



DOI 10.31110/2413-1571-2022-033-1-001

УДК 37.016:53

ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ ВІДРИВУ ДИСКА ВІД РІДИНИ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Валерій ЗДЕЩИЦ

Криворізький державний педагогічний університет,
 Кривий Ріг, Україна
 valeriy.zdeschits@kdpu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-2404-8979>

Анастасія ЗДЕЩИЦ

Криворізький державний педагогічний університет,
 Кривий Ріг, Україна
 a.v.zdeschchits@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5092-6918>

Анастасія ЧЕРНИХ

Криворізький державний педагогічний університет,
 Кривий Ріг, Україна
 anastasiya2002g@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3658-260X>

MEASUREMENT OF THE SEPARATION FORCE OF THE DISC FROM THE LIQUID IN DISTANCE LEARNING CONDITIONS

Valery ZDESHCHYTS

Kyryvy Rih State Pedagogical University,
 Kyryvy Rih, Ukraine
 valeriy.zdeschits@kdpu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-2404-8979>

Anastasia ZDESHCHYTS

Kyryvy Rih State Pedagogical University,
 Kyryvy Rih, Ukraine
 a.v.zdeschchits@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5092-6918>

Anastasia CHERNYCH

Kyryvy Rih State Pedagogical University,
 Kyryvy Rih, Ukraine
 anastasiya2002g@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3658-260X>

АНОТАЦІЯ

Розглянуто методику проведення дистанційної лабораторної роботи з фізики, яка використовує саморобну дослідницьку установку для визначення функціональної залежності сили відриву диска, який дотикається до рідини плоскою поверхнею, від величини площі диску та його периметру.

Формулювання проблеми. Рівняння Юнга зв'язує кут змочування θ і коефіцієнти поверхневого натягу σ на межі середовищ. З цього рівняння випливає, що макроскопічний параметр θ не залежить від властивостей молекул, а уявлення про силове поле між молекулами враховується тільки на лінії їх розмежування. Тому студенти роблять помилковий висновок, що сили міжмолекулярної взаємодії діють тільки на лінії розмежування середовищ. Отже, виконання лабораторної роботи за вищенаведеною тематикою вирішує цю проблему.

Матеріали і методи. Поставлена мета: визначення функціональної залежності сили відриву диска, який доторкається до рідини плоскою поверхнею, від величини площі диску, наявності в ньому отворів та його периметру – вирішувалася за допомогою розробленої дослідницької установки. Для вимірювання величини сили відриву використовувався метод важеля.

Результати. Залежність сили відриву від периметра диска (лінії розмежування рідини і твердого тіла) виявилася нелінійною і прямо пропорційною змоченої площі. Коефіцієнт пропорційності склав величину $\beta \approx 40 \text{ N} / \text{m}^2$.

Висновки. 1) Сила відриву диска від поверхні води непропорційна периметру диску. Це доводить той факт, що поверхневий натяг рідини як особлива реально діюча сила себе у цьому досліді не проявляє. 2) Незмінність величини сили відриву одного і того ж диска при збільшенні кількості виконаних в ньому отворів і залежність сили відриву тільки від площі поверхні цільного диска доводить той факт, що в утриманні диска беруть участь всі молекули, що знаходяться в контактному шарі диска і рідини.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дистанційне навчання; лабораторна робота; поверхневий натяг; сила відриву.

ABSTRACT

The method of remote laboratory work in physics is considered, which uses a self-made research installation to determine the functional dependence of the force of separation of the disk that touches the liquid with a flat surface, from the size of the disk area and its perimeter.

Formulation of the problem. Jung's equation connects the wetting angle θ and the coefficients of surface tension σ at the limit of the environments. It follows from this equation that the macroscopic parameter θ does not depend on the properties of molecules, and the idea of the force field between molecules is taken into account only on the line of their delimitation. Therefore, students erroneously conclude that the intermolecular force act only on the line of delimitation of environments. Thus, the implementation of laboratory work on the above topics solves this problem.

Materials and methods. The goal: to determine the functional dependence of the separation force of the disk that touches the liquid with a flat surface from the size of the disk area, the presence of holes in it, and its perimeter - was solved by using a developed research installation. To measure the value of the separation force the lever method was used.

Results. The dependence of the separation force from the perimeter of the disk (the line between the liquid and solid) was nonlinear and directly proportional to the wetted area. The coefficient of proportionality was $\beta \approx 40 \text{ N} / \text{m}^2$.

Conclusions. 1) The force of separation of the disk from the water surface is disproportionate to the perimeter of the disk. This proves the fact that the surface tension of the fluid as a special real acting force does not express itself in this experiment. 2) The invariance of the value of the separation force of the same disk with an increasing number of holes made in it and the dependence of the separation force only on the surface area of the entire disk proves the fact that all the molecules contained in the contact layer of disk and liquid take part in holding the disk.

KEYWORDS: distance learning; laboratory work; surface tension; separation force.

Для цитування:

Здещич В., Здещич А., Черних А. Вимірювання сили відриву диска від рідини в умовах дистанційного навчання. *Фізико-математична освіта*, 2022. Том 33, № 1. С. 7-13. DOI: 10.31110/2413-1571-2022-033-1-001

Zdeschchits, V., Zdeschchits, A., & Chernych, A. (2022). Vymiruvannya sily vidryvu dyska vid ridyny v umovakh dystantsiynogo navchannya. *Fiziko-matematichna osvita*, 33(1), 7-13. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2022-033-1-001>

For citation:

Zdeschchits, V., Zdeschchits, A., & Chernych, A. (2022). Vymiruvannya sily vidryvu dyska vid ridyny v umovakh dystantsiynogo navchannya [Measurement of the separation force of the disc from the liquid in distance learning conditions]. *Fiziko-matematichna osvita – Physical and Mathematical Education*, 33(1), 7-13. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2022-033-1-001>

ВСТУП

Постановка проблеми. Класична теорія явищ на межі рідини і твердого тіла базується на двох константах: коефіцієнті поверхневого натягу рідини σ і куті змочування рідиною твердого тіла θ . Однак ці "константи" залежать від цілого ряду додаткових обставин. Так, на величину конкретного кута змочування впливає більше десятка параметрів (Горюнов & Сумм, 1976). Цей кут залежить від суперпозиції ряду явищ і процесів і повинен бути кінцевим результатом обчислення, що відображає реакцію рідини на суму всіх зовнішніх впливів, а не основою для подальших розрахунків.

Під час викладання студентам навчального матеріалу нюанси визначення кута, як правило, випадають з розгляду, і в більшості випадків завдання зводяться до варіантів повного змочування або повного не змочування поверхонь; складна крива поверхні рідини в капілярі замінюється сферичною, а при розгляді рівноваги краплі на поверхні в якості незалежної змінної величини вводиться площа основи краплі, що обчислюється з її радіусу. Витоки таких спрощень лежать в способі отримання відомого рівняння Юнга (1804 р.), що зв'язує кут змочування θ і коефіцієнт поверхневого натягу σ на межі середовищ (Ландау & Лифшиц, 1964):

$$\cos \theta = (\sigma_{SG} - \sigma_{SL}) / \sigma_{LG}, \quad (1)$$

де нижні пари індексів відносяться до пар речовин, які контактують, на межі між якими вимірюється або обчислюється поверхневий натяг; S – тверда поверхня; L – рідина; G – газ.

Як видно з цього рівняння макроскопічний параметр θ_0 не залежить від властивостей молекул, а уявлення про силову поле між молекулами враховується тільки на лінії їх розмежування. Тому з постановки і трактування результатів експериментів по визначенню коефіцієнта поверхневого натягу рідини студенти роблять помилковий висновок, що сила діє тільки по лінії змочування. Взаємодія всіх інших молекул рідини і твердого тіла на контактуючих поверхнях з їх поля зору випадає. Це є дидактичною проблемою, і цей підхід до вивчення адгезії та когезії речовин (без урахування досить суттєвих поправок) треба виправляти.

Роль об'ємних і поверхневих сил при взаємодії рідини з твердим тілом можна з'ясувати, провівши два досліди: 1) з вимірювання величини сили відриву поверхні плоского тіла від рідини та 2) з ниткою у вигляді петлі. Простота постановки дослідів, можливість копіювання розробленого нами обладнання, доступність матеріалів дозволяє студентам досліджувати явища на межі двох середовищ не тільки в лабораторних умовах, а й дистанційно.

Аналіз актуальних досліджень. Розуміння міжмолекулярних взаємодій є ключовим для досягнення контролю над матеріалами на молекулярному рівні. Ці знання є важливими для нанотехнологій, а також різних галузей фізики. Базою для розуміння процесів, які відбуваються при взаємодії тіл на молекулярному рівні, є термінологія. У сучасній фізиці сили, які діють між поверхнями макроскопічних тіл через третє середовище (наприклад, вакуум і пару) називають поверхневими силами, тоді як сили, які діють для утримання двох тіл при контакті називають силами зчеплення. І в тому і в іншому випадку це, більшою мірою, сили Ван-дер-Ваальса, які можуть бути притягальними, відштовхувальними або дорівнювати нулю (Fabio et al., 2012).

Під адгезією розуміють взаємодію між приведеними в контакт поверхнями двох конденсованих (рідких або твердих) фаз різної природи. Сили взаємодії між молекулами двох різних конденсованих фаз називають силами адгезії. Під когезією розуміють взаємодію молекул усередині однієї конденсованої фази, тобто когезія - це внутріфазне явище. Сили зчеплення між молекулами всередині конденсованої фази (рідина або твердого тіла) називають силами когезії. "Кількісною характеристикою адгезійних і когезійних сил є робота адгезії і когезії, відповідно. Робота когезії дорівнює енергії, яка витрачається на оборотний ізотермічний розрив тіла по перерізу, рівному одиниці площі" (Прохоров, 1984). Як бачимо, при ясному фізичному сенсі терміна адгезії як сили відриву одного середовища від іншого навіть у фізичній енциклопедії (Прохоров, 1984) наводиться його визначення через роботу зміни поверхневої енергії контактуючих тіл. Таким чином, замість прямого вимірювання сили відриву середовищ використовуються три вищезазначених непрямих значень поверхневих натягів σ_{LG} , σ_{SG} , σ_{SL} плюс кут змочування θ .

Для визначення характеристик змочування застосовується також термін сили адгезійного натягу, тобто тангенціальної сили, що діє з боку твердого тіла на одиницю довжини лінії змочування. В роботі (Jonson, 1969) зроблена спроба прямого вимірювання цієї сили в експерименті з витягування із рідини плоскої пластини, встановленої вертикально.

Необхідно відзначити, що за 217 років існування рівняння (1) не отримано достатньо повного його експериментального підтвердження (Горюнов & Сумм, 1976). У публікаціях (Bikerman, 1958) справедливості цього рівняння ставиться під сумнів. В роботі (Eid et al., 2018) доводиться вплив шорсткості та хімічного складу поверхні на форму крапель води та кут контакту θ , чого не має бути згідно рівняння (1).

Сучасні вимірювання сили взаємодії між молекулами ведуться з використанням атомно-силової мікроскопії. За допомогою такого експериментального методу, як атомна силова спектроскопія (AFS), тепер можна точно виміряти сили міжмолекулярної взаємодії, що надає інформацію про такі властивості матеріалу, як еластичність, твердість та зчеплення (Fabio et al., 2012). Ця робота містить теоретичне та експериментальне підґрунтя AFS, експериментальні результати щодо сили зчеплення, міжмолекулярних взаємодій та поверхневих сил у повітрі, вакуумі та розчині. Отже, дослідження молекулярних сил є актуальними. Тому актуальним є і підготовка фахівців в тій області науки, а також пошук більш досконалої методики представлення явищ на межі двох (або трьох) середовищ. Для цього необхідні більш ретельний аналіз відомих фактів і нові, більш досконалі методи визначення ролі об'ємних і поверхневих сил при взаємодії рідини з твердим тілом.

Мета статті. Метою статті є визначення функціональної залежності сили відриву диску, який доторкається до рідини плоскою поверхнею, від величини площі диску, наявності в ньому отворів та його периметру.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для визначення залежності коефіцієнта поверхневого натягу рідини від температури у роботі (Здешиц, 2020) застосовується метод важеля, роль якого виконує прямолінійний алюмінієвий дріт. Дріт виконує дві функції: він є вагами і водночас аналогом дрютяної рамки, яку зазвичай витягують з рідини для вимірювання коефіцієнту її поверхневого натягу. Рівень рідини встановлюють на 1-1,5 мм нижче гострого краю посудини. При торканні води дротом утворюється тонка плівка рідини завширшки L_1 (рис. 1а).

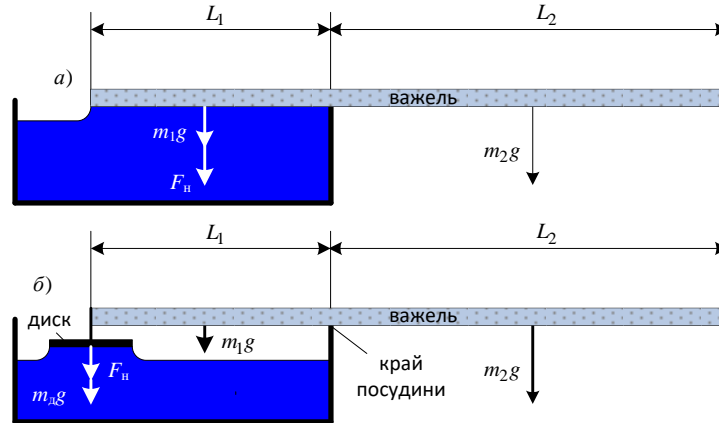


Рис. 1. Схема установки для вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу та сили відриву плоского тіла

Вздовж поверхні плівки діє сила поверхневого натягу \vec{F}_n , модуль якої дорівнює:

$$F_n = 2L_1\sigma \tag{1}$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу. Множник 2 з'являється тому, що плівка має дві поверхні.

Нехай m – маса дроту, $L = L_1 + L_2$ – довжина дроту, m/L – маса одиниці довжини дроту. Запишемо умову рівноваги дроту щодо краю посудини, тобто рівність моментів сил:

$$(F_n + m_1g) \frac{L_1}{2} = m_2g \frac{L_2}{2}. \tag{2}$$

Підставимо в (2) силу поверхневого натягу (1), маси: $m_1 = \frac{L_1m}{L}$, $m_2 = \frac{L_2m}{L}$, $m = \rho V = \frac{\rho\pi d^2 L}{4}$ і виразимо коефіцієнт поверхневого натягу σ . Тоді остаточно отримуємо розрахункову формулу:

$$\sigma = \frac{mg}{2L} \left[\left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2 - 1 \right] = \frac{\rho\pi d^2 g}{8} \frac{L}{L_1} \left(\frac{L_2}{L_1} - 1 \right). \tag{3}$$

Величини L та $L_1 = L - L_2$ вимірюються лінійкою, а діаметр дроту d – мікрометром. При відсутності мікрометра значення d визначаємо за допомогою смартфона, фотографуючі алюмінієвий дріт на фоні лінійки.

В умовах дистанційного навчання роль алюмінієвого дроту може виконувати кавова трубочка (соломинка для коктейлів) діаметром 4,8 мм. Прямолінійна ділянка трубочки – важеля складає 160 мм, маса 0,4 г. Досліди показали, що при кімнатній температурі $L_2 = 116$ мм, тобто $L_1 = 44$ мм. За формулою (3) величина $\sigma = 0,073$ Н/м, що підтверджує працездатність методу. Оскільки маса трубки невелика – чутливість методу висока. Тому цей прилад можна застосувати для розв'язання іншої задачі, а саме, вимірювання величини сили відриву поверхні плоского тіла від рідини (рис. 1б). Чому актуальна ця задача для студента, який вивчає тему поверхневого натягу рідини?

Відповідно до класичних уявлень за силову взаємодію під час відриву поверхні плоского тіла від рідини відповідають сили поверхневого натягу, і максимальна сила відриву, наприклад, плоского диска вагою $m_дg$ від поверхні рідини пропорційна периметру круга πd і поверхневому натягу σ (Григорьев, 1991):

$$F = m_дg + \pi d \cdot \sigma \cdot \cos \theta, \tag{4}$$

де θ – крайовий кут у кромки диска.

Сила відриву досягає максимального значення при вертикальному напрямку поверхні рідини, тобто коли $\theta = 0$. Взагалі кажучи, сила взаємодії повинна б залежати від властивостей кожної з речовин, які контактують, але це не відображається у формулі (4). Тому такі пояснення фізики процесу відриву плоскої поверхні від рідини студентам не зрозумілі. У загальному випадку сумарна сила відриву тіла вагою $m_дg$ повинна складатися з поверхневої сили, пропорційної периметру тіла, що виймається з рідини, і сили, що залежить від площі поверхні (Іголкин, 2007):

$$F = m_дg + k\sigma P + \beta S, \tag{5}$$

де k – поправковий коефіцієнт поверхневого натягу рідини; P – периметр, вздовж якого відбувається змочування твердого тіла; β – коефіцієнт пропорційності; S – площа змоченої поверхні.

У довідниках наведені значення коефіцієнтів поверхневого натягу рідин, які межують зі своєю парою. Коефіцієнти поверхневого натягу рідини, що межує зі своєю парою та з іншою густішою речовиною, значно різняться між

собою. Тому не можна довідкові значення використовувати без врахування умов контакту. Значення σ на межі двох рідин або на межі рідина–тверде тіло завжди менші, ніж у випадку вільної поверхні рідини, коли вона межує з власною паровою (Якібчук Клим, с. 427, 2013). Це цілком природно, оскільки молекули речовини взаємодіють з молекулами поверхневого шару рідини і послаблюють сили, які втягують молекули всередину рідини. Так, мило зменшує поверхневий натяг води. Розчин цукру, розчини різних солей збільшують поверхневий натяг рідин. Отже, коефіцієнт поверхневого натягу повинен мати два індекси, перший з яких відноситься до рідини, а інший – до середовища, з яким межує її вільна поверхня, або це враховувати, використовуючи коефіцієнт k .

Використовуючи “метод важеля” студент самотужки та, головне, дистанційно може дослідити функціональну залежність (5) від параметрів контактуючого з рідиною тіла: його площі контакту, периметру тощо. Запишемо умову рівноваги важеля (рис. 16):

$$(F_H + m_d g)L_1 + \left(\frac{L_1}{L} mg\right) \cdot \frac{L_1}{2} = \left(\frac{L_2}{L} mg\right) \cdot \frac{L_2}{2}.$$

Звідси

$$F_H \cdot L_1 = \left(\frac{L_2}{L} mg\right) \cdot \frac{L_2}{2} - \left(\frac{L_1}{L} mg\right) \cdot \frac{L_1}{2} - m_d g L_1 = \frac{mg}{2L} (L_2^2 - L_1^2) - m_d g L_1 = \frac{mg(L_2 - L_1)}{2} - m_d g L_1,$$

або

$$F_H = 0,5mg \left(\frac{L_2}{L_1} - 1\right) - m_d g. \quad (6)$$

Якщо $m_d g \ll F_H$, тоді

$$f = \frac{F_H}{mg} = 0,5 \left(\frac{L_2}{L_1} - 1\right). \quad (7)$$

$$F_H = 0,5mg \left(\frac{L_2}{L_1} - 1\right). \quad (8)$$

Отже, для обчислення сили поверхневого натягу $f = \frac{F_H}{mg}$ потрібно знати масу важеля m та відношення довжин

$\frac{L_2}{L_1}$. Вимірювання можна проводити з набором пластин різної форми і площі, тіл з незвичайною формою, наприклад

дисків з декількома отворами різного діаметру і т. і. Можна визначити силу відриву тіл, виготовлених з різних матеріалів. Варіювання в широких межах абсолютних розмірів, форми, стану поверхні і хімічного складу тіл, що випробовуються, є принциповою відмінністю цих експериментів від аналогічних “класичних” дослідів.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Робота носить теоретичний та прикладний характер. Методологічно робота базувалася на відомих законах класичної механіки, законі збереження енергії. Її основні науково-практичні результати отримані з використанням відеореєстрації та цифрових технологій обробки результатів експериментів. Для вимірювання величини сили відриву поверхні плоского тіла від рідини використовувалися статичні методи – метод важеля, а також метод висячої краплі.

Традиційно для визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини використовують статичні методи: метод вимірювання висоти підняття меніска в капілярі, метод Вільгельми, метод лежачої краплі, метод визначення σ за формою висячої краплі, метод краплі, яка обертається, і динамічні методи – метод дю Нуї (метод відриву кільця), сталагмометричний, або метод рахунку крапель, метод максимального тиску бульбашки, метод осцилюючого струменя, метод стоячих хвиль, метод біжучих хвиль і т.д.

Наприклад, метод відриву кільця є класичним. Суть методу впливає з назви. Кільце з платиного дроту, площа якого паралельна поверхні рідини, повільно піднімають з рідини, що змочує його. Зусилля в момент відриву кільця від поверхні і є силою поверхневого натягу, яка може бути перерахована в поверхневу енергію. Метод підходить для вимірювання поверхневого натягу ПАР, трансформаторних масел і т.д. Для вимірювання величини поверхневого натягу рідин використовується тензіометр дю Нуї. Принцип дії тензіометра полягає у вимірюванні сили відриву дротяного кільця з платіноїрідієвого сплаву від поверхні розділу рідина-повітря. Сила відриву вимірюється в умовних одиницях, потім проводиться обчислення за формулами, що дозволяє отримати значення натягу в мілліньютонх на метр (мН / м).

У ряді дослідів тіло з плоским змочуваним днищем (циліндр) опускалося в посудину з водою, врівноваженій на вагах. Після занурення всієї поверхні в процесі вертикального підйому вимірювалася сила відриву F твердої площини від поверхні рідини (Іголкин, 2007).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

З врахуванням того, що досліди студенти будуть робити вдома, за плоскі тверді тіла було вибрано прозорі пластмасові диски з полімерної плівки товщиною 270 мкм (рис. 2 а). По центру диска приклеювалося тонке кільце від кавової трубочки, в яке вставлявся алюмінієвий дріт – важіль (рис. 2 б). Маса алюмінієвого важеля склала 7,645 грам, діаметр $\varnothing 3,5$ мм, довжина 323 мм. Маса дисків була 0,071 – 1,384 г в залежності від діаметрів дисків $d = 15 - 70$ мм. Максимальна сила відриву визначалася, коли відбувався відрив диска від поверхні рідини. Для цього відрізок важеля довжиною L_2 збільшувався до моменту відриву. Метою дослідів було визначення залежності сили відриву від 1) площі поверхні тонких дисків, що виготовлені з різних матеріалів та торкаються поверхні рідини, 2) їх периметру, 3) наявності отворів в дисках. Результати дослідів наведені в табл. 1, графіках залежностей на рис. 3-6.

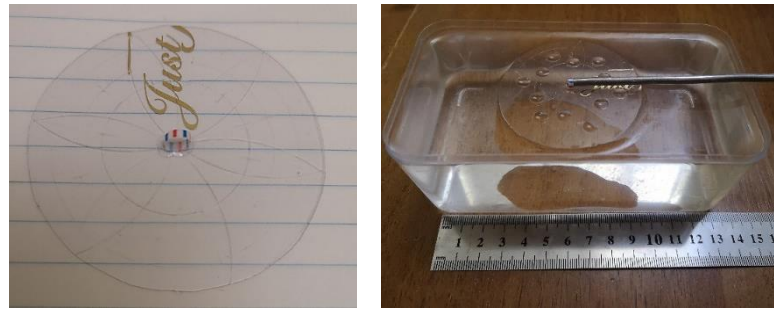


Рис. 2. Фото установки з важелем та диском

Таблиця 1

Результати вимірювання сили відриву F_H дисків з полімерної плівки від поверхні води

$m_{дв}$ г	Діаметр диска, мм	Площа диска, мм ²	Периметр диска, мм	L_2 , мм	L_1 мм	L_2/L_1	F_H , мН
0,071	15	176,7	47,1	174	149	1,17	5,68
0,137	20	314,16	62,8	185	138	1,34	11,41
0,26	30	706,86	94,3	201	122	1,65	21,75
0,458	40	1256,64	125,7	225	98	2,30	44,11
0,71	50	1963,5	157,1	241	82	2,94	65,75
1,002	60	2827,4	188,5	260	63	4,13	107,43
1,384	70	3848,45	219,9	273	50	5,46	153,67
1,091*	60	2827,4	188,5	259	64	4,05	103,55

*- полімерна плівка, покрита знизу Al плівкою

Як видно з рис. 3 лінійної залежності $F = \sigma \cdot l$ не існує (l в даному випадку – периметр). Тобто, сила поверхневого натягу під час підйому диска не працює, “виключена”. Графік на рис. 4 лінійний, тобто сила відриву диска від рідини прямо пропорційно залежить від площі диску. Це доводить, що сила відриву визначається об’ємними силами взаємодії молекул рідини зі всіма молекулами твердого тіла, а не тільки вздовж лінії розмежування. З рівняння лінії на рис. 4 визначено, що коефіцієнт пропорційності в рівнянні (5) $\beta \approx 40 \text{ Н / м}^2$, що узгоджується з результатами дослідів $\beta \approx 45 \text{ Н / м}^2$, наведених в роботі (Іголкін, 2007).

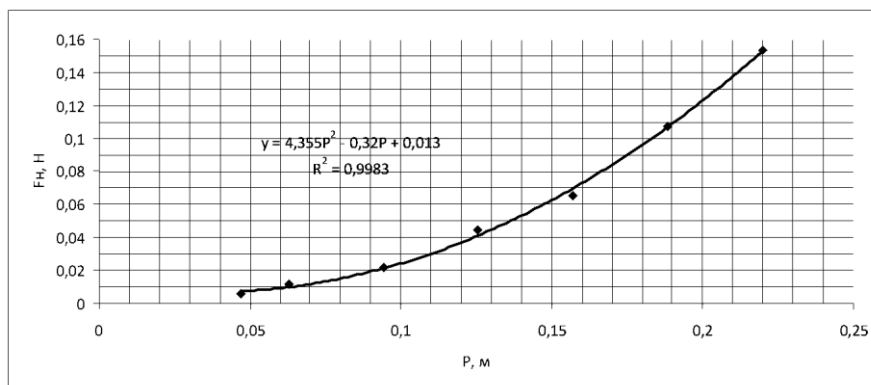


Рис. 3. Графік залежності сили відриву F_H від периметра диску $P = \pi d$

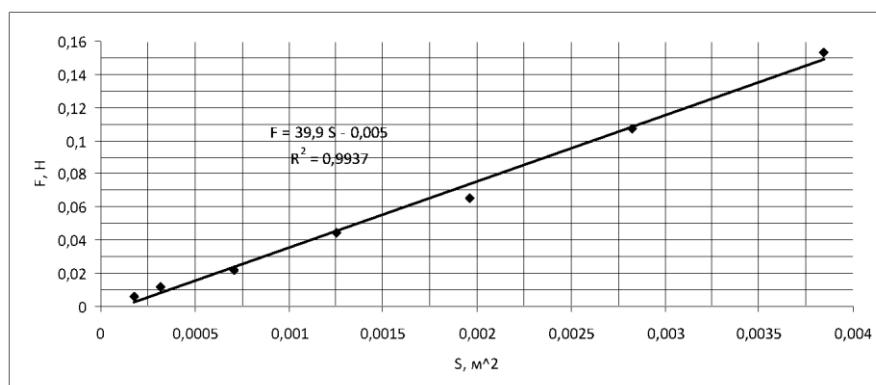


Рис. 4. Графік залежності сили відриву F_H від площі контактної поверхні диску $S = \pi d^2 / 4$

Крім пари вода – полімерна плівка, коефіцієнт β може бути визначений і для інших матеріалів. Так, якщо поверхню полімерного диску покрити знизу Al фольгою та провести ті ж досліди, тоді отримуємо коефіцієнт $\beta = 40 \text{ Н/м}^2$ (див. табл. 1). Для пари вода—скло $\beta = 38 \text{ Н/м}^2$, пари сталь—вода $\beta = 42 \text{ Н/м}^2$, для пари вода—латунь $\beta = 16 \text{ Н/м}^2$ (Іголкин, 2007). З цього можна зробити висновок, що коефіцієнти β для матеріалів, які добре змочуються, прямують до граничного значення $\beta \approx 40 \text{ Н/м}^2$, який визначається міцністю зв'язків молекул рідини між собою.

Щоб довести, що значення коефіцієнта β є константою і визначається не взаємодією фаз – твердого тіла і рідини, – а міцністю зв'язків молекул рідини між собою, в дисках дираколом робилися однакові отвори $\varnothing 6 \text{ мм}$ (див. рис. 2 б). Для симетрії отвори пробивали парами з різних боків геометричної осі диска. Площа диска діаметром $\varnothing 60 \text{ мм}$ при цьому зменшувалася, а довжина границі розмежування (периметр взаємодії) – збільшувалася. При пробитті 20 отворів в диску його площа зменшилася на 20%, а периметр з P_0 за рахунок отворів зріс і став рівним $3 P_0$. Проте сила відриву від води суцільного диску $F_0 = 96 \text{ мН}$ і перфорованого не змінилася. Це свідчить про те, що відповідальними за зчеплення є всі молекули води, які знаходяться під диском. Саме вони шляхом перерозподілу сил зчеплення в просторі зберігають майже незмінною величину сили відриву диску від рідини.

Пояснити виявлений зв'язок сили відриву та геометричних характеристик диску: периметру і площі – можна парною потенційною функцією взаємодії молекул, що описується, потенціалом Леннарда-Джонса. Ця силова взаємодія існує для будь-яких молекул. Потенційна функція подібна для всіх однакових пар молекул, де б вони не знаходилися. Для розрахунку сили взаємодії поверхонь рідких і твердих тіл досить визначення величини сил міжмолекулярної взаємодії між усіма молекулами рідини у всьому об'ємі рідини, а не тільки на границі твердого тіла з вільною поверхнею рідини.

Доповнити цей висновок можна виконавши досліди з краплею води, що висить на стелі, де вона утримується не поверхневими силами викривленої лінії розмежування рідини з повітрям, а адгезійною силою на всій площі контакту рідини з твердим тілом в поєднанні з об'ємним розтягуванням усієї маси краплі (рис. 5).

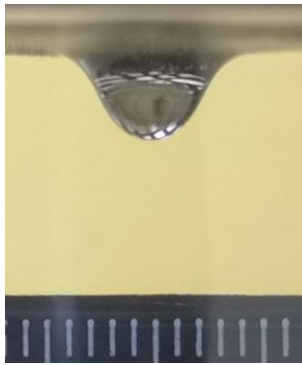


Рис. 5. Форма висячої краплі перед падінням (діаметр основи 8 мм)

Форма поверхні краплі є наслідком перерозподілу внутрішніх напружень починаючи від межі різномірних середовищ. При цьому силою поверхневого натягу, яка діє у горизонтальному напрямку на лінії дотику до утримуючої краплю поверхні, неможливо пояснити, хто утримує краплю від падіння? Тому у студента виникає питання: чи є взагалі сила поверхневого натягу? Довести її існування можна виконавши інший дослід. Переконалим експериментальним доказом тангенціальної природи цієї сили є те, що показано на рис. 6: на поверхню мильної плівки накладена петля з нитки довільної форми. Вона з часом не змінюється.

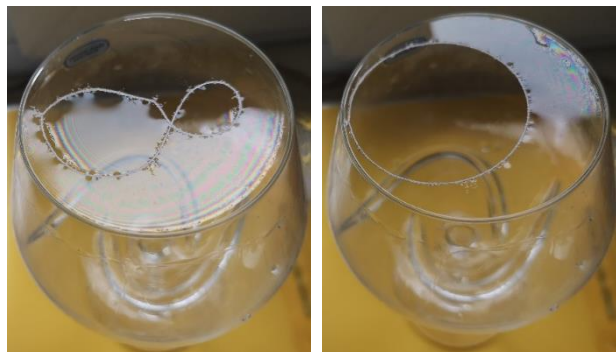


Рис. 6. Експериментальне підтвердження тангенціальної орієнтації сили поверхневого натягу

Якщо доторкнутися пальцем до поверхні обведеної нитки, тоді відразу ж петля приймає округлу форму, яка виникає в результаті дії тангенціальної сили поверхневого натягу, що діє по дотичній до поверхні води на кожен точку нитки. Кожен елементарний шматок нитки відчуває дію сил як з внутрішнього боку нитки так і з зовнішнього, але густина повітря значно менше густини води, тому і кількість взаємодіючих на межі молекул різна. Цей дослід підкреслює той факт, що поверхневий натяг залежить від двох рідин, що контактують.

Отже, роль об'ємних і поверхневих сил при взаємодії рідини з твердим тілом студент може з'ясувати вдома, провівши серію переконливих дослідів: з вимірювання величини сили відриву поверхні плоского тіла від рідини, висяченими краплями та з ниткою у вигляді петлі покладеною на плівку мильної води. Простота постановки дослідів, доступність матеріалів дозволяє студентам досліджувати явища на межі двох середовищ не тільки в лабораторних умовах, а й дистанційно.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

На прикладі серії дослідів розглядається явище поверхневого натягу, природа якого пояснюється силами міжмолекулярного зчеплення. В роботі доведено:

- 1) сила відриву диска від поверхні води непропорційна периметру диска. Це доводить той факт, що поверхневий натяг рідини як особлива реально діюча тангенціальна сила себе у цьому досліді не проявляє;
- 2) сила відриву диска від рідини прямо пропорційно залежить від площі диску: $F \propto \beta S$;
- 3) граничне значення міцності зв'язків молекул рідини між собою дорівнює $\beta = 40 \text{ Н / м}^2$;
- 4) незмінність величини сили відриву того ж самого диска при збільшенні кількості виконаних в ньому отворів і залежність сили відриву тільки від площі поверхні цільного диска доводить той факт, що в утриманні диска беруть участь всі молекули, що знаходяться в контактному шарі диска і рідини.

У перспективі буде розроблена самохідна система, яка використовуючи сили поверхневого натягу, буде рухатися проти сили тяжіння. Це дасть можливість студентам експериментально порівняти ці сили, а саму систему використати для визначення в'язкості повітря, довжини вільного пробігу молекул та обчислити їх діаметр.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bikerman, J. J. (1958). *Surface Chemistry*. New York: Academic Press.
2. Eid, K. F., Panth, M., & Sommers, A. D. (2018). The physics of water droplets on surfaces: exploring the effects of roughness and surface chemistry. *Eur. J. Phys.*, 39. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa9c3a>
3. Fabio, L. et al. (2012). Theoretical Models for Surface Forces and Adhesion and Their Measurement Using Atomic Force Microscopy. *International Journal of Molecular Sciences*, 13, 12773-12856. <https://doi.org/10.3390/ijms131012773>
4. Jonson, R. E., & Dettre, R. H. (1969). *Surface and Colloid Science*: Ed. by E. Matievic. New York, 2.
5. Горюнов, Ю. В., & Сумм, Б. Д. (1976). *Фізико-хімічні основи смачивання і растекання*. М.: Химия.
6. Григорьева, И. С., & Мейлихова, Е. З. (ред). (1991). *Физические величины*. М.: Энергоатомиздат.
7. Здешиц, В.М., Здешиц, А.В., & Прихожа, Ю. О. (2020). Використання технології BYOD під час виконання лабораторних робіт з фізики. *Фізико-математична освіта*, 3 (25), 2, 43-49. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2020-025-3-024>
8. Иголкин, С. И. (2007). Критический анализ опытов по измерению углов смачивания и сил поверхностного натяжения. *Прикладная физика*, 4, 43-51.
9. Ландау, Л. Д., & Лифшиц, Е. М. (1964). *Статистическая физика*. М.: Наука.
10. Прохорова А. М. (ред). (1984). *Физический энциклопедический словарь*. М.: Сов. Энциклопедия.
11. Якібчук, П.М., & Клим, М.М. (2013). *Молекулярна фізика*. Львів: ЛНУ імені Івана Франка.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Bikerman, J. J. (1958). *Surface Chemistry*. New York: Academic Press.
2. Eid, K. F., Panth, M., & Sommers, A. D. (2018). The physics of water droplets on surfaces: exploring the effects of roughness and surface chemistry. *Eur. J. Phys.*, 39. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa9c3a>
3. Fabio, L. et al. (2012). Theoretical Models for Surface Forces and Adhesion and Their Measurement Using Atomic Force Microscopy. *International Journal of Molecular Sciences*, 13, 12773-12856. <https://doi.org/10.3390/ijms131012773>
4. Jonson, R. E., & Dettre, R. H. (1969). *Surface and Colloid Science*: Ed. by E. Matievic. New York, 2.
5. Gorjunov, Ju. V., & Summ, B. D. (1976). *Fiziko-himicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya [Physical and chemical bases of wetting and spreading]*. Moscow: Chemistry. (in Russian).
6. Grigorieva, I. S., & Meilikhova, E. Z. (ed.). (1991). *Physical Quantities*. М.: Energoatomizdat. (in Russian).
7. Zdeschchys, V.M., Zdeschchys, A.V., & Prikhozha, Yu.O. (2020). Vykorystannia tekhnolohii BYOD pid chas vykonannia laboratornykh robit z fizyky [Use of BYOD technology during frontal laboratory work in physics]. *Fizyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education*, 3(25), 2, 43-49. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2020-025-3-024> (in Ukrainian).
8. Igolkin, S.I. (2007). Kriticheskij analiz opytov po izmereniju uglov smachivaniya i sil poverhnostnogo natjazheniya [Critical analysis of experiments on measuring contact angles and surface tension forces]. *Prikladnaya fizika – Applied Physics*, 4, 43-51. (in Russian).
9. Landau, L. D., & Lifshic, E. M. (1964). *Statisticheskaja fizika [Statistical physics]*. М.: Nauka. (in Russian).
10. Prokhorova, A. M. (ed.). (1984). *Fizicheskij jenciklopedicheskij slovar [Physical Encyclopedic Dictionary]*. М.: Sov. Encyclopedia. (in Russian).
11. Yakibchuk, P.M., & Klim, M.M. (2013). *Molekuliarna fizyka [Molecular physics]*. Lviv: LNU named after Ivan Franko. (in Ukrainian).

