

# ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАПІЛЯРНИХ ХВИЛЬ НА АНІЗОТРОПНИХ ПОВЕРХНЯХ

Григорчук Андрій Михайлович  
учень 10 класу

Політехнічного ліцею НТУУ «КПІ» м. Києва  
Солом'янський р-н

Наукові керівники:

Мініцький Анатолій В'ячеславович, проф., доктор т.н., заст. директора ННІМЗ ім. С.О. Патона

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Козленко Олег

Володимирович, завідуючий УНКЛКТ ФМФ

КПІ імені Ігоря Сікорського

Педагогічний керівник:

Співак Оксана Анатоліївна, вчитель вищої категорії, вчитель-методист фізики Політехнічного

ліцею НТУУ «КПІ» м. Києва.

Київське територіальне відділення МАН

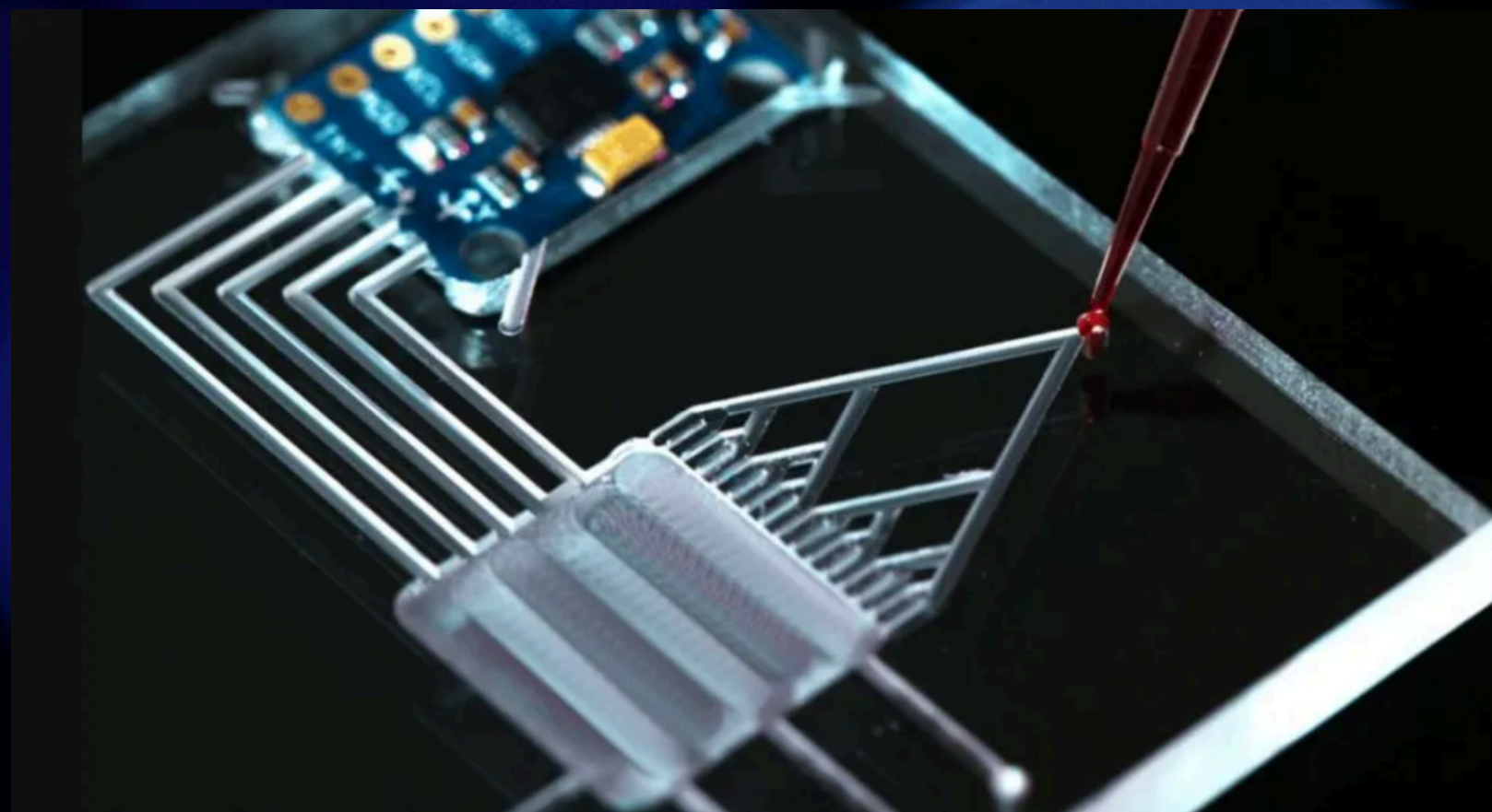
# Актуальність та об'єкт дослідження

Об'єкт: Процеси поширення хвиль у тонких шарах рідини на модифікованих поверхнях.

Предмет: Вплив орієнтованої мікроструктури твердої підкладки на дисперсію та демпінг хвиль.

Актуальність: Використання текстурованих поверхонь дозволяє маніпулювати параметрами хвиль без складних зовнішніх енергетичних впливів.

Проблема: Традиційні ізотропні поверхні не дозволяють здійснювати спрямований демпінг хвиль.



Система типу «Лабораторія-на-чипі» як приклад системи спрямованого транспорту мас у мікрофлюїдиці

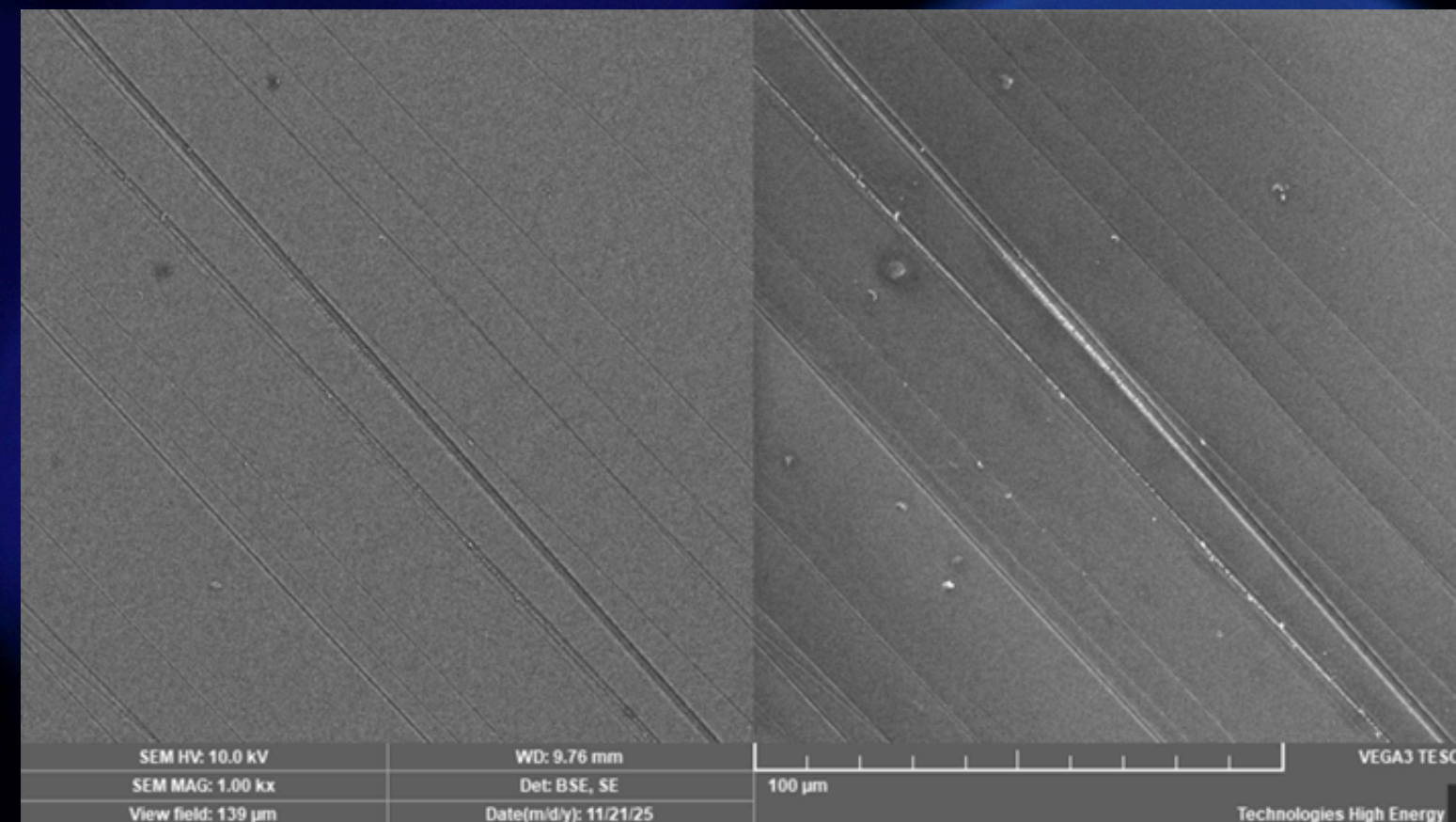
# Мета та завдання

## Мета:

- Встановлення закономірностей впливу анізотропного мікрорельєфу підкладки на динаміку капілярних хвиль.
- Побудувати теоретичну модель поширення хвиль на мікроструктурах.
- Розробити експериментальну установку.
- Виготовити підкладки з різними кутами орієнтації мікроканалів ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$ ).
- Визначити дисперсійні криві та коефіцієнти демпінгу.

# Методика підготовки зразків

- Матеріал підкладок: Тонке листове скло (товщина 1 мм), що забезпечує необхідну жорсткість та оптичну прозорість для спостереження у відбитому світлі.
- Метод структурування: Нанесення односпрямованих мікроканалок шляхом абразивного оброблення (шліфувальний папір зернистістю P1200). Це дозволило отримати структуру з середнім кроком каналок, порівняним із мікрометричним масштабом.
- Контроль орієнтації: Виготовлено 5 серій зразків, де кут нахилу каналок до осі збудження хвиль становив  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  та  $80^\circ$ .
- Підготовка поверхні: Троетапне очищення (видалення шламів, знежирення спиртовим розчином, сушіння), що є критичним для формування стабільного повітряного прошарку (пластрону) у стані Кассі—Бакстера.



Зображення зразку скла зроблене за допомогою РЕМ

# Експериментальна установка

- Збудження: Генератор сигналів ГЗ-118 та п'єзоелектричний дисковий перетворювач діаметром 27 мм.
- Фіксація: П'єзодиск кріпився до скла каніфолю для уникнення втрат енергії.
- Спостереження: Мікроскоп iScore з кососпрямованим освітленням. Такий метод освітлення створює тіні на гребенях хвиль, що робить їх контрастними для цифрової обробки.
- Параметри середовища: Використання дистильованої води для уникнення впливу поверхнево-активних домішок.
- Аналіз: Програмне середовище Tracker



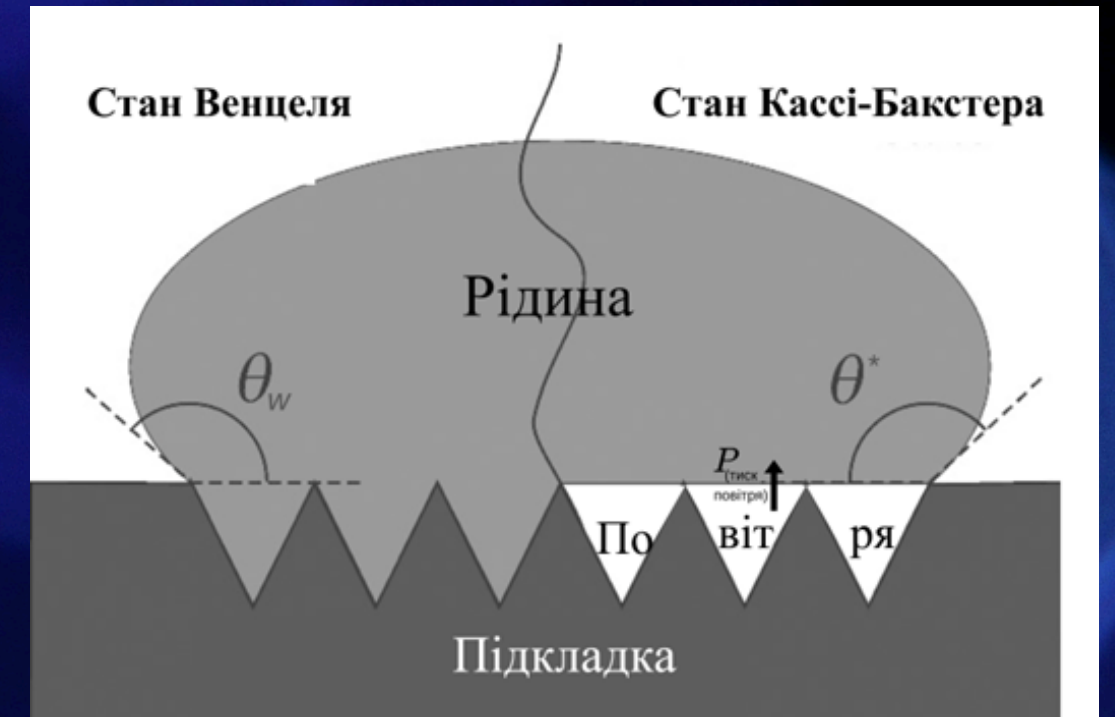
дослідження  
капілярних хвиль  
на  
експериментальній  
установці

# Теоретичні основи

Граничні умови: Замість класичної умови прилипання розглядається модель з ефективним ковзанням.

Вплив мікроструктури: Наявність мікроканалов створює анізотропний опір. Вздовж каналов рідина ковзає легше, ніж поперек, через защемлені повітряні кишени (стан Кассі-Бакстера).

Фізична модель: Анізотропія описується тензором  $b$ , що змінює локальну в'язкість та швидкість дисипації енергії хвилі.



Порівняння станів змочування текстурованої підкладки

$$\underline{v}_t \Big|_{\text{межа}} = b \left( \frac{\partial v_t}{\partial n} \right) \Big|_{\text{межа}}$$

Умова ефективного ковзання Нав'є

$$b = \begin{pmatrix} b_{\parallel} & 0 \\ 0 & b_{\perp} \end{pmatrix}$$

$b_{\parallel}$  — довжина ковзання в напрямку вздовж мікроканалов  
 $b_{\perp}$  — довжина ковзання в напрямку, перпендикулярному до каналов

# Аналіз результатів: Дисперсія

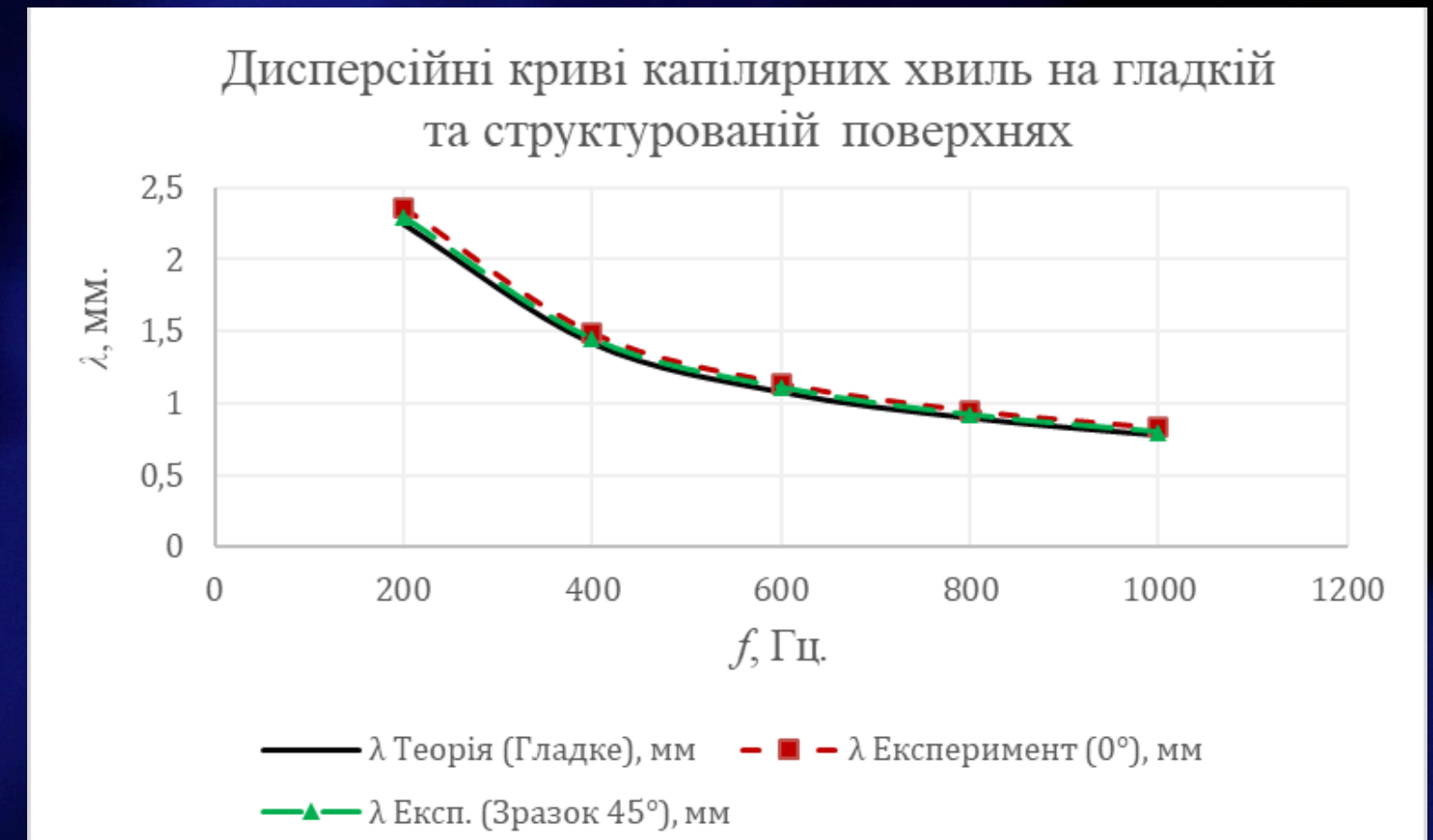
Методика: Визначення довжини хвилі  $\lambda$  через трекінг хвильового фронту в ПЗ Tracker.

Результат: Побудовано графік залежності частоти від хвильового числа ( $\omega$  від  $k$ ). Експериментальні точки для тонких плівок корелюють із теоретичною

кривою

$$\omega \approx \sqrt{\frac{\sigma h}{\rho}} k^2$$

Виявлена закономірність: При зміні орієнтації підкладки спостерігається зсув фазової швидкості, що свідчить про зміну ефективної глибини або жорсткості поверхні.



Дисперсійні криві капілярних хвиль на поверхні води

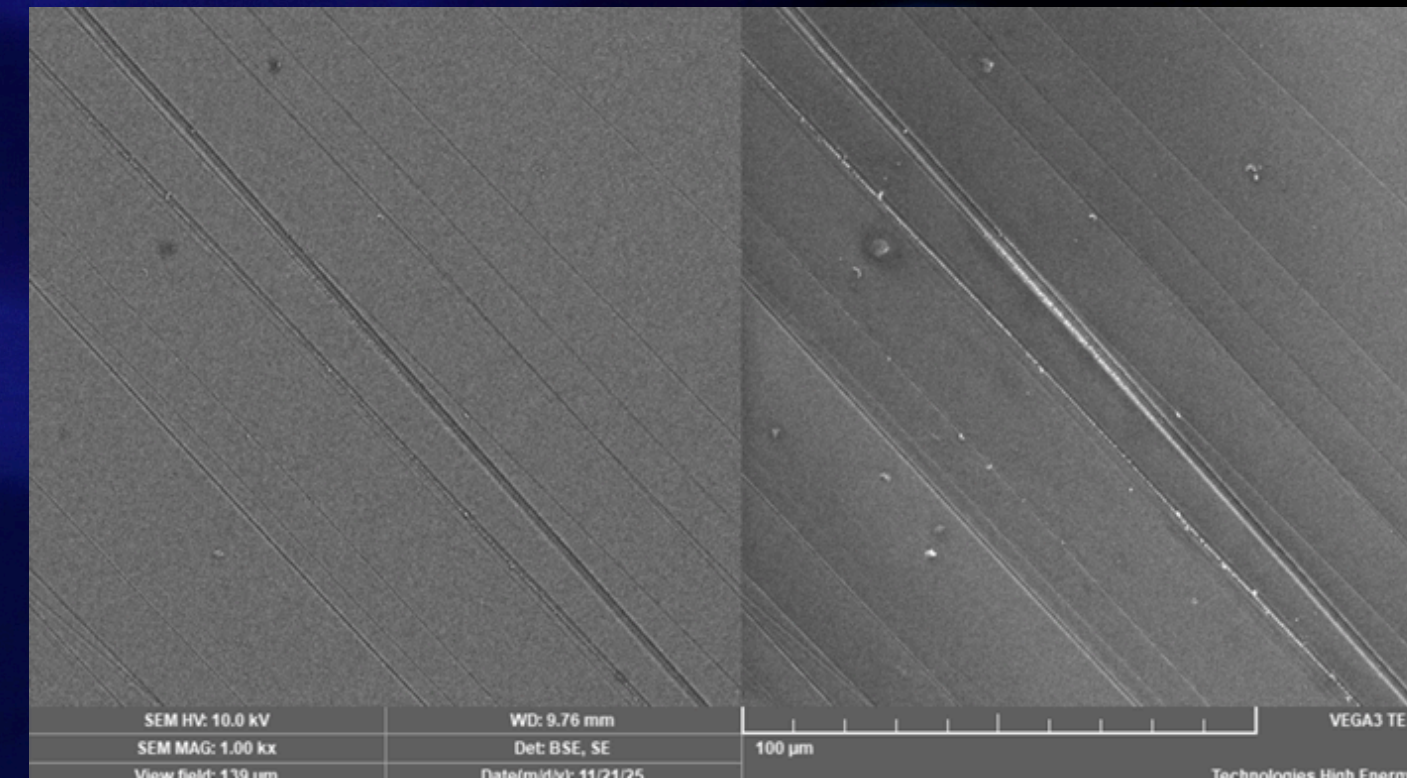
Частота $f$ , Гц	$\lambda$ Теорія (Гладке), мм	$\lambda$ Експ. (Зразок 0°), мм	$\lambda$ Експ. (Зразок 45°), мм
200	2.25	2.36	2.3
400	1.42	1.49	1.45
600	1.08	1.14	1.11
800	0.9	0.95	0.92
1000	0.78	0.83	0.8

Залежність довжини капілярної хвилі від частоти

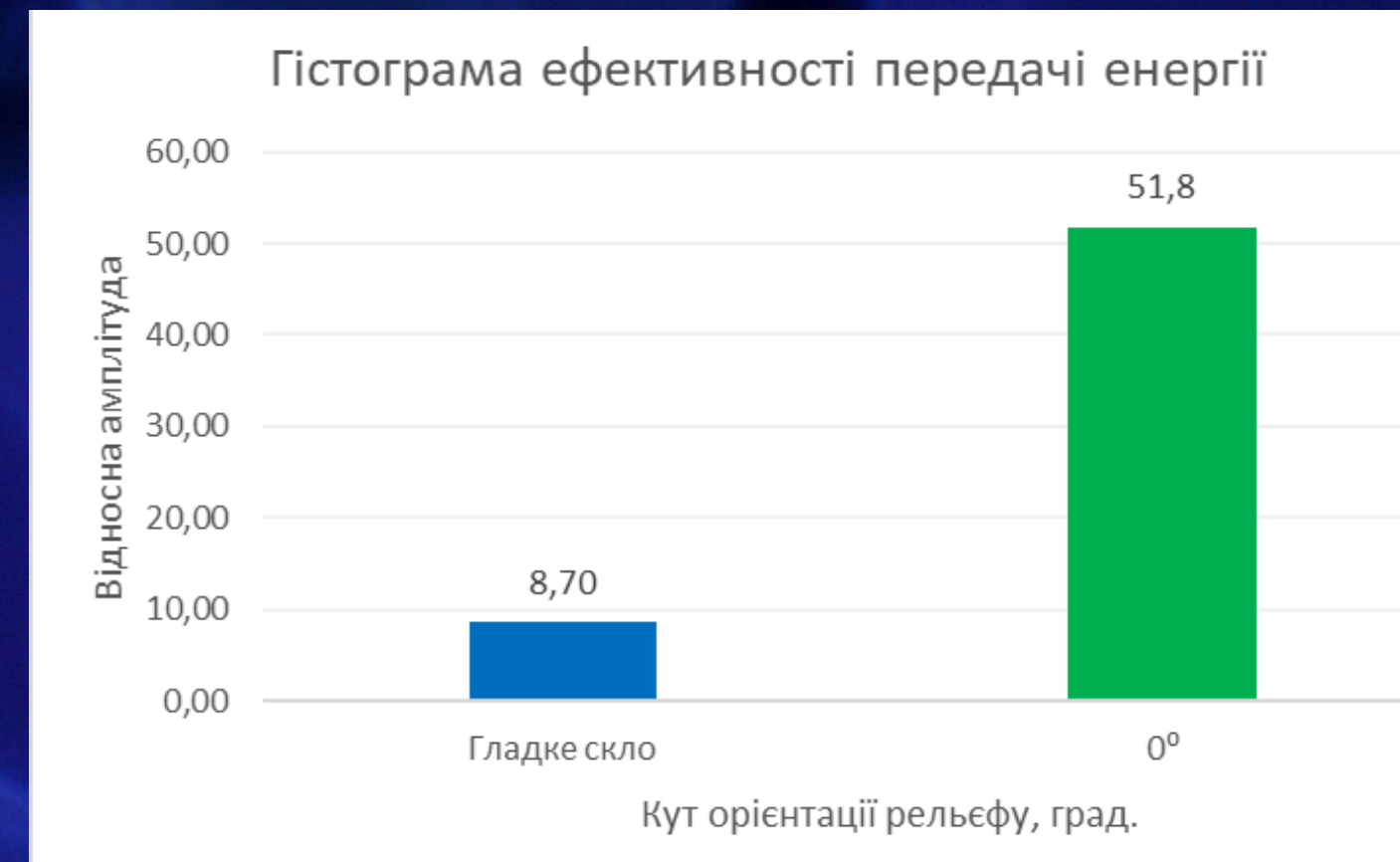
# Демпінг та анізотропія

Виявлено ефект "хвилеводу" (кут  $0^\circ$ )

- Фізичний механізм: Поздовжня орієнтація насічок мінімізує поперечне розсіювання енергії.
- Кількісний показник: Спостерігається 6-кратне підсилення амплітуди порівняно з неструктурованою поверхнею.
- Енергоефективність: Режим «хвилеводу» зберігає 80% енергії КОЛИВАНЬ.



Мікроструктура поверхні підкладки

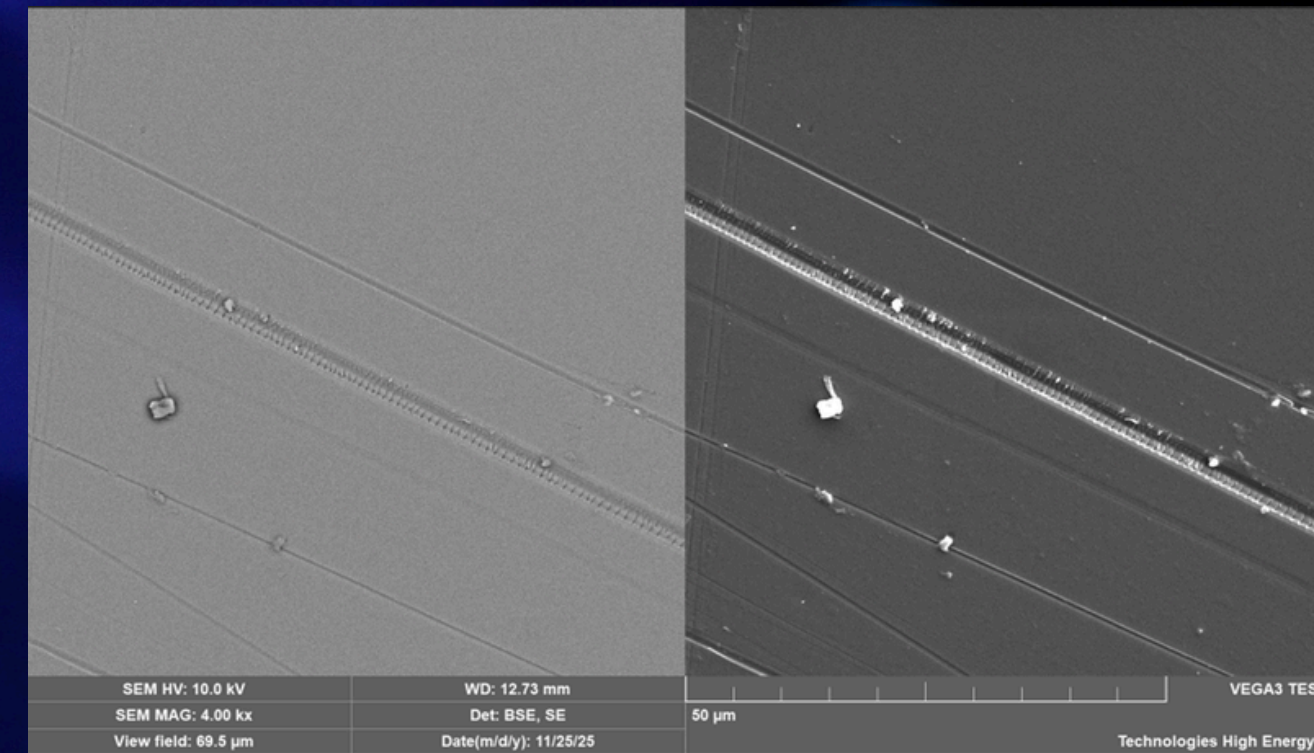


Порівняння ефективності передачі енергії для гладкого скла та кута  $0^\circ$

# Демпінг та анізотропія

Виявлено ефект «бар'єра» ( $80^\circ$ )

- Фізичний механізм: Поперечне розташування мікробар'єрів створює високий гідродинамічний опір.
- Дисипація енергії: Втрата амплітуди становить 85% за рахунок інтенсивного в'язкого тертя на межі фаз.
- Функціональне призначення: Пасивне придушення механічних шумів та ізоляція сенсорних зон від вібрацій.



Мікроструктура поверхні підкладки



Порівняння ефективності передачі енергії для гладкого скла та кута  $80^\circ$

# Наукова новизна та практичне значення

- Новизна: Вперше для обраного масштабу структур показано кутову залежність швидкості поширення та демпінгу.
- Реалізовано підхід до створення рідинних хвильових метаматеріалів.
- Практика: Створення анізотропних сенсорних платформ та систем спрямованого транспорту мас у мікрофлюїдиці.

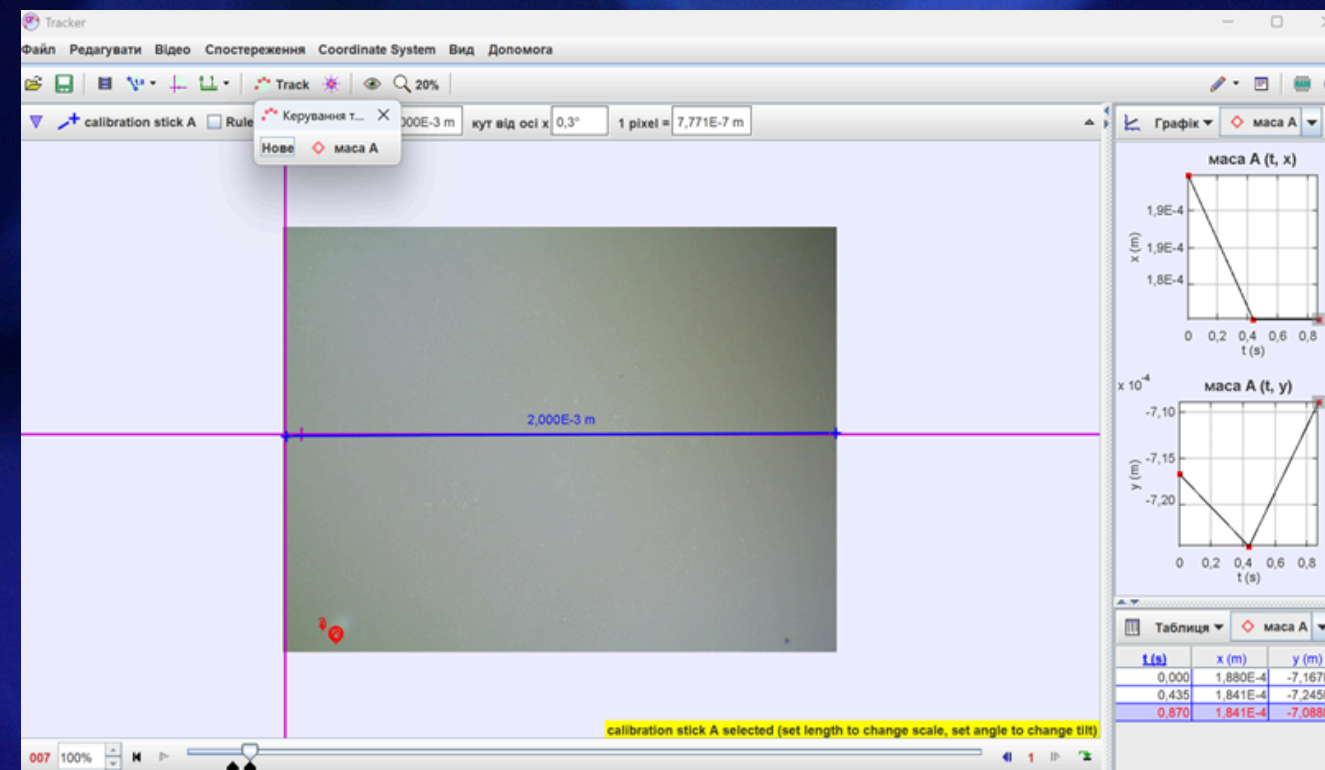
# Висновки та особистий внесок

## Основні результати:

- Експериментально підтверджено анізотропний характер поширення капілярних хвиль на текстурованих поверхнях.
- Виявлено, що зміна орієнтації мікроканалок від  $0^\circ$  до  $80^\circ$  дозволяє дискретно регулювати декремент загасання хвиль, реалізуючи ефект «капілярного фільтра».
- Доведено, що стан гетерогенного змочування (пластрон) у 6 разів знижує дисипацію енергії порівняно з ізотропними підкладками.

## Особистий внесок автора:

- Проведено аналіз наукових праць
- Власноруч виготовлено 5 серій анізотропних підкладок з різною геометрією рельєфу.
- Зібрано вимірювальний стенд на базі мікроскопа iScore та п'єзоактуатора.
- Здійснено обробку відеозаписів у ПЗ Tracker, проведено розрахунок похибок вимірювань



Верифікація профілю хвилі та фіксація локальних амплітуд у програмному середовищі Tracker.

# Джерела

1. Анізотропія змочування структурованих поверхонь: моногр. / за ред. М.В. Головка; НАН України, Ін-т фізики конденс. систем. Львів: ІФКС, 2017. 210 с.
2. Богданов О.В., Кузнецов Ю.М. Мікроструктурування поверхонь для керування капілярними потоками. Фізика і хімія твердого тіла. 2018. Т. 19, № 3. С. 245–252.
3. Герасименко О.В. Динаміка капілярних хвиль у тонких шарах рідини на текстурованих підкладках: дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.14 / Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ, 2021. 192 с.
4. Деген П.Ж., Кере Ф., Клан К. Капиллярные явления: хрупкие объекты / пер. с франц. А.С. Кузнецова. Москва: Физматлит, 2014. 256 с.
5. Кравченко О.М. Космофізика – нова методологія. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Гуманітарні науки. 2014. Вип. 203(1). С. 94–101.
6. Ландау Л.Д., Ліфшиць Є.М. Гідродинаміка. Теоретична фізика. В 10 т. Т. 6. Київ: Стилос, 2012. 736 с.
7. Проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні: тези конференції MSSE2019. Конференція молодих науковців з матеріалознавства та інженерії поверхні, 25-27 вересня 2019 р. / відп. ред. В.Р. Скальський; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. Львів: Бона, 2019. 206 с.
8. Сидоренко С.В., Петренко О.М., Ткаченко В.І. Анізотропія розсіювання енергії поверхневих хвиль на періодичних наноструктурах. Журнал нано- та електронної фізики. 2020. Т. 12, № 4. С. 04012-1–04012-5.
9. Ткаченко В.І., Вовк Р.В. Капілярні явища та методи мікрофлюїдики: навч. посіб. Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2019. 144 с.
10. Юнг Т., Лаплас П. Класична теорія капілярності: зб. наук. праць / упоряд. О.О. Уварова. Харків: Право, 2018. 128 с.