
ФІЗИКА АЕРОЗОЛІВ

УДК 77544.77

<https://doi.org/10.18524/0367-1631.2026.64.361471>**Черненко О. С.¹, Катц А. М.², Ільяшенко М. Д.²**¹ Одеський національний університет імені І. І. Мечникова² КЗ Рішельєвський науковий ліцейE-mail: teplophys@onu.edu.uaORCID iD: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-3722-0694>² <https://orcid.org/0009-0009-3656-9446>**Вплив поверхневих явищ на рух дисперсних частинок**

Робота присвячена вивченню особливостей руху дрібних частинок на поверхні рідин. Досліджено механізми переміщення частинок порошку лікоподію на поверхні води вгору за течією, проведені експериментальні спостереження та проаналізовані закономірності поведінки частинок у залежності від умов середовища.

На поверхні течії зсувна течія з нерівномірною швидкістю: ближче до стінок швидкість рідини менша, ніж біля центру. У результаті частинки «залипають» у локальний тороподібний вихор або приповерхневий повільний шар — і можуть підніматися вище за течією проти основного потоку. Впливають одночасно два ефекти. Ефект Марангоні (локальне зменшення поверхневого натягу біля частинок), який створює локальні поверхневі течії у тонкому залишковому шарі. А стінки/меніск дають спрямовану капілярну силову компоненту, яка визначає напрямок (до жолоба/стілки).

Дальність підйому частинок визначається швидкістю течії (пряма залежність: чим вона більша, тим дальність підйому більша) і різницею висот в верхній і нижній посудині: (обернена залежність: чим вона менша, тим дальність більша).

Ключові слова: поверхневі явища, рух частинок, домішки, колоїдні системи.

Вступ. Фізика поверхневих явищ займає важливе місце серед сучасних наукових досліджень, адже вони відіграють ключову роль у багатьох природних та технічних процесах. Особливий інтерес становить поведінка дрібних частинок на межі поділу рідин. Прикладом є здатність порошку лікоподію змінювати напрямок руху на поверхні води залежно від умов середовища. Це явище виглядає парадоксальним, проте воно пов'язане з особливостями взаємодії частинок із рідиною.

В роботі [1] описано цікаве явище. Під час приготування чаю мате, коли гарячу воду наливали з каструлі в чашку з чайним листям було виявлено, що коли носик знаходився на відстані 1 см над листям, плаваюче листя потрапляло з чашки в чайник. У ході експериментів було виявлено, що при наявності ділянок із різними значеннями поверхневого натягу порошок починає рухатися від областей із меншим натягом у бік областей, де він більший. Це створює ефект «підймання» частинок проти течії або руху рідини.

Було продемонстровано, що плаваючі частинки можуть рухатися вгору за течією на відстань до 1 см вгору по водоспаду та на кілька метрів вгору по каналу проти потоку рідини нижче за течією. Автори [1] помітили, що цей ефект зберігається в експериментах з використанням киплячої або холодної води, а також з використанням порошку флуоресцеїну. Було запропоновано, що потік забруднюючих частинок вище за течією може бути згенерований градієнтами поверхневого натягу, що встановлюються потоком чистої води нижче за течією в забруднений водойм.

Ефект Марангоні (або як його ще називають Марангоні - Гіббса) [2, 3] являє собою явище переносу речовини вздовж кордону розділу двох середовищ, що виникає внаслідок наявності градієнту поверхневого натягу. Виникнення градієнту поверхневого натягу може бути викликано градієнтом концентрації або градієнтом температури. Чим більший у рідині поверхневий натяг, тим з більшою силою вона стягується. Отже, за наявності градієнту поверхневого натягу рідина буде переміщатися в область з великим коефіцієнтом поверхневого натягу.

За даними Бьянчіні [1], частинки зменшують поверхневий натяг поблизу себе. Виникає сила, що змушує їх переміщатися в напрямку ділянки з чистою водою, де поверхневий натяг більший.

В дослідженні [2] аналізується безперервний послідовний підйом частинок у вихорах. Коли частинка піднімається проти рідини, вона створює збурення в потоці рідини, що призводить до утворення вихрової доріжки Кармана. Вона зменшує опір, з яким стикаються наступні частинки, полегшуючи їх підйом. Підтримуючи цю гіпотезу, було помічено, що коли частинка піднімалася струменем, інші частинки майже миттєво йшли по тому ж шляху, поводячись так, ніби з'єднані *ланцюгоподібним* чином.

Механізм підйому частинок може бути релевантним для неочікуваного переносу домішок у технологічно важливих системах (наприклад, біореакторах, стерильних розчинах, фармацевтичних процесах), що може порушувати безпеку й якість продуктів чи середовищ. Це дозволяє аргументувати, що розуміння механізму й контролю такого руху частинок може мати застосування в контролі забруднення у виробництві та лабораторній практиці.

Хоча пряма практична реалізація ефекту підйому частинок ще рідкісна, існують в літературі дослідження, в яких переміщення частинок відбувається під дією ефекту Марангоні [4, 5]. Вітман [4] теоретично й експериментально показав, що частинки, які змінюють локальний склад поверхневого шару (наприклад виділяють або адсорбують поверхнево-активні речовини), створюють локальні градієнти поверхневого натягу, що приводять до потоку частинок по поверхні. Ця робота добре ілюструє механізм «частинка → локальне зниження/зміна поверхневого натягу → поверхневий потік частинок».

Бенуагеф [5] експериментально й аналітично дослідив утворення потоку частинок під дією ефекту Марангоні від локального джерела розчиненої речовини. Це приклад того, що навіть розчинені/адсорбовані молекули навколо локального джерела створюють вимірювані градієнти поверхневого натягу і відповідні течії.

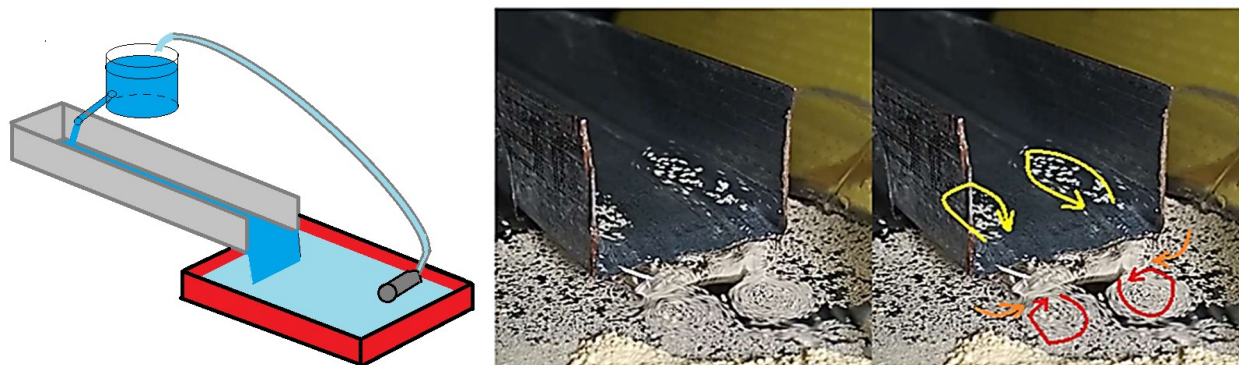


Рис. 1. Експериментальна установка і рух частинок лікоподію

Вже є проекти Marangoni-активних частинок, які самі рухаються по поверхні рідини, служать моделями для майбутніх мікросвормів, мікророботів та мікронасосів [6, 7]. Ці частинки перетворюють локальні градієнти поверхневого натягу на рух або транспорт іншого вантажу.

Тому незважаючи на те, що роботи з ефекту підйому частинок проти потоку не дають конкретних прикладів прикладної користі, виникає все більше доказів того, що подібні явища відіграють роль у процесах неочікуваного переміщення домішок у технологічних середовищах та можуть впливати на безпеку та якість виробництва.

Метою роботи є вивчення фізичних механізмів руху частинок лікоподію на поверхні рідин та пояснення особливостей їх поведінки за різних умов.

Результати дослідження. Схема експериментальної установки для створення рівномірного потоку показана на рис. 1а. З нижньої ємності водяний насос качає воду в верхню ємність. Через трубку в стаціонарному режимі в довгий горизонтальний прямокутний жолоб витікає така ж кількість води, що і викачує насос з нижньої посудини. Тому висота рідини в нижній ємності стала. Посередині жолоба (ширина 27 мм) поставлена металева сітка. В результаті в жолобі в її нижній частині утворюється ламінарна течія по всій її ширині.

Висота жолоба над рівнем води в нижній посудині встановлювався на рівні близько 1 см. Це досягалось шляхом додавання чи віднімання певної кількості води в нижній посудині.

На поверхню води в нижній посудині посипалася невелика кількість порошку лікоподію. Ці частинки мають однаковий розмір 30 мкм і добре плавають на її поверхні. В результаті можна побачити, що частинки можуть з'явитися в жолобі, піднявшись по течії вгору. Це іноді називають «забруднення вгору за течією». Швидкість витікання води регулювалася або швидкістю перекачування насосом, або кутом нахилу жолоба.

На рис.1б зображено фото (стоп-кадр) знаходження частинок в даній системі. На жолобі утворюються два вихори (жовті стрілки). В кожному з них частинки рухаються від водоспаду «вгору за течією» поблизу стінки, а до водоспаду – ближче до середини потоку в жолобі. Біля точки падіння води з водоспаду теж утворюються два вихори (червоні стрілки). Поблизу центру течії вода тече від жолоба. Тому на поверхні води в нижній посудині згідно рівняння Бернуллі (p

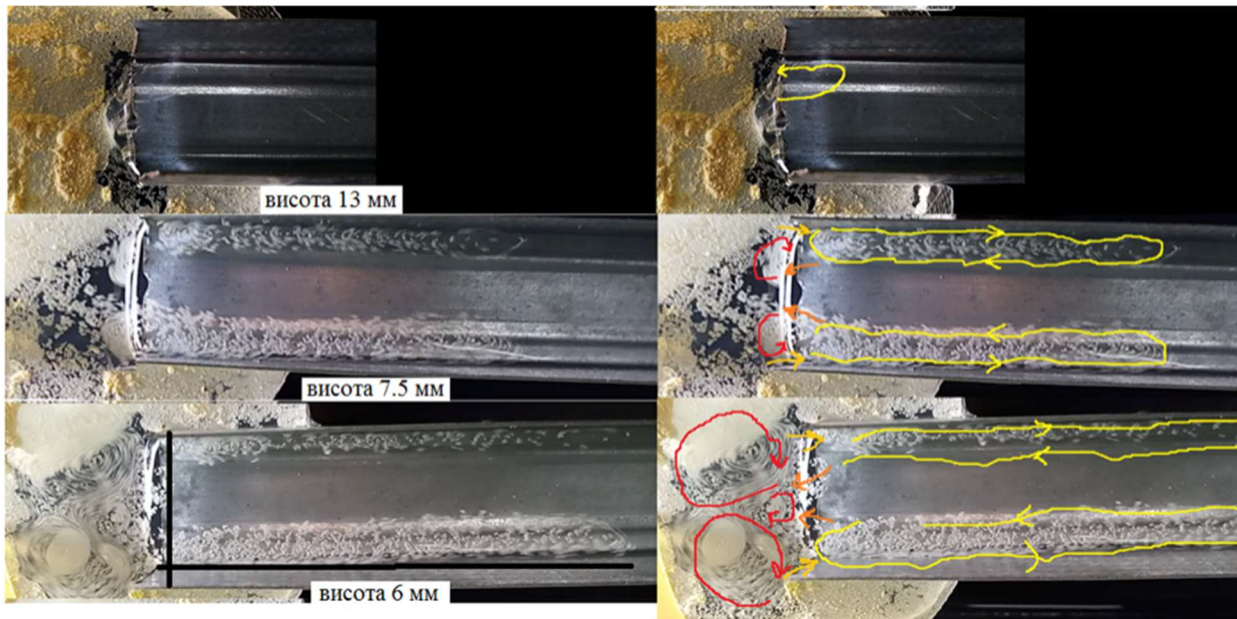


Рис. 2. Розміри вихорів на верхній течії (вид згори).

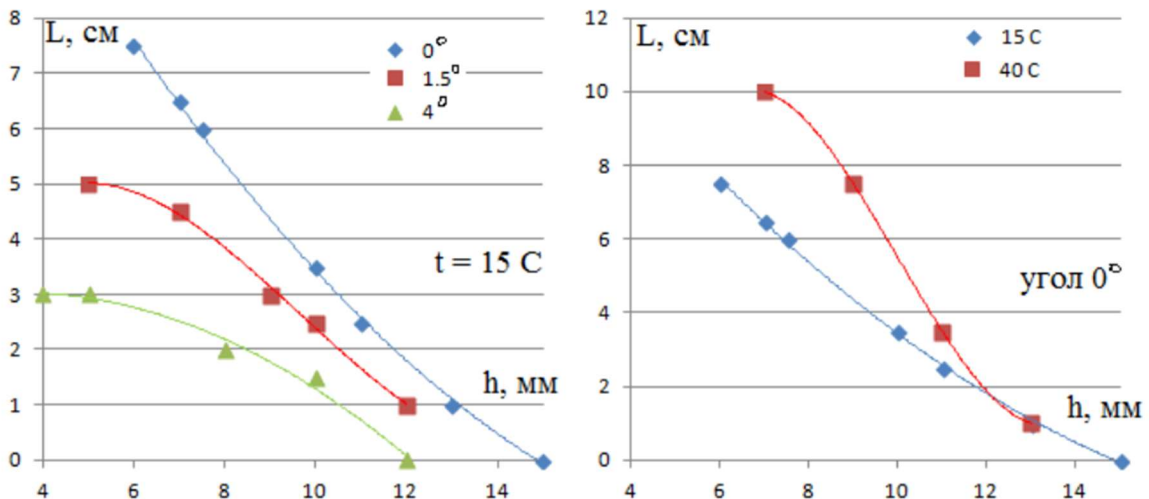


Рис. 3. Вплив нахилу жолоба та температури течії на розміри вихорів вгору за течією

$+\frac{1}{2}\rho v^2 = \text{const}$) в цьому місці виникає область зниженого тиску, куди і намагається рухатися вода з сусідніх областей (помаранчеві і червоні стрілки на рис 2.2). В результаті і утворюються два вихори (червоні стрілки). Висота підйому частинок для даного випадку близько до 10 мм.

Дальність, на яку можуть зайти частинки вгору за течією залежать від різниці рівнів в верхній течії та нижній посудині. На рис. 2 показано розміри вихорів при різних рівнях. Видно, що чим менша різниця рівнів тим більші розміри вихорів, як в нижній посудині (червоні стрілки), так і в жолобі (жовті стрілки). Це можна пояснити тим, що чим більша висота рівнів, тим менша горизонтальна складова швидкості рідини. І тому не виникає суттєва різниця тисків для виникнення вихору.

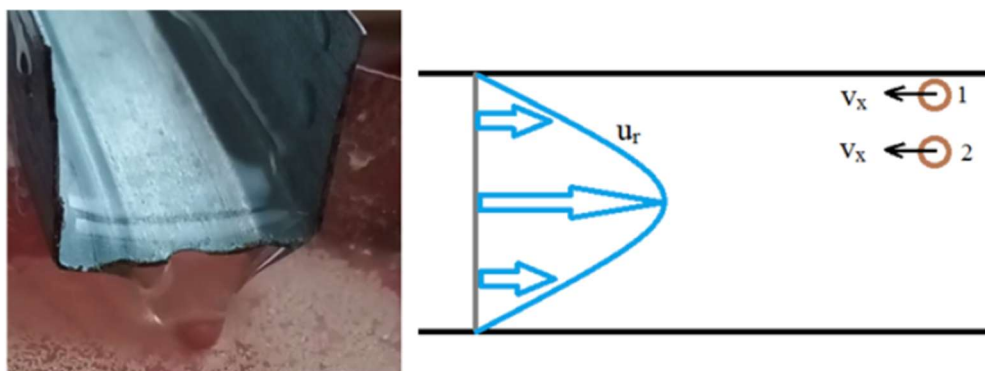


Рис. 4 Структура течії і пояснення руху частинок

Помаранчевими стрілками показано шляхи, вздовж яких рухаються частинки вгору і вниз за течією. Треба зазначити, що частинки не обов'язково спускаються вниз, вони можуть продовжувати рухатися в вихорі.

На рис. 3 показано вплив висота рівнів і кут нахилу жолоба (рисунок зліва) та температура води (рисунок справа) на дальність «забрудження». Отже, чим більше кут, тим на меншу довжину пересуваються частинки вгору за течією. При одній і тій же самій різниці рівнів частинкам важче рухатися. Нагрівання води призводить до полегшення руху частинок із-за зменшення поверхневого натягу.

На рух частинок впливає *швидкість течії*. Жолоб (достатньо довгий) підіймався за дальній кінець, що призводило до пришвидшення витікання води. При швидкій течії частинки не спостерігалися в жолобі. Після повернення жолоба в початковий стан (швидкість течії падає практично до нуля) частинки швидко заходять в жолоб.

Після перекриття (зупинки) потоку частинки, що знаходилися в основній ємності нижче жолоба приблизно на відстані 5 мм, починають одразу підійматися вгору. Хоча течії вже немає. Можливим поясненням є вплив стінок. Тобто впливає поверхневий натяг (рівень води біля стінок за рахунок змочування більший), який змушує наближатися м'ячик до стінки. У нашому випадку над основною ємністю є жолоб, в якому залишається 2-3 мм водяного шару. Тому збільшення рівня призводить до "притиснення" частинок до області з більш високим рівнем води.

Завдяки в'язкості профіль швидкості ламінарної течії в жолобі є параболічний (рис. 4a):

$$u(r) = u_0 \left(1 - \left(\frac{r}{r_s} \right)^2 \right).$$

Відомо, що при течії в'язкої рідини її швидкість поблизу перешкод мала (на стінках і взагалі дорівнює нулю). Максимальна швидкість всередині течії. За допомогою автотрекера можна оцінити швидкість течії води в центрі жолоба. Для цього на поверхню води поміщувався крихітний клаптик паперу, за рухом якого і спостерігали. В результаті маємо для кута нахилу 0° орієнтовну швидкість води 10 см/с в області (рис. 4b) де немає частинок (точка 1) і 4.5 см/с де вони є (точка 2).

Автотрекером виміряємо і рух частинок в вихорі, що в жолобі. Вона склала 4.5 см/с поблизу стінки, 1.1 см/с в центрі.

Таким чином, частинки приймають участь в двох рухах. Вони рухаються за течією. Тільки частинки поблизу стінок рухаються з меншою швидкістю із-за в'язкості. А також на них діє якась додаткова сила незалежно від їх положення в течії. Тому частинки за рахунок цієї сили можуть рухатися вгору за течією, а частинки ближче до центру течії – вниз за течією.

Бьянчіні та ін. [1] вказують, що частинки зменшують поверхневий натяг поблизу них. Тоді, якщо прийняти це твердження, сила, що змушує їх рухатися в напрямку чистої води, діє на всі частинки незалежно від місця, де вони знаходяться. Ця сила, напевно, пропорційна коефіцієнту поверхневого натягу.

Протидіє цій силі сила в'язкого тертя. В результаті встановлюється більш-менш стала швидкість руху. Позначимо її за v_x . Тоді для **частинки №1** (поблизу стінки) маємо швидкість $v_1 = v_x + \mathbf{0} = v_x$ і напрям вліво (відповідно до рис. 4b)

Для **частинки №2** маємо $v_2 = \mathbf{u}_r - v_x$ і напрям вправо, бо в цій точці $\mathbf{u}_r > v_x$.

Всередині вихору є частинки, які відносно спостерігача практично нерухомі. Тут $\mathbf{u}_r \approx v_x$. В центрі жолоба зазвичай частинок немає. Там $\mathbf{u}_r > v_x$. Тому завдяки стінкам (в'язкість) і зміні поверхневого натягу можливий рух частинок вгору за течією.

Отже, збільшивши кут нахилу жолоба, ми збільшуємо швидкість течії. Тому відстань, на яку заходять частинки зменшується.

Аналіз результатів. Отже, маємо наступну ситуацію. По жолобу тече широка, але невисока ламінарна (по ширині) течія. За рахунок в'язкості води маємо поблизу стінок малу швидкість течії, в центрі- максимальну. За рахунок градієнту поверхневого натягу частинки можуть рухатися в бік чистої рідини. Тобто існує швидкість такого дрейфу, що залежить від концентрації частинок і їх типу. Поблизу стінок швидкість дрейфу переважає швидкість течії і тому частинки рухаються поблизу жолоба вгору за течією. В центрі навпаки. Швидкість течії переважає і частинки повертаються вниз. Утворюється циркуляція частинок на поверхні ламінарного струменя.

Отже існує швидкість **дрейфу частинок уздовж поверхні** v_x , зумовлений градієнтом поверхневого натягу. Якщо $v_x > u(r)$ – частинка рухається вгору; якщо $v_x < u(r)$ – вниз. **Умовою існування циркуляції** є існування такої координати r_c , де $u(r_c) = v_x$. Тоді при $r > r_c$ маємо рух вгору, при $r < r_c$ – рух вниз. Тобто циркуляція існує, якщо $0 < v_x < u_0$.

Якщо: $v_x > u_0 \rightarrow$ всі частинки йдуть вгору, $v_x = 0$ – всі вниз, $v_x \approx u_0 \rightarrow$ зона циркуляції стискається до центру.

Те, що після зупинки потоку частинки продовжують рух – це означає: $v_x \neq 0$ навіть, коли $u = 0$.

Для оцінки швидкості дрейфу частинок потрібно ввести масштаб швидкості, але використовуючи градієнт поверхневого натягу $v_x \sim \frac{b}{\eta} \frac{d\sigma}{dx}$. В роботі [8] швидкість Марангоні в тонкій плівці масштабується приблизно як

$$v_x \approx \frac{\Delta\sigma \cdot b}{\eta \cdot h},$$

де $\Delta\sigma$ – різниця поверхневого натягу, b – товщина шару, де відбувається такий рух, η – динамічна в'язкість води, h – характерна довжина градієнта.

Тут в'язкість сповільнює рух частинок – тому вона в знаменнику, градієнт поверхневого натягу – «рушійний» фактор. Цей масштаб можна отримати з «рівності» сили в'язкого тертя і сили «градієнту поверхневого натягу» $\eta \frac{v_x}{b} \sim \frac{d\sigma}{dx}$.

Оцінити реальний градієнт поверхневого натягу вкрай важко. Але спробуємо зробити таку оцінку з припущення, що частинки лікоподію просто механічно лежить на поверхні і не змінюють хімічні властивості води. І зменшення поверхневого натягу відбувається за рахунок зменшення поверхні і, відповідно, поверхневої енергії:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_0(1 - \phi),$$

де ϕ – частка площі, яка покрита частинками.

Реальна (істинна) густина лікоподію становить близько 1100-1200 кг/м³. Такі частинки повинні тонути, але за рахунок поверхневого натягу вони залишаються на поверхні води. Нам потрібна насипна густина порошку лікоподію (приблизно $\rho = 400 - 500$ кг/м³). Завдяки дрібній фракції (всі частинки мають діаметр близький до $d = 30$ мкм) та високому вмісту жирів спори лікоподію дуже пухкі й легко розпорошуються.

У нас є чашка Петрі діаметром $D = 90$ мм. В $V_{\text{проб}} = 20$ мм³ порошку, який має масу близько 0.01 г знаходиться велика кількість частинок. Для насипу можна вважати, що на одну частинку виділено деякий кубічний простір з ребром куба, що дорівнює діаметру. Тоді площа покриття частинок є відношення об'єму проби $V_{\text{проб}}$ і діаметру частинки, а частка площі, яка покрита частинками:

$$\phi \approx \frac{4V_{\text{проб}}}{d \cdot D^2} = 10\%.$$

Отже, $\sigma_{\text{eff}} \approx 0.9 \sigma_0$.

Методом відриву кільця отримано значення коефіцієнту поверхневого натягу для води $\sigma = 0.070$ Н/м, для води з лікоподієм $\sigma = 0.055$ Н/м. Тож різниця $\approx 21\%$.

Легкі частинки, такі як пил, можуть плавати на воді, оскільки вони не порушують поверхневий натяг води, що є результатом сильного притягання молекул води одна до одної. Однак, деякі пилинки здатні розчинятися в воді. І тоді речовини, такі як лужні метали, можуть збільшити поверхневий натяг води, змінюючи поведінку крапель. А всі неорганічні електроліти (кислоти, луки, солі) збільшують поверхневий натяг води, як розчинника.

Якщо припустити, що $\frac{d\sigma}{dx} \approx \frac{\sigma_0 \phi}{h}$, $b \approx 0.03$ мм(діаметр частинок), $h = 10$ мм,

$\eta = 10^{-3}$ Па·с, в результаті отримаємо: $v_x \sim \frac{b}{\eta} \frac{d\sigma}{dx} \approx \frac{b}{\eta} \frac{\sigma \phi}{h} = 2.2$ см/с.

Це показує, що навіть невелика зміна σ дає помітні швидкості в тонкому шарі – тому ефект Марангоні може піднімати й переміщувати частинки швидко після зупинки потоку.

Наявність жолоба і стінки створює нерівномірний меніск (різний рівень рідини біля стінки через змочування). Частинки, притиснені до меніска, можуть бути «втягнуті» у бік більш високого рівня – і підняті уздовж меніска навіть без видимої течії. Це ефект «Cheerios» [9].

В нашій системі обидва механізми працюють одночасно: Марангоні створює локальні поверхневі течії у тонкому залишковому шарі, а стінки/меніск дають спрямовану капілярну силову компоненту, яка визначає напрямок (до жолоба/стінки).

Висновки. Ефект Б'янчіні – це цікаве й не дуже інтуїтивне гідродинамічне явище, коли дрібні тверді частинки, що рухаються разом із потоком рідини вздовж вертикальної поверхні несподівано починають рухатися вгору проти течії. На поверхні існує зсувна течія з нерівномірною швидкістю: ближче до твердої поверхні швидкість рідини менша, ніж на зовнішньому боці плівки. У результаті частинки «залипають» у локальний тороподібний вихор або приповерхневий повільний шар – і можуть підніматися вище за течією проти основного потоку.

В цій системі працюють одночасно ефект Марангоні та вплив стінки жолоба: ефект Марангоні створює локальні поверхневі течії у тонкому залишковому шарі, а стінки/меніск дають спрямовану капілярну силову компоненту, яка визначає напрямок (до жолоба/стінки).

Дальність підйому частинок визначається швидкістю течії (пряма залежність: чим вона більша, тим дальність підйому більша) і різницею висот в верхній і нижній посудині: (обернена залежність: чим вона менша, тим дальність більша).

Література

1. *Bianchini, Sebastian*, et al. "Upstream contamination by floating particles." *Proceedings of the Royal Society: Mathematical, physical and engineering sciences* 469.2157 (2013): 20130067. <https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0067>
2. *Sahir, Aryan Hussain, and Saiham Saif Emon*. Observation of upstream particle movement without the involvement of the Marangoni effect // *PloS one*. 20.3 (2025): e0317312. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317312>
3. Ефект Марангоні. (Дата звернення: 10.11.2025). URL:uk.wikipedia.org/wiki/Ефект_Марангоні
4. *Wittmann M., et al.*, **Active spheres induce Marangoni flows that drive collective transport at interfaces** // *Eur. Phys. J. E* (2021) 44:15 <https://doi.org/10.1140/epje/s10189-020-00006-5>
5. *Benouaguef I., et al.*, **Solutocapillary Marangoni flow induced in a waterbody by a solute source** // *Journal of Fluid Mechanics* , Volume 922 , 10 September 2021 , A23. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.500>
6. *Koki Yoshida, Hiroaki Onoe* Marangoni-Propulsion Micro-Robots Integrated with a Wireless Photonic Colloidal Crystal Hydrogel Sensor for Exploring the Aquatic

- Environment // Advanced Intelligent Systems (2022). 4, 2100248. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100248>.
7. *Bokeon Kwak, Soyoung Choi, Jiyeon Maeng, Joonbum Bae* Marangoni effect inspired robotic self-propulsion over a water surface using a flow-imbibition-powered microfluidic pump // Scientific reports (2021); 11: 17469. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96553-8>
 8. *Ebrahimi, Arash, Yousef Kazemzadeh, and Ali Akbari*. "Impact of the Marangoni phenomenon on the different Enhanced Oil Recovery methods." Heliyon 10.21 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39919>
 9. *Karpitschka, Stefan, et al.* "Liquid drops attract or repel by the inverted Cheerios effect." Proceedings of the National Academy of Sciences 113.27 (2016): 7403-7407 <https://doi.org/10.1073/pnas.1601411113>.

Дата надходження: 05.03.2026

Дата прийняття до друку: 27.04.2026

Дата публікації: 28.05.2026

O. S. Chernenko, A. M. Katts, M. D. Ilyashenko

Influence of surface phenomena on the motion of dispersed particles

Summary

The work is devoted to the study of the motion of fine particles on liquid surfaces. The mechanisms governing the upstream transport of lycopodium powder particles on the water surface were investigated through experimental observations, and the characteristic patterns of particle behavior under different environmental conditions were analyzed.

At the liquid surface, the flow represents a shear flow with a non-uniform velocity distribution: the liquid velocity near the walls is lower than that in the central region. As a result, particles become trapped within a local toroidal vortex or a near-surface slow-moving layer and can therefore move upstream against the main flow direction. Two effects simultaneously contribute to this behavior. The Marangoni effect, associated with a local decrease in surface tension near the particles, generates localized surface flows within the thin residual layer. In addition, the walls and meniscus create a directed capillary force component that determines the preferential direction of motion toward the channel or wall.

The distance of particle transport upstream is determined by the flow velocity (direct relationship: the higher the velocity, the greater the transport distance) and by the height difference between the upper and lower vessels (inverse relationship: the smaller the height difference, the greater the transport distance).

Keywords: *surface phenomena, particle motion, impurities, colloidal systems.*