередньо на основі закріплений вузол подавання рідини знизу 14. Він може бути більш ефективним при проведенні досліджень на борту МКС, оскільки є побоювання, що за відсутності дії гравітації крапля рідини не зможе відокремитися від голки шприцу за рахунок дії капілярних сил при подаванні рідини зверху на поверхню підкладки. Для проведення досліджень в земних умовах більш зручним є вузол подавання рідини на зразок зверху. Тому що у цьому випадку крапля рідини повністю відокремлена від голки шприцу і під краплею знаходиться суцільна поверхня підкладки без отвору, де розташована голка шприцу зі стовпчиком рідини в ній, який контактує з краплею. Основа стенду має три рухомі опори 13, які дають можливість встановлювати її, а відповідно, і столик, який нерухомо з нею зв'язаний, в горизонтальній площині, що контролюється рівнем 12.

Вузол подавання рідини зверху (рис. 3) складається зі шприца 2 з голкою 7, розміщеного в дюралевому корпусі 1, який нерухомо з'єднаний з кронштейном 5 і механізмом переміщення цього вузла вгору—вниз. Механізм переміщення також нерухомо зв'язаний з кронштейном 11 (рис. 2), а зверху на кронштейні 5 (рис. 3) нерухомо встановлений мікрометричний гвинт 3, який, переміщуючи поршень шприца, дає змогу з великою точністю дозовано подавати рідину зі шприцу на підкладку. Механізм переміщення вузла подавання рідини в вертикальному напрямленні вниз—вгору дає можливість опускати весь вузол вниз до зіткнення голки шприца з поверхнею підкладки. Після цього обертанням мікрометричного гвинта на підкладці формується крапля рідини потрібного об'єму, а по завершенні цього формування весь вузол піднімається вгору і крапля рідини, таким чином, залишається на підкладці вільно від голки шприца.

Корпус вузла 1 роз'ємний і складається з двох половин, які з'єднані між собою двома гвинтами. Це дає можливість швидко замінювати шприци з рідинами. Для цього достатньо, відкрутивши два невеликих гвинти, відокремити передню частину корпусу, вийняти шприц із другої частини корпусу, яка нероз'ємно з'єднана з механізмом переміщення вузла, встановити новий шприц, закрити його передньою частиною корпусу і закріпити тими ж самими гвинтами.

Вузол подавання рідини знизу має таку ж саму конструкцію, за винятком відсутності механізму переміщення вузла та загнutoї догори голки шприца, яка має входити в отвір, розташований в центрі зразка.

***Методика визначення крайових кутів змочування
низькотемпературними рідинами твердих металевих та неметалевих
поверхонь на Землі та в космосі***

Перед проведенням дослідів робочі поверхні підкладок знежирюють очищеним бензином, потім етиловим спиртом, після чого промивають дистильованою водою й висушують на повітрі при кімнатній температурі.

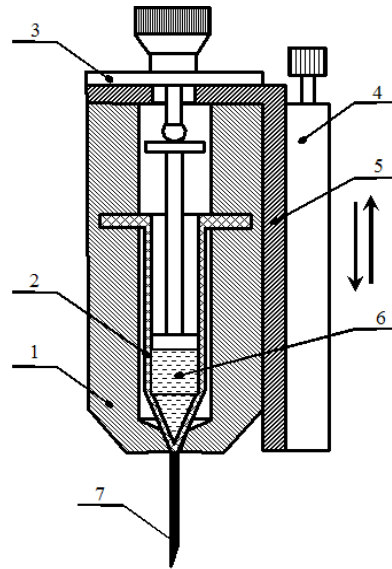


Рис. 3. Вузол подавання рідини зверху: 1 — корпус; 2 — шприц; 3 — мікрометричний гвинт; 4 — механізм переміщення вузла подавання рідини; 5 — кронштейн; 6 — рідина; 7 — голка шприца

Fig. 3. Liquid supplying assembly from top: 1 — frame; 2 — syringe; 3 — micrometric screw; 4 — mechanism of submission liquid unit moving; 5 — bracket; 6 — liquid; 7 — syringe needle

Необхідну рідину засмоктують у шприц за допомогою дуже тонкого кембрику або безпосередньо голкою з невеликого флакона, закритого гумовою пробкою.

Предметний столик станда, на якому будуть міститися підкладки досліджуваних матеріалів, перед початком роботи горизонтують по рівню шляхом обертання маховиків механізмів регулювання рівня робочого стола станда, встановлених на кожній із трьох опор стола.

У випадку використання рідин, що не змочують поверхню зразків досліджуваних матеріалів, вивчення змочування матеріалів рідинами на повітрі роблять наступним способом. Заповнюють шприц обраною для дослідження рідиною та розміщують його у вузлі подачі рідини. На відгоризнтованому за рівнем предметному столику розміщують знежирену підкладку й накривають його кришкою з оргскла. Приводять у робочий стан цифрову фотокамеру і настроюють фотоапарат на центр підкладки, забезпечивши максимальну чіткість зображення й установивши на фотоапараті обране збільшення зображення профілю краплі рідини.

Фіксують температуру й вологість повітря в приміщенні. Після чого, повільно обертаючи мікрометричний гвинт механізму переміщення вузла подавання рідини, опускають його вниз до зіткнення голки шприца з підкладкою. Потім подають мінімальну порцію рідини в центр підкладки, створивши на ній краплю діаметром менше міліметра, що буде у деякій мірі імітувати знаходження її в умовах зниженої гравітації. Після цього вузол подавання рідини переміщують вгору так, щоб голка шприца не торкалась ні краплі, ні підкладки. Краплю фотографують, чекають 5 хв і знову фотографують. Потім знову опускають шприц до зіткнення його з підкладкою, додають в краплю рідини, збільшуючи її діаметр на 1 мм, після чого піднімають шприц, роблять зйомку краплі і знову повторюють всі операції до отримання краплі діаметром до 10—15 мм, що відповідає об'єму приблизно 1 см³.

Для кожної системи тверде тіло—рідина таких циклів потрібно виконати не менш 10 для отримання статистично обґрунтованих даних. Зображення крапель з флеш-карти цифрового фотоапарату вводять в комп'ютер, після чого їх роздруковують на звичайний або спеціальний папір і потім роблять по відбитках вимір крайових кутів змочування.

При використанні вузла подавання рідини знизу виконують ті самі операції, за винятком операції переміщення вузла, а зігнута під кутом 90° голка входить знизу в отвір зразка так, що торець голки знаходиться на рівні поверхні зразка. При зміні виду досліджуваної рідини міняють шприц разом з голкою.

При проведенні досліджень на МКС виконуються ті ж самі операції і в такій же послідовності, як на Землі. Всі підкладки, шприци та флакони з рідинами готують на Землі, маркують та ретельно пакують. При необхідності для запобігання прилипання краплі до голки шприца поверхню останньої можна вкрити тонким шаром органічної або неорганічної сполуки, яку крапля змочує гірше, ніж матеріал підкладки. Космонавту надається детальна інструкція, яким чином і в якій послідовності розміщувати на стенді підкладки та шприци з рідинами. Крім того, космонавту слід фіксувати в робочому журналі відповідність кадрів зйомок та нумерації підкладок і рідин. Інформація про досліди може бути частково передана на Землю дистанційно, а загалом вся наукова інформація має бути повернена на Землю при першій можливості. Дані, які були отримані на Землі та МКС, порівнюють та аналізують, після чого можна робити висновок, чи впливає гравітація на кут змочування рідинами твердих поверхонь чи ні.

Висновки

Розроблено методику для дослідження змочування низькотемпературними рідинами твердих неметалевих поверхонь в земних умовах та під дією мікрогравітації на борту МКС. Створено відповідний стенд для проведення досліджень за розробленими методиками.

РЕЗЮМЕ. Разработана методика измерения краевых углов смачивания низкотемпературными жидкостями твердых поверхностей неметаллических материалов и металлов, как в земных условиях, так и в условиях

микрогравитации на борту МКС. Разработан и изготовлен стенд для проведения исследований по данной методике.

Ключевые слова: методика, микрогравитация, краевой угол смачивания, низкотемпературная жидкость, МКС.

1. Young T. An essay on the cohesion of fluids // Phil. Trans. R. Soc. Lond. — 1805. — 95. — P. 65—87.
2. *Proceedings of the Second International Congress on Surface Activity*. — Butterworth, London. — 1957. — III. — P. 131.
3. Adamson A. W. *Physical Chemistry of Surfaces*. 5th ed. — NY: Wiley. — 1990. — 777 p.
4. Bikerman J. J. *Contribution to the thermodynamics of surfaces*. — Publ. by Author, Cambridge. — 1961. — 40 p.
5. Будуров С. Й. Определение углов смачивания в условиях микрогравитации / [П. А. Петров, П. Д. Ковачев и др.] // *Материаловедение и технология*. — М.: Наука, 1985. — С. 64—66.
6. 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) / [И. И. Габ, В. А. Евдокимов и др.] // *Космічна наука і технологія*. — 2004. — № 2/3. — С. 59—67.
7. Найдич Ю. В. Форма поверхности жидкости и капиллярные явления при пониженном ускорении силы тяжести или в невесомости / [И. И. Габ, В. А. Евдокимов и др.] // *Порошковая металлургия*. — 2004. — № 3/4. — С. 70—79.
8. Габ И. И. Исследование смачивания водой поверхностей твердых неорганических и органических материалов в зависимости от объема капель / [Т. В. Стецюк, Д. И. Куркова и др.] // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. — 2004. — Вып. № 37. — С. 31—39.
9. Габ И. И. Аппаратура и методика исследования смачивания твердых тел жидкостями при непрерывном изменении объема капли с компьютерным измерением краевых углов смачивания / [Т. В. Стецюк, Д. И. Куркова] // *Там же*. — 2003. — Вып. № 36. — С. 87—91.

Надійшла 11.07.12

Gab I. I., Stetsyuk T. V., Kostyuk B. D.

Methodical and apparatus development for research of solid bodies wetting by low temperature liquids in terrestrial conditions and under microgravitation action, in particular onto ISS

The method of measurement of wetting contact angle of nonmetallic materials and metals solid surfaces by low temperature liquids both in terrestrial conditions, and in conditions of microgravitation onboard ISS is developed. Stand for wetting investigation under this method was created.

Keywords: method, microgravitation, wetting contact angle, low temperature liquid, ISS.