

ORCID: 0009-0009-1932-915X

М. М. ГАВРИЛЮК

Аспірант спеціальності “Фізика та астрономія” Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна
myroslav04@gmail.com

ORCID: 0009-0009-4425-7362

О. В. ЛИСЕНКО

Студент спеціальності “Прикладна фізика та наноматеріали” Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна
slysenko376@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7015-1662

Ю. О. ЛЯШЕНКО

Професор кафедри фізики Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна
lyshenko.yurij@gmail.com

DOI:10.31651/2076-5851-2025-174-188

PACS: 47.57.E, 47.50.Gj, 47.85.Dh

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ ОПОРУ РУХУ ТІЛ В ДИЛАТАНТНИХ КОМПОЗИТНИХ РІДИНАХ НА ОСНОВІ СИЛІКОНІВ

У роботі досліджено силу опору механічному руху пробних тіл у композитних дилатантних сумішах (КДС) на основі силіконового мастила з різною об’ємною часткою корунду (10–50%). Для проведення експериментів розроблено авторський пристрій, що дає змогу вимірювати силу опору в процесі занурення пробного тіла в КДС за різних швидкостей занурення. Додатково проведено гранулометрично-морфологічний аналіз частинок корунду, що дозволяє врахувати особливості їхніх розмірів і форми під час інтерпретації отриманих результатів.

Встановлено, що КДС із 10% і 20% корунду не проявляють вираженої дилатантної поведінки, оскільки збільшення швидкості занурення не супроводжується суттєвим зростанням сили опору. Натомість у випадку КДС із 30% і 40% корунду зафіксовано суттєве зростання сили опору зі збільшенням швидкості занурення, що підтверджує наявність дилатантної поведінки. За концентрації 50% корунду суміш переходить у майже пастоподібний стан, що ускладнює коректне вимірювання її динамічної силової відповіді.

Ключові слова: композитні дилатантні суміші, силіконові мастила, тверді частинки, об’ємна частка фаз, тензодатчик, гранулометрично-морфологічний аналіз.

1. Вступ

Рідини з неньютонівською поведінкою становлять окремий клас середовищ, реологічні властивості яких суттєво змінюються під дією зовнішніх навантажень. Серед представників таких рідин можна виділити дилатантні рідини, для яких характерне різке зростання в’язкості при збільшенні швидкості деформації зсуву [1-4]. Інтерес до їх вивчення зростає не лише з фундаментальних міркувань, а й через широкий спектр практичних застосувань. Композитні рідини на основі силіконів із додаванням

дисперсної фази становлять особливий інтерес, оскільки такі середовища відзначаються хімічною стабільністю та можливістю точно змінювати їхню реологічну поведінку шляхом регулювання концентрації та морфології твердих частинок в рідинах [2]. Це робить дилатантні композитні рідини на основі силіконів перспективними для створення адаптивних матеріалів та середовищ із керованими реологічними властивостями.

У даній роботі досліджено вплив об'ємної концентрації твердих частинок на реологічні властивості композитних дилатантних сумішей (КДС). Оскільки поведінка таких суспензій визначається тим, як частинки взаємодіють між собою та з рідиною, зміна їх концентрації істотно впливає на характер опору руху, що формує композитна система [3]. Кількісне та якісне вивчення цих закономірностей є важливим, як для розуміння механізмів дилатації, так і для подальшого використання подібних композитів у прикладних задачах, де потрібна керована зміна опору руху тіл в них.

У нашому дослідженні використано порошковий корунд у якості дисперсної фази, частинки якого мають малий розмір і неправильну форму, що впливає на характер їх взаємодії з рухомими тілами та, відповідно, здатність суспензії до дилатантної поведінки.

Метою роботи є:

- кількісно дослідити силу опору, що виникає при силовому зануренні пробного тіла в композитні дилатантні рідини з різними об'ємними частками корунду;
- визначити концентрацію твердої фази, за якої найбільше зростає сила опору при силовому зануренні пробного тіла.

Для реалізації цього завдання було обрано підхід, у якому сила опору визначається під час вільного занурення пробного тіла в досліджувані композитні сумуні. Такий метод дає змогу фіксувати силу опору композитної суміші в момент контакту з пробним тілом і, відповідно, кількісно оцінювати силу опору руху, що спричинює КДС.

2. Опис розробленого пристрою.

Для проведення експериментальної роботи нами було спроектовано та реалізовано авторський пристрій для визначення сили опору руху пробних тіл у КДС шляхом їх вільного занурення.

Для вимірювання сили, що діє на пробне тіло в ході його занурення у КДС, було використано тензодатчик. Він реєструє прикладене навантаження шляхом вимірювання ваги, однак таке подання не впливає на коректність подальших інтерпретацій. Застосування тензометричного методу дозволило відстежувати зміну навантаження на зразок у реальному часі та отримувати кількісні дані з достатньою чутливістю для дослідження особливостей силової відповіді КДС на рухомий зразок.

Механічна частина пристрою спроектована таким чином, щоб забезпечити строго вертикальний рух зразка під дією сили тяжіння та мінімізувати будь-які бокові відхилення. Основу конструкції становлять дві паралельні напрямні, по яких рухаються дві каретки. Між каретками жорстко закріплена плоска опорна пластина, на якій встановлено тензодатчик із прикріпленим до нього пробним тілом у формі циліндричного диску. Така конфігурація забезпечує високу стабільність орієнтації пробного тіла та запобігає перекосам під час його занурення в КДС.

У верхньому положенні пластина з тензодатчиком утримується електромагнітом, взаємодія з яким здійснюється через закріплену на опорній пластині залізну вставку. Після вимкнення електромагніта каретка разом із пробним тілом здійснюють вільний рух до моменту входження зразка в КДС. Після контакту та різкого зростання сили опору залишкова швидкість кареток зменшується та на кінцевому етапі руху гаситься гумовими кільцями-демпферами, що забезпечують м'яке гальмування рухомих

елементів і запобігають передаванню ударних навантажень на конструкцію приладу (Рис. 1).

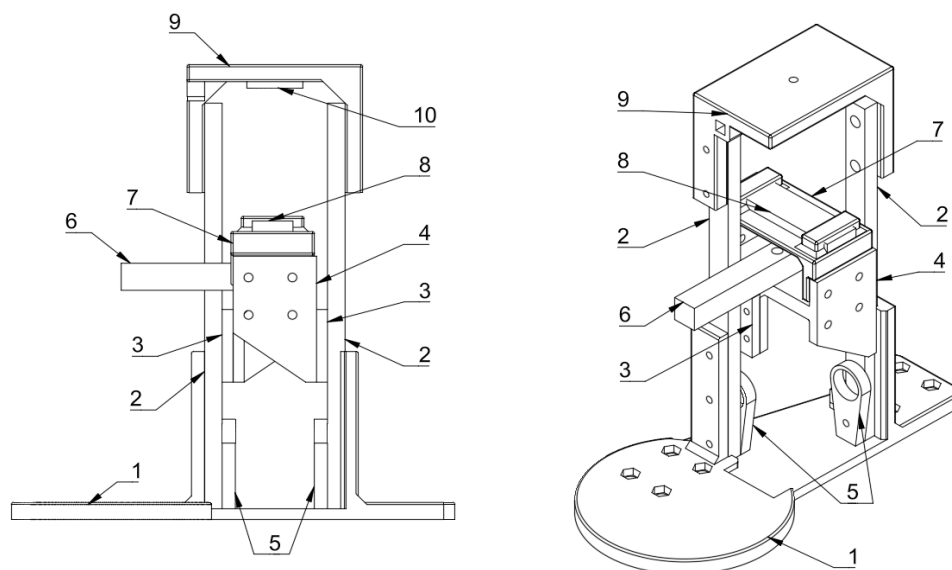


Рис. 1. Конструкція пристрою: 1 – опорна рама, 2 – напрямні, 3 – каретка, 4 – опорна пластина, 5 – гумові кільця-демпфери, 6 – тензодатчик, 7 – опорна пластина магнітного вузла, 8 – залізна пластинка, 9 – верхня несуча рама, 10 – електромагніт

Fig. 1. Device design: 1 – support frame, 2 – guide rails, 3 – carriage, 4 – support plate, 5 – rubber damping rings, 6 – strain gauge, 7 – support plate of the magnetic assembly, 8 – steel plate, 9 – upper supporting frame, 10 – electromagnet

В якості експериментального пробного тіла було використано сталевий диск циліндричної форми. Цей зразок мав масу 0.7 г, діаметр 32 мм та товщину 1 мм, що забезпечувало достатню жорсткість і виключало будь-які деформації під дією сили опору в ході занурення. Усі серії дослідів проводилися з використанням однакового зразка, що забезпечувало відтворюваність умов експерименту та коректність порівняння результатів між різними концентраціями твердих частинок в КДС.

Для реєстрації сили опору використовувався тензодатчик моделі НХ711-5КГ, підключений до плати аналого-цифрового перетворення НХ711, яка забезпечувала підсилення та перетворення сигналу в цифровий код для подальшої передачі на мікроконтролер. Мікроконтролер Arduino Uno здійснював оцифрування та передавання даних тензодатчика на комп'ютер через Serial інтерфейс зі швидкістю обміну 115200 бод.

Для керування електромагнітом у схемі використовувався релейний модуль, який дозволяв комутувати живлення магніта під керуванням Arduino. На панелі керування розміщена кнопка запуску. Після її натискання Arduino одночасно надає команду на вимикання живлення електромагніта через реле та розпочинає передачу даних з тензодатчика на комп'ютер. Такий принцип роботи забезпечує точну синхронізацію між моментом вивільнення зразка та початком збереження даних з тензодатчика.

3. Дослідження фізичних характеристик частинок корунду для КДС.

Розподіл частинок за розмірами та формою суттєво впливає на здатність суспензії до зміни в'язкості [5, 6]. З цією метою перед проведенням експериментів необхідно було провести гранулометрично-морфологічний аналіз для коректного подальшого представлення результатів.

Для отримання фотографічних зображень частинок корунду, що придатні для аналізу, необхідно було виготовити одношаровий зсип цих частинок. Для цього невелику кількість порошку корунду було нанесено на поверхню липкої стрічки, після чого обережно розподілено до утворення однорідного шару. Це забезпечувало чітку видимість кожної частинки та виключало їх накладання одна на одну, що могло б ускладнювати подальший аналіз.

Підготовлену поверхню було досліджено під оптичним мікроскопом, після чого було отримано знімки зсипу частинок корунду та окремо знімки масштабної сітки для подальшого визначення реальних розмірів частинок.

Для досягнення поставленої задачі з аналізу частинок корунду було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для автоматичного сегментування окремих частинок на отриманих фотографіях.

Передусім зображення переводилося у відтінки сірого та згладжувалося за допомогою білатерального фільтру, після чого контраст локально підсилювався методом CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization). При цьому зображення поділяють на невеликі області, у кожній окремо виконують автоматичне вирівнювання яскравості, а рівень підсилення обмежують, щоб уникнути надмірного підсилення шуму [7]. Потім задавалась кругова область, що відповідала полю зору мікроскопа, та вручну позначались окремі ділянки для виключення з обробки (світлові артефакти, затемнення, крайові дефекти).

Для формування початкової бінарної маски застосовувалося адаптивне порогоування (Adaptive Mean) для відділення частинок від фону. Отримана маска додатково очищалась морфологічною операцією відкривання (Open) для усунення дрібних артефактів.

Для розділення злиплених частинок використовувався метод вододілу (Watershed segmentation) [8]. Спочатку на бінарній масці обчислювалась евклідова карта відстаней, за локальними максимумами якої визначались маркери об'єктів (peak local maxima). Далі проводилась сегментація вододілом з додатковим урахуванням карти контурів, отриманої за допомогою Canny edge detector. У результаті було отримано цілочисельні мітки, де кожній частинці відповідав окремий сегмент, придатний для подальшого аналізу (Рис. 2).

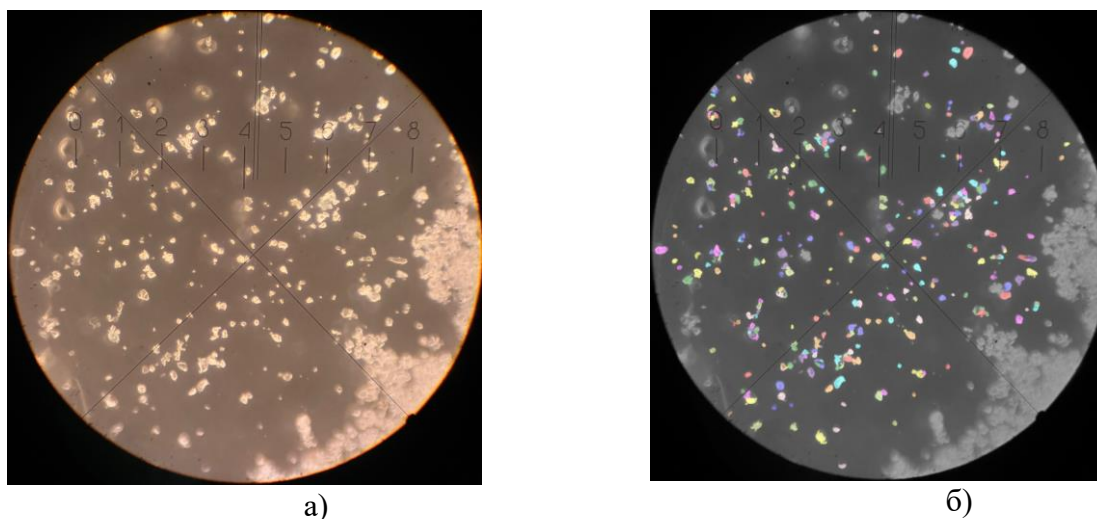


Рис. 2. Зображення частинок корунду: а – вихідне фото, б – результат сегментації частинок

Fig. 2. Corundum images: a – original photo, b – particle segmentation result

Після сегментації було проведено аналіз частинок для визначення гістограми їх розподілу за розмірами та проведена оцінка форми. Для переведення піксельних величин у реальні лінійні розміри попередньо було отримано фотографію вимірювальної сітки мікроскопа. На основі встановленого масштабу було визначено коефіцієнт, що дозволив точно перевести розмір у пікселях у лінійні величини порошків корунду.

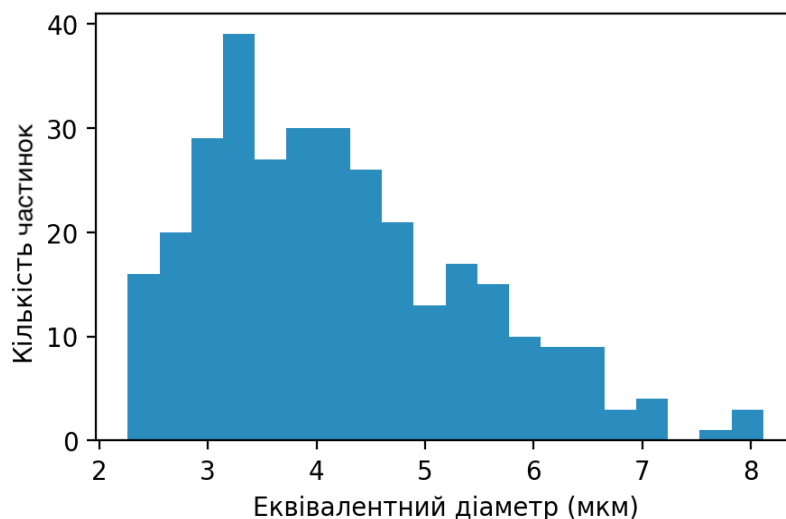


Рис. 3. Гістограма розподілу діаметра частинок
Fig. 3. Histogram of particle diameter distribution

В результаті проведеного аналізу встановлено, що більшість частинок мають еквівалентний діаметр приблизно 3-5 мкм, що формує основну фракцію порошку (Рис. 3). Присутність окремих частинок розмірами понад 6-7 мкм свідчить про наявність більших зерен або невеликих агломератів, які не були повністю розподілені під час приготування зразка.

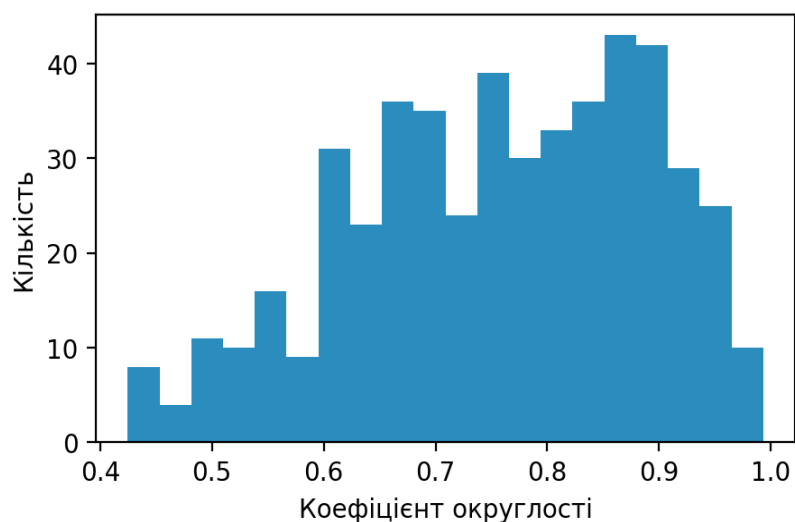


Рис. 4. Гістограма розподілу коефіцієнта округлості частинок
Fig. 4. Histogram of particle circularity coefficient distribution

Встановлено, що за формою частинки є неоднорідними: більшість мають неправильні обриси та виражені кутові контури, що характерно для корунду. Це підтверджується низькими значеннями коефіцієнту округлості для більшості областей (Рис. 4). Такі особливості форми сприяють збільшенню механічної взаємодії частинок у

суспензії та можуть підсилювати дилатантні ефекти при зростанні швидкості деформації зсуву.

4. Методологія проведення експериментів.

КДС готували при сталому об'ємі 50 мл, до складу яких входили силіконове мастило з кінематичною в'язкістю 350 сСт та порошок корунд F1000 M7 з густиною 3,9 г/см³. Для кожної цільової об'ємної частки твердої дисперсної фази обчислювали відповідний об'єм мастила та відповідну масу корунду (Таб. 1).

Таблиця 1. Параметри приготування КДС

Table 1. Preparation parameters of the composite dilatant mixture (CDM)

Об'ємна частка корунду, %	Об'єм мастила, мл	Об'єм корунду, мл	Маса корунду, г
10	45	5	19,5
20	40	10	39,0
30	35	15	58,5
40	30	20	78,0
50	25	25	97,5

Після визначення необхідної маси корунду для приготування КДС, спочатку відмірювали необхідний об'єм силіконового мастила, а вже потім додавали до нього порошок корунду. Така послідовність дозволяла вводити корунд поступово й рівномірно, що зменшувало ймовірність агломерації частинок та забезпечувало більш однорідний розподіл твердих включень у КДС [9].

Процедуру калібрування тензодатчика виконували за допомогою спеціального скрипта: до датчика послідовно приєднували еталонні важки відомої маси та програмно фіксували відповідні значення навантажень. На основі зафіксованих сигналів програма обчислювала калібрувальний коефіцієнт, що згодом записувався у пам'ять мікроконтролера.

Для отримання сигналів тензодатчика та проведення експериментальної роботи було розроблене спеціалізоване програмне забезпечення, яке приймає дані з плати Arduino через Serial інтерфейс. Arduino надсилало дані з частотою 10 Гц, що відповідає швидкості оновлення вимірювань тензодатчика. Кожний переданий пакет містить часову мітку та поточне значення ваги, отримане з датчика.

Для кожної об'ємної частки КДС виконували серію з десяти повторів, що дозволяє оцінити відтворюваність експерименту та зменшити вплив випадкових похибок. Дані кожного експеримента автоматично зберігаються у окремий файл у межах відповідної серії, що спрощує подальший аналіз.

Після завершення кожної серії вимірювань, усі отримані дані проходили однакову процедуру попередньої обробки. Спочатку значення, які надходили з тензодатчика у грамах, переводили у силу в міліньютонках, використовуючи співвідношення 1 г = 9.81 мН.

Оскільки навіть за повної повторюваності умов окремі експерименти можуть містити певні локальні шуми — випадкове тремтіння конструкції, короткі механічні удари, мікробурення рідини — виникала потреба сформувати узагальнену криву, яка б відображала типову поведінку системи, водночас зберігаючи інформацію про максимальні значення сили опору. Для цього використовували 95-й перцентиль (p95), оскільки він дає змогу зменшити вплив випадкових флуктуацій, але водночас не пригнічує пікові значення сили, які є найбільш інформативними при дослідженні опору КДС. На відміну від середнього або медіани, що надто згладжують дані, p95 дозволяє зберегти характерні максимуми сили, уникаючи спотворень через поодинокі шумові викиди [10].

5. Результати вимірювань та їх обговорення.

Перед аналізом отриманих результатів варто зазначити, що використання тензодатчика накладає певні особливості стосовно отриманих даних. Обмежена частота дискретизації та мінімальна фільтрація даних на рівні мікроконтролера призводять до часткового згладжування різких перепадів сили та невеликої затримки у відгуку. Попри це, такі ефекти не змінюють загального характеру силової відповіді та дозволяють коректно порівнювати поведінку КДС з різною об'ємною часткою твердої фази.

Для початку розглянемо результати вимірювання сили під час занурення зразка у чисте силіконове мастило та КДС з 10% і 20% вмістом корунду. Чистий силікон розглядається як базовий випадок, який відображає поведінку однорідної дилатантної в'язкої рідини.

У сумішах з невисокою концентрацією твердих частинок в силіконовому мастилі не спостерігалось ознак дилатантної поведінки, зокрема помітного зростання в'язкості при перемішуванні, що свідчить про те, що в цьому діапазоні концентрацій вплив доданих твердих частинок на реологічні властивості середовища залишається незначним.



Рис. 5. Зміни значення сили для чистого силіконового мастила та КДС з 10% і 20% вмістом корунду

Fig. 5. Changes in force values for pure silicone grease and composite liquids with 10% and 20% corundum content

Отримані залежності (рис. 5) підтверджують, що при вмісті корунду 10% та 20% дилатантні властивості КДС не проявляються. Через низьку в'язкість сумішей та

недостатній вплив твердої фази на в'язку поведінку КДС, досліджувані суміші не змогли суттєво загальмувати рух зразка після контакту з поверхнею. У результаті зразок проходив всю доступну глибину в КДС, а каретки досягали демпферних кілець раніше, ніж рух зупинявся через взаємодію з КДС. Відстань від поверхні суміші до точки спрацювання демпферів становила близько 4 см.

Характерні особливості кривих на графіку можна пояснити через послідовні етапи руху зразка та механічної відповіді вимірювального вузла:

1. 0-200 мс: вільне падіння зразка. У цей проміжок часу зразок рухається у повітрі, тому сила, зафіксована тензодатчиком, залишається близькою до нуля.
2. 200-300 мс: перший контакт з КДС та початкова стадія занурення. У момент контакту з поверхнею суміші сила починає зростати, відображаючи опір, який чинить середовище.
3. 300-600 мс: контакт кареток із кільцями-демпферами. Після проходження певної відстані у КДС зразок продовжує рух за інерцією, доки каретки не досягнуть демпферних кілець. У цей момент сила різко змінює напрямок, тому що тензодатчик реєструє від'ємне навантаження, оскільки деформація вузла через інерцію здійснюється у протилежному напрямку від сили тертя.
4. 600-2500 мс: затухання механічних коливань та стабілізація. Після удару об демпфери система входить у режим згасаючих коливань і крива сили поступово стабілізується.

В умовах експерименту не вдалося зафіксувати максимальну силу опору КДС, оскільки каретки досягали демпферних кілець раніше, ніж швидкість зразка була повністю погашена взаємодією з сумішшю. Однак це саме по собі підтверджує, що досліджувані суміші мали низьку в'язкість і практично не демонстрували її зміни зі збільшенням швидкості деформації. Водночас, навіть для цих експериментів помітно, що додавання корунду впливає на поведінку системи: зі збільшенням об'ємної частки твердої фази КДС поглинала більшу частину кінетичної енергії зразка ще до контакту кареток із демпферами.

На відміну від сумішей із низьким вмістом твердих частинок, суміші з об'ємною часткою корунду 30% і 40% демонстрували виразні дилатантні властивості відповідних КДС. За умов інтенсивного перемішування ці композитні суміші істотно збільшували свою в'язкість та набували характерної ущільненої текстури. Для суміші з 50% корунду ці ефекти проявлялися ще сильніше. Через надзвичайно високий вміст твердої фази суміш мала майже пастоподібну консистенцію: перемішування вимагало значних механічних зусиль, а сама суміш практично не розтікалася та зберігала форму після прикладання навантаження.

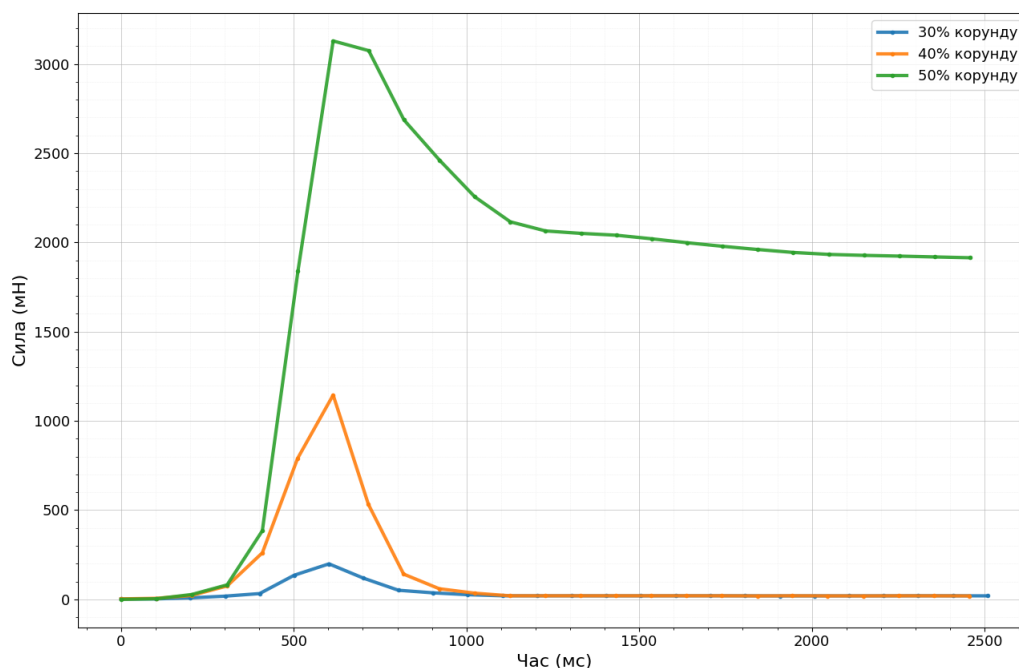


Рис. 6. Зміни значення сили для КДС з 30%, 40% та 50% вмістом корунду
 Fig. 6. Changes in force values for composite liquids with 30%, 40%, and 50% corundum content

Тепер розглянемо результати вимірювання сили в ході занурення зразка у КДС з 30%, 40% та 50% вмістом корунду (Рис. 6). Отримані графіки демонструють принципово іншу реакцію сумішей на прикладене навантаження порівняно з попередньо представленими результатами. Сила опору зростає настільки, що зразок повністю зупиняється в товщі КДС ще до досягнення демпферних кілець. Це свідчить про істотне збільшення в'язкості сумішей за збільшення швидкості деформації зсуву під час руху зразка в КДС.

Характерні особливості форми залежності сили від часу частково повторюються з попередньо представленими результатами, так як контакт з сумішшю відбувається близько 200 мс, де на зразок починає діяти сила різної величини в залежності від об'ємної частки доданого корунду. Пік зафіксованої сили не припадає на теоретичний момент найбільшого тертя при найбільшій швидкості руху в момент входження зразка у КДС через вже описані обмеження тензодатчика. Значно більше кінцеве значення сили для суміші з 50% корунду пояснюється тим, що надзвичайно висока в'язкість суміші утримувала зразок разом із рухомою частиною приладу, фактично не дозволяючи їм опуститися нижче, унаслідок чого весь вимірювальний вузол спирався на суміш протягом усього інтервалу спостереження.

Ненульові значення сили після завершення занурення зразка можна пояснити тим, що після завершення руху та згасання коливальних коливань на зразок починає діяти сила Архімеда, яка частково компенсує його вагу. Оскільки густина КДС зростає зі збільшенням вмісту корунду, відповідно зростає і величина сили, що обумовлює різницю між кінцевими рівнями сили для різних концентрацій твердої фази. Це припущення було перевірено шляхом чисельного обчислення теоретичної сили Архімеда та порівняння її з фактичними значеннями, отриманими під час експериментів. Виявлена відповідність підтверджує коректність запропонованого пояснення (Таблиця 2).

Таблиця 2. Порівняння розрахованої сили Архімеда та фактичної сили, що діє на тензодатчик

Table 2. Comparison of the calculated Archimedes force and the actual force acting on the load cell

Об'ємна частка корунду, %	0	10	20	30	40
Теоретичне значення сили Архімеда, мН	9,5	12,39	15,26	18,14	21,01
Фактичне значення сили, мН	12.1	15,32	17,98	20,3	24,23

Для додаткової перевірки дилатантної поведінки досліджуваних КДС було виконано серію експериментів із керованою зміною швидкістю занурення зразка. Оскільки для дилатантних суспензій характерне зростання сили опору зі збільшенням швидкості зсуву, було очікуваним підсилення силової взаємодії за більш інтенсивного руху.

Зміна швидкості реалізовувалася шляхом збільшення маси рухомого вузла пристрою. Базова маса рухомого вузла становить 274 г. Додатково до рухомого вузла встановлювалися вантажі масою 50г та 100г. Таким чином збільшувалася рушійна сила, а відтак і швидкість зразка у момент контакту з КДС. Експерименти було виконано для КДС із концентраціями корунду 30% та 40%, які в базових випробуваннях продемонстрували найбільш виражену силову відповідь.

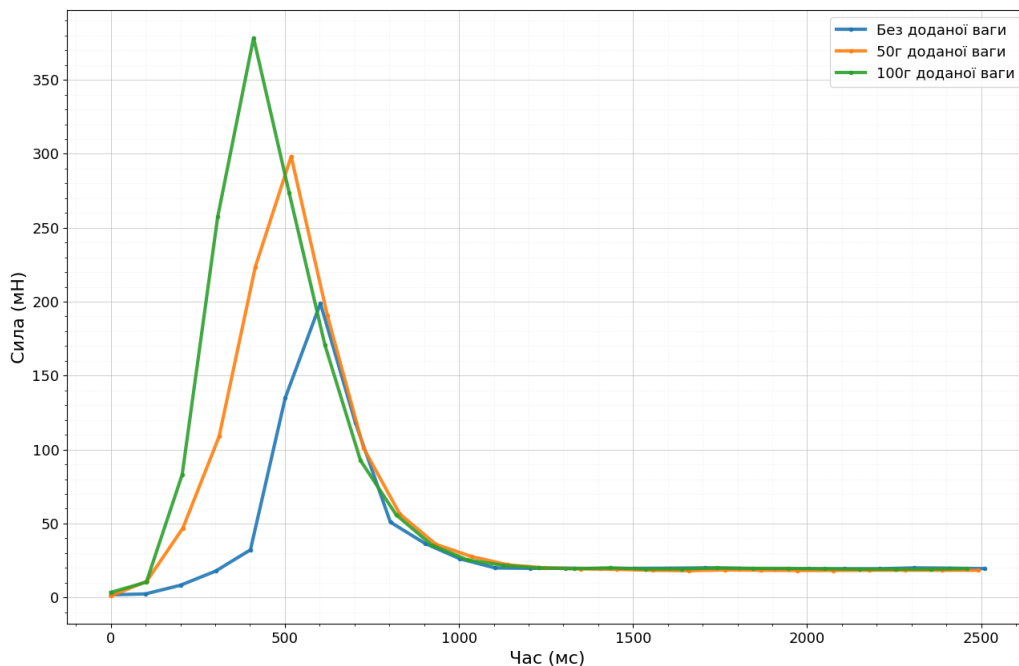


Рис. 7. Зміни значення сили для КДС з 30% вмістом корунду при різних швидкостях руху

Fig. 7. Changes in force values for a composite liquid with 30% corundum content at different motion velocities

Як видно з Рис. 7, зі збільшенням маси рухомого вузла та, відповідно, швидкості руху зразка у момент контакту з КДС спостерігається зростання величини силової відповіді, зокрема максимальних значень сили опору.

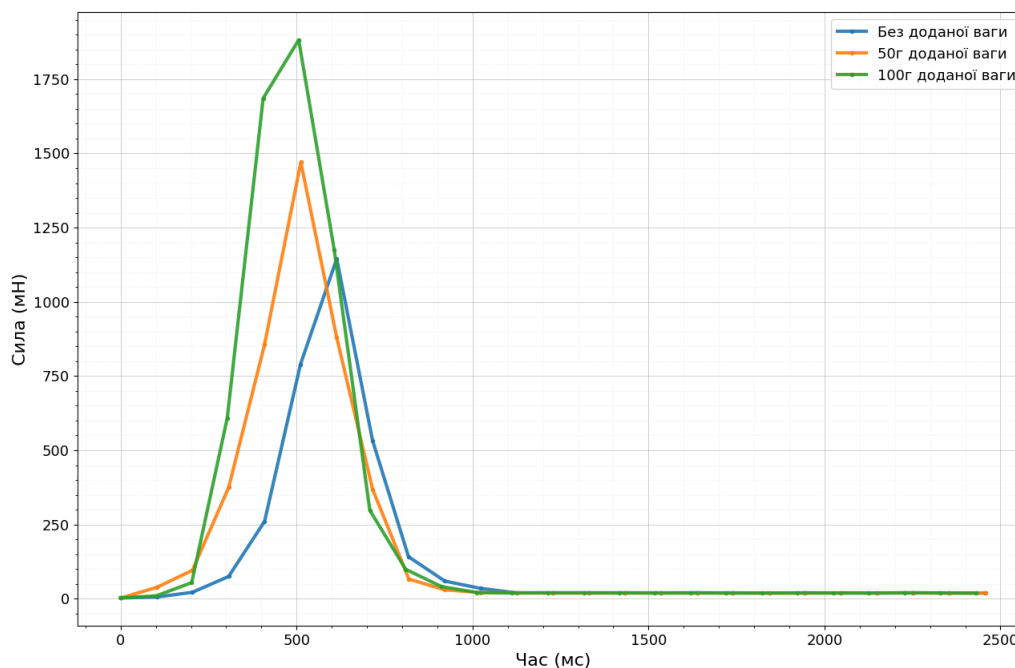


Рис. 8. Зміни значення сили для КДС з 40% вмістом корунду при різних швидкостях руху

Fig. 8. Changes in force values for a composite liquid with 40% corundum content at different motion velocities

На Рис. 8 спостерігається аналогічна поведінка: збільшення маси (а отже, швидкості занурення) призводить до зростання інтенсивності силової взаємодії з КДС. Така поведінка відповідає очікуваній для дилатантного середовища, оскільки збільшення швидкості занурення призводить до вищих швидкостей зсуву та, як наслідок, до зростання ефективного опору.

Таким чином, у результаті проведеної роботи було виконано серію експериментів з використанням авторського пристрою для визначення сили опору руху тіл в КДС шляхом аналізу процесу вільного занурення експериментального зразка в КДС. Отримані результати наведені у Таблицях 3 та 4.

Таблиця 3. Максимальне виміряне значення сили під час руху зразка в суміші
Table 3. Maximum measured force during the sample's motion in the liquid

Об'ємна частка корунду, %	0	10	20	30	40	50
Максимальна виміряна сила, мН	(8,5)	(14,1)	(23,9)	198,9	1145	3129,3

Таблиця 4. Зведене максимальне вимірне значення сили при зміні маси рухомої частини.

Table 4. Summary of the maximum measured force values for different moving-part masses.

Маса рухомого вузла	274 (+0%)	324 (+50%)	474 (+100%)
Максимальна вимірня сила для 30% суміші, мН	198.9	297.2 (+49.4%)	387 (+94.6%)
Максимальна вимірня сила для 40% суміші, мН	1145	1470 (+28.4%)	1882.5 (+64.4%)

6. Висновки.

Для чистого силіконового мастила та композитних сумішей з 10% і 20% вмістом корунду зафіксовані сили опору не досягають максимальних можливих значень, оскільки КДС в цьому діапазоні концентрацій не здатні ефективно загальмувати рух зразка до контакту кареток із демпферами. Зі збільшенням частки твердої фази до 30% і 40% опір середовища зростає та КДС повністю зупиняє зразок без участі конструктивних обмежень. Суміші силіконового мастила з об'ємними частками корунду 30% та 40% демонструють найбільш виражену дилатантну відповідь. Подальше збільшення концентрації до 50% призводить до надмірного ущільнення композиту, внаслідок чого КДС фактично переходить у пастоподібний стан, що обмежує коректність вимірювань і не дозволяє використовувати таку суміш для об'єктивної оцінки динамічної сили опору.

Додаткові експерименти зі збільшенням маси рухомої частини (для підвищення швидкості занурення) показали, що для КДС з 30% та 40% вмістом корунду силова взаємодія зростає зі збільшенням швидкості: підвищуються пікові значення сили опору. Це узгоджується з очікуваною для дилатантних суспензій залежністю від швидкості зсуву та підтверджує дилатантну природу досліджуваних КДС.

Встановлені нами закономірності дозволяють визначити концентраційні межі, в яких КДС переходить від майже ньютонівської поведінки до виражених ознак дилатації, для яких характерне різке зростання опору під дією навантаження. Такі дані є важливими для подальшого проектування композитів із керованим опором для забезпечення змінної реакції середовища залежно від швидкості та інтенсивності зовнішнього впливу.

Одним із ключових напрямків розвитку розробленого приладу та методики є збільшення частоти дискретизації тензодатчика, що дозволить точніше реєструвати різкі зміни сили та відокремлювати момент контакту зразка з сумішшю. Додатковим етапом розвитку може стати вимірювання в'язкості КДС за допомогою реологічних методів. Також впровадження реєстрації швидкості руху зразка дозволить точніше інтерпретувати вимірну силу, яка залежить від прикладеного навантаження, що в нашому випадку залежить від швидкості руху зразка.

Список використаної літератури:

1. Крих Г. Б. Особливості застосування реологічних моделей неньютонівських рідин / Г. Б. Крих // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2007. – № 581 : Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – С. 71-82. – Режим доступу <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/2283>
2. Nakanishi H. Fluid dynamics of dilatant fluid / H. Nakanishi, S. Nagahiro, N. Mitarai // Physical Review E. – 2012. – 85. – 011401 – Режим доступу: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.011401>

3. Rocha F. M. Drag of a shear-thickening suspension on a rotating cylinder / F. M. Rocha, Y. Forterre, B. Metzger, H. Lhuissier // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2023. – 970. – A35. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.624>
4. Ness C. The physics of dense suspensions / C. Ness, R. Seto, R. Mari // *Annual Review of Condensed Matter Physics*. – 2022. – 13 (1). – P. 97-117. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031620-105938>
5. Maurath J. Influence of particle shape on the rheological behavior of three-phase non-brownian suspensions / J. Maurath, B. Bitsch, Y. Schwegler, N. Willenbacher // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2016. – 497. – P. 316-326. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.03.006>
6. Guo J. Effects of volume fraction and particle shape on the rheological properties of oblate spheroid suspensions / J. Guo, Q. Zhou, R. C. K. Wong // *Physics of Fluids*. – 2021. – 33 (8) – Режим доступу: <https://doi.org/10.1063/5.0059346>
7. Rishi K. Particle size and shape analysis using Imagej with customized tools for segmentation of particles / K. Rishi, N. Rana // *Int. J. Comput. Sci. Commun. Netw.* – 2015. – 4. – P. 23-28. – Режим доступу: <https://doi.org/10.17577/ijertv4is110211>
8. Vijayran S. A watershed based morphological operator approach for image segmentation / S. Vijayran, P. Singh // *Intern. Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. – 2013. – Vol. 2, Is. 7. – P. 2845-2850. – Режим доступу: <https://ijarccce.com/wp-content/uploads/2012/03/63-h-savita-vijayran-A-WATERSHED-BASED-MORPHOLOGICAL-OPERATOR-APPROACH-FOR-IMAGE-SEGMENTATION.pdf>
9. Mewis J. Colloidal suspension rheology / J. Mewis, N. J. Wagner. – Cambridge University Press, 2012. – 393 P. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977978>
10. Bornmann L. The use of percentiles and percentile rank classes in the analysis of bibliometric data: Opportunities and limits / L. Bornmann, L. Leydesdorff, R. Mutz // *Journal of informetrics*. – 2013. – 7 (1). – P. 158-165. – Режим доступу: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1211.0381>

References:

1. Krykh H. B. (2007). Osoblyvosti zastosuvannya reolohichnykh modelei neniutonivskykh ridyn. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu «Lvivska politekhnika»*. № 581 : Teploenerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyzatsiia, 71–82. Retrieved from <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/2283>
2. Nakanishi H., Nagahiro S., Mitarai N. (2012). Fluid dynamics of dilatant fluid. *Physical Review E*, 85, 011401. Retrieved from <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.011401>
3. Rocha F. M., Forterre Y., Metzger B., Lhuissier, H. (2023). Drag of a shear-thickening suspension on a rotating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 970, A35. Retrieved from <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.624>
4. Ness C., Seto R., Mari R. (2022). The physics of dense suspensions. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 13 (1), 97-117. Retrieved from <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031620-105938>
5. Maurath J., Bitsch B., Schwegler Y., Willenbacher N. (2016). Influence of particle shape on the rheological behavior of three-phase non-brownian suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 497, 316-326. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.03.006>
6. Guo J., Zhou Q., Wong, R. C. K. (2021). Effects of volume fraction and particle shape on the rheological properties of oblate spheroid suspensions. *Physics of Fluids*, 33, (8). Retrieved from <https://doi.org/10.1063/5.0059346>

7. Rishi K., Rana N. (2015). Particle size and shape analysis using Imagej with customized tools for segmentation of particles. *Int. J. Comput. Sci. Commun. Netw*, 4, 23-28. Retrieved from <https://doi.org/10.17577/ijertv4is110211>
8. Vijayran S., Singh P. (2013). A watershed based morphological operator approach for image segmentation. *Intern. Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 2, Is. 7, 2845-2850. Retrieved from <https://ijarccc.com/wp-content/uploads/2012/03/63-h-savita-vijayran-A-WATERSHED-BASED-MORPHOLOGICAL-OPERATOR-APPROACH-FOR-IMAGE-SEGMENTATION.pdf>
9. Mewis J., Wagner N. J. (2012). Colloidal suspension rheology. *Cambridge University Press*. 1-393. Retrieved from <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977978>
10. Bornmann L., Leydesdorff L., Mutz R. (2013). The use of percentiles and percentile rank classes in the analysis of bibliometric data: Opportunities and limits. *Journal of informetrics*, 7 (1), 158-165. Retrieved from <https://doi.org/10.48550/arXiv.1211.0381>

M. M. HAVRYLIUK

Postgraduate student in Applied Physics and Nanomaterials at Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine
myroslav04@gmail.com

O. V. LYSENKO

Student majoring in Applied Physics and Nanomaterials at Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine
slysenko376@gmail.com

YU. O. LYASHENKO

Professor of the Department of Physics at Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Ukraine
lyshenko.yurij@gmail.com

DETERMINATION OF THE RESISTANCE FORCE ACTING ON BODIES MOVING IN DILATANT SILICONE-BASED COMPOSITE FLUIDS

DOI:10.31651/2076-5851-2025-174-188

PACS: 47.57.E, 47.50.Gj, 47.85.Dh

The aim of this work is to quantitatively investigate the resistance forces acting on specimens moving in composite dilatant mixtures (CDMs) based on silicone oil with different volume fractions of solid corundum particles (10%, 20%, 30%, 40%, 50%).

To conduct the experimental study, an original device was developed that enables measurement of the force acting on a specimen during its free immersion into the tested mixture. The device is based on an Arduino Uno microcontroller and includes a load cell with an HX711 module as well as an electromagnetic unit that ensures identical starting conditions for each run.

The repeatability of the experiments was achieved by standardizing the geometry and mass of the specimen and by performing multiple measurement series. The results were statistically summarized; the generalized force curve was formed using the 95th percentile, which reduces the influence of random noise while correctly representing peak loads.

In addition, an analysis of the distribution of the solid-phase particles by diameter and roundness coefficient was performed. The analysis showed that most particles have an

equivalent diameter of approximately 3–5 μm ; it was also established that the particles are heterogeneous in shape and have irregular outlines with pronounced angular contours, as confirmed by low values of the roundness coefficient.

During experiments with CDMs containing 10% and 20% corundum, the recorded resistance forces did not reach the maximum possible values because these mixtures were not able to effectively decelerate the specimen before it reached the structural limitations of the device. For CDMs with 30%, 40%, and 50% corundum, the results demonstrated a fundamentally different response to the applied load: the resistance force increased sufficiently for the specimen to come to a complete stop within the CDM. For 50% corundum, the mixture exhibited an almost paste-like consistency.

A series of experiments with controlled variation of the specimen immersion speed was also performed. The speed was changed by increasing the mass of the moving unit. For CDMs containing 30% and 40% corundum, an increase in the interaction force with increasing speed and higher peak resistance-force values were observed.

As a result of this work, it was established that the characteristics of resistance forces during the interaction of the specimen with composite dilatant mixtures are determined by the volume fraction of corundum and the loading conditions. It was shown that CDMs with concentrations of 30% and 40% are the most suitable for capturing dilatant behavior, whereas mixtures with 10% and 20% do not provide conditions for the correct manifestation and registration of maximum resistance-force values. Increasing the concentration to 50% shifts the mixture toward an almost paste-like state and limits the validity of the measurements.

Keywords: composite dilatant mixtures, silicones, volume fraction, load cell, solid particles, solid phase, dilatancy, granulometric–morphological analysis.

*Одержано редакцією 09.08.2025
Прийнято до друку 23.09.2025*

Опубліковано 24.12.2025