

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-64-73>

УДК 66.017

РІДИННО-ВІДШТОВХУВАЛЬНІ ІНФУЗОВАНІ ПОВЕРХНІ: ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВ

Маковський Д.П., Миронюк О.В.

LIQUID-REPELLENT INFUSED SURFACES: A REVIEW OF CURRENT TRENDS AND PROSPECTS

Makovkyi D.P., Myronyuk O.V.

У статті представлено узагальнений огляд сучасного стану досліджень у галузі рідинно-інфузованих поверхонь, що становлять перспективний напрям у створенні функціональних покриттів із керованими змочувальними властивостями. На основі аналізу актуальних літературних джерел розглянуто ключові фізико-хімічні принципи, що лежать в основі формування інфузованих поверхонь, включаючи наявність стабільного мастильного шару, утримуваного в капілярно-активній пористій або текстурованій матриці, поверхневу енергію твердого субстрату та механізми взаємодії між фазами. Порівняно властивості рідинно-інфузованих поверхонь (РІП) із традиційними супергідрофобними покриттями, зокрема щодо довговічності, стабільності при експлуатації в агресивному середовищі, а також самоочисної, антикорозійної та антиобмерзальної дії.

У статті систематизовано сучасні підходи до виготовлення РІП на основі як гідрофобних, так і гідрофільних текстур із подальшою інфузією мастил, що мають хімічну спорідненість із матрицею. Особливу увагу приділено використанню новітніх матеріалів, зокрема полімерів, наноструктурованих оксидів металів і біосумісних мастильних рідин, які забезпечують як функціональність, так і екологічну безпечність покриттів. Розглянуто створення адаптивних поверхонь, здатних до динамічної зміни своїх властивостей у відповідь на зовнішні стимули, зокрема вплив світла, температури або магнітного поля. Висвітлено ключові проблеми, пов'язані із забезпеченням механічної, хімічної та термічної стабільності РІП у реальних умовах експлуатації, включаючи цикли замерзання/танення, динамічні навантаження та контакт із агресивними рідинами.

Проаналізовано актуальні напрями застосування інфузованих поверхонь у сучасних технічних і промислових системах, зокрема в технологіях запобігання обмерзанню, антикорозійному захисті, біомедичних пристроях, мембранному розділенні рідин, мікрофлюїдних компонентах та покриттях із низьким коефіцієнтом зчеплення. Показано, що РІП мають значний міждисциплінарний потенціал для впровадження в енергетиці, охороні довкілля, транспорті, медицині та інших галузях, за умови подолання наявних технічних, технологічних і екологічних бар'єрів. Узагальнено перспективи подальшого розвитку цієї інноваційної технології в контексті матеріалознавства, прикладної інженерії та сталого виробництва.

Ключові слова: рідинно-інфузовані поверхні; змочування; антиобмерзання; антикорозійний захист;

Вступ. Змочування є фундаментальним фізичним явищем, що визначає взаємодію рідин із твердими поверхнями. Цей процес має ключове значення для великої кількості природних і техногенних процесів, включаючи транспортування рідин у ґрунтах, функціонування біологічних тканин, утворення конденсату, а також розробку сучасних матеріалів з контрольованими адгезійними властивостями [1].

Упродовж останніх десятиліть значна увага приділяється створенню супергідрофобних поверхонь, які демонструють надзвичайно високі контактні кути ($>150^\circ$) та низьку адгезію рідин. Такі поверхні зазвичай імітують мікро- та наноструктури, подібні до поверхні листя лотоса, завдяки чому вода скочується з них,

забираючи із собою частинки пилу [2]. Супергідрофобні матеріали мають потенціал у таких сферах, як самоочищення, антикорозійний захист, проти замерзання та біомедичне устаткування.

Постановка проблеми. Традиційні супергідрофобні покриття мають ряд суттєвих обмежень. Зокрема, їх ефективність знижується у вологих умовах, де відбувається конденсація вологи в мікропорах, що порушує ефект Кассі-Бакстера [3]. Також вони вразливі до ударів крапель, особливо при високих швидкостях, які можуть руйнувати повітряні кишеньки на поверхні [4]. Крім того, такі покриття погано працюють за низьких температур, де спостерігається утворення льоду та зниження антиприлипальних властивостей.

У зв'язку з цим зростає інтерес до нових підходів, зокрема рідинно-інфузованих поверхонь (РІП), які поєднують високі антимочувальні властивості з механічною стабільністю та стійкістю до вологи й обмерзання [5].

Рідинно-інфузовані поверхні (Liquid-Infused Surfaces, РІП) є новим класом функціональних покриттів, що виник як відповідь на обмеження традиційних супергідрофобних технологій. Основним принципом РІП є створення стабільного шару рідини, який утримується в мікро- або наноструктурованій твердій матриці за рахунок капілярних сил та хімічної сумісності. Така система утворює гладку, омочену поверхню з низьким коефіцієнтом тертя, що дозволяє ефективно відштовхувати рідини, запобігати обростанню, обмерзанню та забрудненню [5-6].

Для реалізації рідинно-інфузованих поверхонь необхідною умовою є наявність трьох взаємопов'язаних компонентів. Насамперед це пориста або текстурована поверхня, здатна утримувати мастило завдяки дії капілярних сил. Другим критичним елементом є рідина-інфузат, яка повинна бути хімічно спорідненою з твердою матрицею, але водночас несумісною з зовнішніми рідинами [7]. Третім компонентом є стабільна взаємодія між твердою фазою та мастилом, що запобігає витісненню рідини під впливом вологи, тиску або інших зовнішніх чинників.

Концепція РІП була вперше запропонована у 2011 році групою вчених з Гарвардського університету під керівництвом Джоанни Айзенберг. Їх надихнула здатність хижої рослини *Nepenthes* (рис. 1) утворювати стабільну рідинну плівку на внутрішній

поверхні пастки, що забезпечує надзвичайну слизькість. Відтоді технологія РІП стрімко розвивається, охоплюючи сфери від антиобмерзання до біомедицини [5].



Рис. 1. Хижа рослина *Nepenthes*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фізико-хімічні засади змочування, включаючи капілярні ефекти, описано в класичних роботах [1, 8], які сформували теоретичну базу для подальших досліджень поверхневої енергії та контактного кута [9-11]. Принципи супергідрофобності та біоміметичних структур, що імітують природні поверхні (наприклад, листя лотоса), узагальнено в оглядових роботах [2, 3], де також проаналізовано вплив шорсткості та адгезії на змочування.

Обмеження супергідрофобних поверхонь у складних умовах (волога, конденсат, обмерзання, механічні навантаження) викладені в роботах [4, 25, 26], що підкреслює необхідність пошуку альтернативних рішень. Саме такою альтернативою стали рідинно-інфузовані поверхні (РІП), концепція яких була запропонована в дослідженні [5], а її ефективність у біозахисті та антиприлипанні доведено в [6, 7].

Особливу увагу приділено взаємодії мастильного шару з пористою матрицею та його хімічній стабільності [7, 19]. Розширення можливостей РІП через використання адаптивних мастил (фотореактивних, магніточутливих) описано в [16, 17], де підкреслюється роль зовнішніх стимулів у зміні властивостей поверхні. Праці [12, 15, 27] демонструють успішне застосування РІП у

зниженні обмерзання, антикорозійному захисті та зборі вологи.

Виготовлення РІП з використанням спінювання CO_2 дозволяє отримувати стабільні пористі структури без утворення твердих відходів [13], а біоміметичні матеріали на основі SnO_2 або магнісвих сплавів демонструють відмінну корозійну стійкість і здатність до самовідновлення [14, 28]. Питання довговічності та стабільності таких покриттів, включаючи механічну, хімічну та термічну стійкість, глибоко досліджено в працях [18–22], де також наведено дані щодо оптимальних параметрів мастил (в'язкість, адгезія, леткість) та типів субстратів.

Згідно з даними з платформи ScienceDirect, спостерігається різке зростання кількості наукових публікацій, пов'язаних із РІП. Починаючи з 2015 року, коли ця технологія лише починає широку наукову апробацію, кількість статей щороку зростає, досягнувши піку понад 3700 публікацій у 2024 році (рис 2).

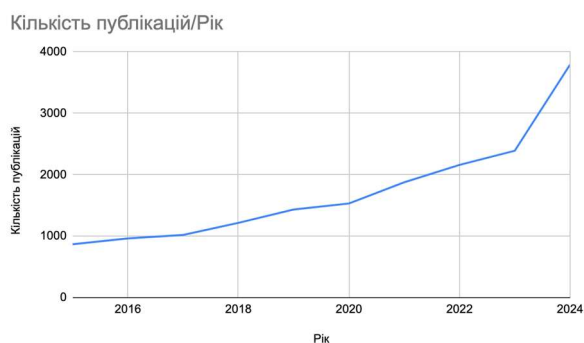


Рис. 2. Кількість публікацій з ключовими словами *liquid-infused surfaces* на ScienceDirect у 2015–2024 роках

Незважаючи на велику кількість практичних досліджень та оглядових публікацій, галузь вивчення рідинно-інфузованих поверхонь залишається динамічною й швидко зростає. Це зумовлює потребу в актуалізованих оглядах, які не лише систематизують останні наукові досягнення, але й допомагають виявити прогалини в знаннях для подальшого цілеспрямованого розвитку цієї технології.

Метою цієї роботи є здійснити огляд сучасного стану розвитку досліджень в галузі інфузованих рідинами текстурованих поверхонь для встановлення напрямів розвитку, практичного застосування та впровадження технології.

Постановка задачі. З огляду на стрімкий розвиток досліджень у сфері рідинно-інфузованих поверхонь та зростання кількості наукових публікацій, актуальним стає завдання систематизації наявних знань і технологічних рішень у цій галузі. Незважаючи на численні практичні роботи, потреба в узагальненому аналізі фізико-хімічних принципів, методів виготовлення, функціональних властивостей і напрямів застосування РІП залишається актуальною. Задачею цієї роботи є проведення цілісного огляду сучасного стану технології рідинно-інфузованих поверхонь, виявлення ключових досягнень та викликів, а також визначення перспектив подальшого розвитку з урахуванням наукових і прикладних потреб.

Викладання основного матеріалу. У основі опису змочування поверхні рідиною лежить рівняння Юнга [8], яке визначає рівноважний кут змочування θ на гладкій однорідній поверхні. Було виведено залежність рівноважного крайового кута ($\cos\theta$) від сил поверхневого натягу:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{\text{ТВ}} - \sigma_{\text{Ж}}}{\sigma_{\text{ТВ-Ж}}}, \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{ТВ}}$ – поверхневий натяг на межі тверда поверхня/газ; $\sigma_{\text{ТВ-Ж}}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз тверда поверхня/рідина; $\sigma_{\text{Ж}}$ – поверхневий натяг на межі рідина/газ.

Кут змочування визначається як кут, утворений перетином межі розділу рідина/тверда речовина та межі розділу рідина/повітря. Його також можна описати як кут між поверхнею твердого зразка та дотичною до яйцеподібної форми краплі на краю краплі.

Гідрофільною називається така поверхня, яка має високу спорідненість до води, тобто добре змочується водою. Це означає, що крапля води на такій поверхні розтікається, утворюючи низький кут змочування (менше ніж 90°). Такі поверхні активно взаємодіють із молекулами води завдяки наявності полярних груп, які здатні утворювати водневі зв'язки.

Гідрофобною є поверхня, яка має низьку спорідненість до води, тобто відштовхує воду. У цьому випадку крапля води має високий кут змочування (понад 90°), зберігає сферичну форму і не розтікається. Особливо супергідрофобними вважаються поверхні з кутом змочування $>150^\circ$ і дуже низьким кутом скочування ($<10^\circ$), що дозволяє краплі легко скочуватись із поверхні.

Теорія Зісмана (Zisman's Method) - одна з найперших емпіричних моделей, яка використовується для оцінки поверхневої енергії твердих тіл. Вперше запропонована В. А. Зісманом у 1964 році, ця методика ґрунтується на експериментальному визначенні кутів змочування для серії рідин з відомим поверхневим натягом на досліджуваній твердій поверхні.

Зісман виявив, що для неполярних рідин існує лінійна залежність між косинусом контактного кута ($\cos \theta$) та поверхневим натягом рідини. Цю залежність можна екстраполювати до значення $\cos \theta = 1$ (тобто до повного змочування), що відповідає певному значенню критичного поверхневого натягу, яке вказує на здатність твердої фази змочуватись певним класом рідин.

Обмеження даної теорії полягають в наступному. Модель застосовна переважно для неполярних або слабкополярних рідин. Не враховує кислотно-основні чи специфічні міжмолекулярні взаємодії. Вважає енергію твердого тіла єдиним скалярним параметром, що не відображає фізичну складність реальних поверхонь [9].

Теорія Оуенса–Вендта (Owens–Wendt method). Ця модель була запропонована у 1969 році й стала значним кроком уперед у порівнянні з моделлю Зісмана. Вона враховує, що поверхнева енергія складається з двох компонентів дисперсної (γ^d) та полярної (γ^p).

Контактний кут θ для кожної рідини обчислюється за модифікованим рівнянням Юнга і виражається через добуток відповідних компонентів енергії рідини і твердого тіла. Для побудови графіка необхідно мати контактні кути мінімум двох рідин з відомими значеннями γ^d та γ^p . Це дає змогу розв'язати систему рівнянь і визначити обидві компоненти енергії твердої поверхні.

Переваги даної теорії. Придатна для полімерних і складних поверхонь. Показує окремо вплив полярної та неполярної взаємодії. Широко використовується у фізичній хімії та матеріалознавстві [10].

Теорія Ван Осса–Чаудхурі–Гуда (van Oss–Chaudhury–Good або vOCG). Ця теорія є найбільш фізично обґрунтованою з усіх трьох. Вона виходить з уявлень про те, що поверхнева енергія включає дисперсні (неполярні) сили (γ^{LW}) і полярні (кислотно-основні) сили, які поділяються на кислотну (електронно-акцепторну) складову (γ^+) та основну

(електронно-донорну) складову (γ^-). Сумарна поверхнева енергія описується як:

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-}, \quad (2)$$

Дані компоненти визначаються через серію контактних кутів з трьома рідинами — зазвичай вода, формамід та діодметан — з відомими енергетичними характеристиками.

Переваги даної теорії. Враховує кислотно-основні взаємодії, що є критично важливими у біологічних системах та адгезії. Може бути застосована до гідрофільних, заряджених та біоактивних поверхонь. Є однією з найбільш точних моделей, хоча й складною у використанні [11].

Рідинно-інфузовані поверхні (РІП) мають низку суттєвих переваг порівняно з традиційними супергідрофобними покриттями. Супергідрофобні поверхні, засновані на мікро- і наноструктурах, що імітують природні, наприклад листя лотоса. Демонструють надзвичайно високі кути змочування та ефект самоочищення. Проте такі поверхні є вразливими до механічних пошкоджень, впливу конденсату, високої вологості та навіть до дії крапель, що падають із певною швидкістю. Крім того, вони мають обмежену ефективність у боротьбі з обмерзанням, а також не здатні до самовідновлення [12].

На відміну від них, РІП забезпечують значно вищу довговічність завдяки наявності стабільного шару в'язкої рідини, який не лише захищає тверду поверхню, але й зменшує тертя між рідиною та поверхнею [5]. Ця рідина здатна частково перерозподілятися у разі локальних пошкоджень, забезпечуючи ефект самовідновлення [6]. Важливо також, що РІП демонструють репелентність не лише до води, а й до широкого спектра рідин — у тому числі олій, органічних розчинників і біологічних середовищ. Така універсальність робить їх більш придатними для практичного застосування в умовах змінного середовища, включно з біомедичними технологіями, морською інженерією та антикорозійними покриттями.

Отже, хоча РІП можуть мати дещо нижчі контактні кути порівняно зі супергідрофобними покриттями, їхні експлуатаційні переваги — довговічність, широка хімічна стійкість і здатність до самовідновлення — роблять їх більш функціональними та надійними у ряді критичних застосувань.

Стратегії виготовлення. Основними стратегіями створення РІП є формування пористої текстури на субстраті та введення в неї відповідної в'язкої рідини.

РІП на гідрофобних текстурах. Для створення рідинно-інфузованих поверхонь (РІП) ключовим є формування гідрофобної або супергідрофобної текстури, здатної утримувати мастильну фазу. Такі текстури зазвичай представляють собою мікро- або наноструктуровані шари, виготовлені з матеріалів із низькою поверхневою енергією, або покриті гідрофобізуючими агентами (наприклад, фторвмісними силанами).

Впровадження мастил у такі текстури відбувається завдяки капілярним силам і взаємодіям між матеріалом поверхні та рідиною. Для забезпечення стабільного утримання мастила необхідно дотримуватись капілярної сумісності: мастило повинно краще змочувати текстуру, ніж зовнішні рідини, з якими взаємодіє поверхня. У випадку успішного впровадження формується стабільний мастильний шар, який захищає структуру, створює бар'єр для проникнення інших рідин і забезпечує ефективне ковзання крапель [5].

Серед типових матеріалів для гідрофобних структур, які використовуються в РІП, можна виділити:

Полімерні матриці, такі як полістирен, полідиметилсилоксан, поліуретани – через їх низьку поверхневу енергію та гнучкість. У дослідженні [13] представлено новий підхід до створення РІП на основі пористого полістиролу, виготовленого за допомогою газообмеженої технології спінування надкритичним CO_2 . Метод дозволяє отримувати однорідну пористу структуру з регульованими параметрами, що забезпечує високу зсувостійкість покриттів (гістерезис кута змочування = 4.4° після 10 хв при 8500 об/хв) без утворення твердих відходів та з підвищеною ефективністю виробництва.

Наноструктуровані оксиди металів — наприклад, TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 — забезпечують багаторівневу шорсткість і стабільність. У роботі [14] розроблено біоміметичне покриття на основі пористого SnO_2 із подальшим створенням рідинно-інфузованої поверхні за участі силіконового мастила. Отримане РІП демонструє відмінну корозійну стійкість (ефективність 99,6% після 180 год у 3,5% NaCl) та здатність до самовідновлення після механічних пошкоджень, що свідчить про його високий потенціал для практичного використання.

Правильна архітектура поверхні та капілярна сумісність дозволяють мастилу залишатися стабільно закріпленим навіть під дією механічного навантаження або змін температури, що визначає довготривалу функціональність РІП-систем.

РІП на гідрофільних текстурах. Окрім традиційного використання гідрофобних матриць для створення рідинно-інфузованих поверхонь (РІП), існує також ефективний підхід на основі гідрофільних текстур. У цьому випадку гідрофільні підкладки потребують хімічної або фізичної модифікації для покращення адгезії мастила й утримання його всередині мікро- або наноструктур. Часто застосовують оксидні шари (наприклад, TiO_2 або SiO_2), які забезпечують стабільне закріплення мастила за рахунок капілярних сил та хімічної спорідненості.

Процес створення включає формування пористої або текстурованої поверхні з високою питомою площею та подальшу модифікацію функціональними групами, які сприяють стабілізації мастила — наприклад, силанування або полімерне покриття. Це дозволяє утримувати мастило навіть на поверхнях, які спочатку мають високу змочуваність водою, і забезпечує стабільні антирозповсюджувальні властивості.

Такий підхід відкриває можливості для створення РІП на основі широкого спектру матеріалів, включаючи скло, метали, кераміку та полімери, що особливо важливо для біомедичних застосувань, сенсорики, антикорозійного захисту та антиизмерзальних систем.

В роботі [15] було розроблено смугасті поверхні з чергуванням супергідрофільних і суперкогезійних ділянок на основі кремнію для підвищення ефективності збору туману. Такі поверхні забезпечують швидке зародження крапель, їхнє спрямоване транспортування та високу ефективність конденсації, що на 86,9% перевищує ефективність незміненого кремнію.

Адаптивні поверхні. Останні дослідження у сфері рідинно-інфузованих поверхонь зосереджені на розробці інтелектуальних або адаптивних текстур, які здатні реагувати на зовнішні стимули, такі як ультрафіолетове випромінювання, зміни температури, електричне або магнітне поле, хімічні впливи тощо. Ці поверхні демонструють змінну змочуваність і забезпечують керовану маніпуляцію краплями, що робить їх перспективними для мікрофлюїдних пристроїв,

біомедичних сенсорів, систем доставки рідин та активного контролю конденсації.

Один із підходів — використання фотореактивних мастил або полімерів, що змінюють свої властивості під дією УФ-світла. Наприклад, мастила з азобензеновими або флуоресцентними функціональними групами можуть реверсивно змінювати свою змочувальність під впливом опромінення, дозволяючи відкривати або закривати канали для рідини на вимогу [16].

Інший підхід базується на впровадженні магніточувливих наночастинок у мастило. Завдяки зовнішньому магнітному полю можна локально змінювати форму або розташування мастильної фази, що забезпечує динамічне переміщення крапель або активацію зон змочування. Цей механізм дозволяє створювати відновлювані й програмовані патерни на поверхні [17].

Загалом, адаптивні РІП відкривають новий вимір функціональності в галузі інженерії поверхонь, особливо коли потрібна динамічна, неінвазивна і точна зміна властивостей поверхні в реальному часі.

Стабільність інфузованих поверхонь. Стабільність інфузованих поверхонь (РІП) є ключовим фактором для їх практичного застосування в умовах навколишнього середовища, де присутні механічні, хімічні або термічні впливи. Незважаючи на високу ефективність у відштовхуванні рідин, довговічність таких систем значною мірою залежить від здатності утримувати мастильний шар у текстурованій матриці, а також зберігати свої змочувальні властивості при механічних навантаженнях, впливі температур, агресивних речовин чи тривалого використання. У цьому розділі розглядаються основні аспекти стабільності РІП, включаючи механічну, хімічну, термічну стійкість, а також стабільність мастильного шару.

Механічна стабільність інфузованих поверхонь. Механічна стабільність рідинно-інфузованих поверхонь (РІП) є критично важливою для їхнього практичного застосування, особливо в умовах інтенсивного зношування, динамічних навантажень та тривалого впливу навколишнього середовища.

Довговічність рідинно-інфузованих поверхонь визначається низкою ключових факторів, серед яких особливе значення має в'язкість мастила. Зокрема, мастила з високою в'язкістю (1000–3000 сSt) демонструють зменшену втрату через явища коагуляції та

утворення змочувальних гребенів, що сприяє тривалішому збереженню функціональних властивостей поверхні. Крім того, така в'язкість забезпечує ефективне самовідновлення мастильного шару після локальних механічних пошкоджень, що критично важливо для стабільності РІП. Ще одним важливим аспектом є стійкість до динамічних навантажень: поверхні повинні зберігати свої властивості під впливом зсувних сил, вібрацій або періодичних механічних впливів. Нарешті, тривала експлуатація у реальних умовах передбачає не лише механічну, а й хімічну стійкість до вологи та агресивних середовищ, що є вирішальним для впровадження РІП у практичні застосування [18].

Таким чином, для забезпечення високої механічної стабільності РІП необхідно враховувати вибір відповідного мастила, конструкцію поверхні та умови експлуатації.

Хімічна стабільність рідинно-інфузованих поверхонь визначається низкою взаємопов'язаних факторів, серед яких ключовими є тип мастила, матеріал субстрату та мікро-/наноструктура поверхні. Зокрема, фторовані мастила, як-от перфторполіефіри (PFPE), демонструють виняткову стійкість до кислот, лугів та органічних розчинників завдяки своїй хімічній інертності, низькій леткості та високій термічній стабільності [19]. Вибір хімічно інертних матеріалів для субстрату, таких як оксиди металів (наприклад, Al_2O_3 або TiO_2) або флуоровуглецеві полімери, додатково підвищує загальну стійкість покриття до агресивних середовищ [20]. Створення мікро- або нанотекстурованої структури відіграє важливу роль у стабілізації мастильного шару: вона не лише сприяє кращому його утриманню, але й запобігає витісненню рідини під дією хімічних агентів [21]. У результаті поєднання цих факторів поверхні демонструють високі експлуатаційні характеристики, включаючи стійкість до екстремальних значень рН. Деякі інфузовані алюмінієві поверхні зберігають свої властивості навіть після занурення в розчини з рН 1 та рН 14 [20].

Термічна стабільність інфузованих поверхонь. Термічна стабільність є важливим параметром, що визначає довговічність та придатність РІП у жорстких умовах експлуатації. Високі температури можуть призводити до випаровування або витіснення мастила, а також до деградації текстурованої структури. Для підвищення термостійкості застосовуються стійкі мастильні матеріали, такі

як перфторполіефіри, та термостабільні підкладки, зокрема оксиди металів (Al_2O_3 , TiO_2) або алюміній [20].

Дослідження продемонстрували, що алюмінієві РІП без використання фторвмісних сполук зберігають свою антиобмерзальну здатність після термічної обробки при 150°C , що свідчить про високу термічну стабільність [20]. У роботі вивчено динаміку змочування при нагріванні і показано, що ріст країв змочування мастила (wetting ridge) на нанотекстурах змінюється з підвищенням температури, що впливає на утримання мастила. Додатково продемонстрували можливість проєктування РІП з підвищеною ударостійкістю і стійкістю до термонавантажень за рахунок комбінування мікро- та наноструктур [22].

Таким чином, використання стабільних мастил, термостійких матеріалів і раціонального дизайну мікроструктур дозволяє створювати РІП, які зберігають свої властивості при підвищених температурах та забезпечують тривалий захист поверхні в агресивних умовах.

Типові застосування інфузованих поверхонь. Рідинно-інфузовані поверхні є перспективним класом функціональних матеріалів, що характеризуються високою стабільністю, низьким коефіцієнтом тертя, відштовхувальною здатністю до широкого спектра рідин і здатністю до самовідновлення. Завдяки цим властивостям, РІП знаходять практичне застосування в різноманітних галузях — від антикорозійного захисту та антиобмерзальних покриттів до біомедичних імплантів, мікрофлюїдних пристроїв та систем збирання рідини. Їх здатність забезпечувати кероване змочування, мінімізувати адгезію та перешкоджати забрудненню робить ці поверхні особливо цінними для експлуатації в умовах агресивного хімічного або механічного середовища. У наступних підрозділах буде систематизовано актуальні напрями використання РІП, а також наведено сучасні приклади реалізації технології відповідно до наукових досліджень останніх років.

Розділення олії та води. Рідинно-інфузовані поверхні (РІП) демонструють високий потенціал у розділенні водно-олійних сумішей завдяки своїм унікальним властивостям змочування та низькому коефіцієнту тертя. Їх застосування дозволяє ефективно відокремлювати воду від олії, що є критично важливим у багатьох промислових процесах, включаючи очищення стічних вод, нафтову промисловість та харчову індустрію.

Мембрана ZIF-LF з ультраслизькими властивостями. Дослідження [23] описує мембрану на основі ZIF-LF, яка використовує воду як природне мастило. Ця мембрана показує високу відштовхувальну здатність до олійних рідин, що робить її ефективною для розділення водно-олійних сумішей.

Кварцові фільтраційні середовища для промислового розділення води та олії. Робота [24] зосереджена на розробці та оптимізації кварцових фільтраційних середовищ для промислового розділення води та олії, з акцентом на покращення змочуваності поверхні, мінімізацію забруднення та підвищення ефективності відторгнення олії.

Антизледеніння. Утворення льоду на твердих поверхнях становить серйозну проблему для авіації, енергетики, телекомунікацій, транспорту та побутових систем. РІП-покриття демонструють значний потенціал у протидії зледенінню завдяки своїй низькій адгезії до крапель води, що знижує ймовірність нуклеації льоду та полегшує його видалення.

Пасивні стратегії базуються на мінімізації енергії взаємодії між краплею та поверхнею. Завдяки наявності стабільного мастильного шару, РІП знижують температуру нуклеації льоду і сповільнюють його ріст. Наприклад, дослідження показують, що температура початку замерзання на РІП може бути на кілька градусів нижчою, ніж на супергідрофобних поверхнях [25].

Активні стратегії включають використання зовнішніх стимулів — наприклад, фото-, термо- або електроактивації — для змінення властивостей мастила або самої поверхні. Деякі РІП з фотореактивними компонентами дозволяють локально змінювати змочуваність під впливом світла, запобігаючи налипанню кристалів льоду [26].

Завдяки здатності до самовідновлення та низькому значенню критичного зусилля відриву льоду, РІП-покриття можуть багаторазово протистояти циклам замерзання/відтавання без значної деградації своїх властивостей. Таким чином, вони є перспективним матеріалом для застосування в умовах підвищеної вологості та низьких температур

Антизабруднення. РІП демонструють високий потенціал у зменшенні забруднення біологічного та хімічного походження, особливо в умовах, де традиційні покриття виявляються недостатньо ефективними. Завдяки низькій адгезії до білків, мікроорганізмів і біоплівки,

РІП значно знижують рівень біозабруднення на медичних пристроях, фільтраційних мембранах, суднових корпусах та в інших середовищах, схильних до біологічного обростання. Мастильний шар забезпечує динамічну бар'єрну функцію, що перешкоджає прикріпленню організмів та частинок навіть у складних експлуатаційних умовах. Наприклад, у морському середовищі РІП здатні ефективно запобігати адгезії водоростей, бактерій та інших морських організмів, подовжуючи термін служби конструкцій і зменшуючи потребу в обслуговуванні [25].

Антикорозія. РІП мають потенціал у захисті металів, таких як мідь (Cu), магній (Mg) та сталь, від корозії. Завдяки створенню фізичного бар'єру, який перешкоджає проникненню води, кисню та інших агресивних агентів до металевої поверхні, РІП значно знижують швидкість корозійних процесів.

Дослідження показали, що РІП на основі оцинкованої сталі забезпечують високу корозійну стійкість навіть після тривалого впливу агресивних середовищ, таких як соляні розчини та кислотні дощі. Це досягається завдяки стабільному мастильному шару, який зберігає свої властивості навіть після механічного зносу та впливу зовнішніх факторів [27].

У випадку магнієвих сплавів, які особливо схильні до корозії, застосування РІП з самовідновлювальними властивостями дозволяє ефективно захищати поверхню від агресивного морського середовища. Такі покриття здатні зменшити адгезію бактерій та інших біологічних агентів, що сприяє зниженню мікробіологічної корозії [28].

Крім того, новітні дослідження демонструють, що РІП, виготовлені за допомогою методів, таких як лазерне травлення та інфузія мастил, можуть забезпечити ефективний захист від корозії для різних металів, включаючи алюміній та його сплави. Ці покриття характеризуються високою стійкістю до механічного зносу та довготривалою стабільністю в агресивних умовах [14].

Перспективи розвитку. Незважаючи на значний прогрес у створенні РІП, перед цією технологією досі стоять серйозні виклики. Зокрема, обмежена довготривала стабільність покриттів та поступове виснаження мастильного шару під впливом механічних, термічних або хімічних навантажень залишаються ключовими проблемами. Багатоетапні та дорогі методи формування

мікро- і наноструктур ускладнюють масштабування виробництва РІП.

Для подолання цих обмежень розробляють нові матеріали та системи. Зокрема, активно досліджують екологічно безпечні мастила на основі біорозкладних або їстівних олій і композитні матриці з натуральних полімерів. РІП, виготовлені з біорозкладних полімерних волокон і харчових олій, продемонстрували високу довговічність та антизабруднюючі властивості. Подібні рішення зменшують екологічне навантаження та відкривають перспективи нових застосувань (наприклад, у пакуванні харчових продуктів чи біомедицині).

Інші напрями включають адаптивні поверхні із здатністю до самовідновлення та реагування на зовнішні стимули. Так, розробляють адаптивні РІП, які під дією температури, електричних чи магнітних полів можуть змінювати свої властивості або оновлювати мастильний шар. Використання органогелів та гідрогелів як пористих матриць забезпечує внутрішній резервуар мастила й підвищує здатність до самозалікування поверхні.

Ключовими завданнями також є масштабування технології та її тестування в реальних умовах. Необхідно перейти від лабораторних зразків до промислових процесів і польових випробувань. Наприклад, ARPA-E фінансує проєкт зі створення та тестування РІП-покриттів для морського транспорту, спрямованих на зниження енергоспоживання суден. Разом із тим, впровадження РІП потребує спрощених і масштабованих технологій нанесення (які можна застосовувати на поверхнях будь-якого розміру).

Висновок. Рідинно-інфузовані поверхні (РІП) становлять інноваційний клас функціональних покриттів, що поєднують у собі високу хімічну інертність, механічну стабільність, універсальну рідиновідштовхувальність та здатність до самовідновлення. Завдяки наявності стабільного мастильного шару в пористій або текстурованій матриці, РІП демонструють переваги над традиційними супергідрофобними поверхнями, зокрема в аспектах довговічності, стійкості до обмерзання, забруднення й корозії, а також функціонування в агресивних середовищах.

Огляд сучасної літератури засвідчує зростаючий науковий і прикладний інтерес до цієї технології. Розроблено низку стратегій створення РІП як на гідрофобних, так і на гідрофільних підкладках, із використанням

полімерних, оксидних та композитних матеріалів. Особливої уваги набувають адаптивні поверхні, здатні до реагування на зовнішні стимули, що розширює функціональні можливості РІП у високотехнологічних застосуваннях.

Разом з тим, технологія потребує подальших досліджень у напрямках підвищення довготривалої стабільності, розробки екологічно безпечних та біосумісних компонентів, а також масштабування методів виготовлення. Вирішення цих завдань можливе шляхом міждисциплінарної інтеграції досягнень хімії поверхні, матеріалознавства, нанотехнологій та інженерії.

Таким чином, РІП мають високий потенціал для впровадження в широке коло галузей — від енергетики та транспорту до біомедицини й екологічних технологій — що зумовлює актуальність подальших фундаментальних і прикладних досліджень у цій сфері.

Л і т е р а т у р а

- Widom B. Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves , Pierre-Gilles de Gennes , Françoise Brochard-Wyart, and David Quéré (translated from French by Axel Reisinger) Springer-Verlag, New York, 2004. ISBN 0-387-00592-7. Physics Today. 2004. Vol. 57, no. 12. P. 66–67. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1878340>.
- Bhushan B., Jung Y. C. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. Progress in Materials Science. 2011. Vol. 56, no. 1. P. 1–108. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.003>.
- Quéré D. Wetting and Roughness. Annual Review of Materials Research. 2008. Vol. 38, no. 1. P. 71–99. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.38.060407.132434>.
- Richard D., Clanet C., Quéré D. Contact time of a bouncing drop. Nature. 2002. Vol. 417, no. 6891. P. 811. URL: <https://doi.org/10.1038/417811a>.
- Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity / T.-S. Wong et al. Nature. 2011. Vol. 477, no. 7365. P. 443–447. URL: <https://doi.org/10.1038/nature10447>.
- Liquid-infused structured surfaces with exceptional anti-biofouling performance / A. K. Epstein et al. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2012. Vol. 109, no. 33. P. 13182–13187. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1201973109>.
- Designing Liquid-Infused Surfaces for Medical Applications: A Review / C. Howell et al. Advanced Materials. 2018. Vol. 30, no. 50. P. 1802724. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201802724>.
- III. An essay on the cohesion of fluids. Philosophical transactions of the royal society of london. 1805. Vol. 95. P. 65–87. URL: <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>.
- Contact angle, wettability, and adhesion / ed. by F. M. Fowkes. WASHINGTON, D.C. : AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 1964. URL: <https://doi.org/10.1021/ba-1964-0043>.
- Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the surface free energy of polymers. Journal of applied polymer science. 1969. Vol. 13, no. 8. P. 1741–1747. URL: <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>.
- Van Oss C. J., Good R. J., Chaudhury M. K. Additive and nonadditive surface tension components and the interpretation of contact angles. Langmuir. 1988. Vol. 4, no. 4. P. 884–891. URL: <https://doi.org/10.1021/la00082a018>.
- Enhanced condensation on lubricant-impregnated nanotextured surfaces / S. Anand et al. ACS nano. 2012. Vol. 6, no. 11. P. 10122–10129. URL: <https://doi.org/10.1021/nn303867y>.
- Clean and effective construction of SLIPS from porous polymer surface prepared by supercritical CO2 foaming technology / C. Lv et al. Journal of cleaner production. 2024. P. 141398. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141398>.
- Biomimetic liquid infused surface based on nano-porous array: corrosion resistance for tin metal and self-healing property / Y. Wei et al. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects. 2022. P. 130482. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130482>.
- Silicon-Based superslippery/superhydrophilic striped surface for highly efficient fog harvesting / X. Ji et al. Materials. 2023. Vol. 16, no. 15. P. 5423. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16155423>.
- Photoswitchable liquid-to-solid transition of azobenzene-decorated polysiloxanes / J. J. B. van der Tol et al. Advanced functional materials. 2023. URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.202301246>.
- Wei C., Gendelman O., Jiang Y. A superhydrophobicity–slipperiness switchable surface with magneto- and thermo-responsive wires for repelling complex droplets. Langmuir. 2024. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03556>.
- Durability of slippery liquid-infused surfaces: challenges and advances / D. Tripathi et al. Coatings. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 1095. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings13061095>.
- Accelerated thermo-catalytic degradation of perfluoropolyether (PFPE) lubricants for space applications / M. Gleirscher et al. Lubricants. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 81. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11020081>.
- Slippery surface for enhancing surface robustness and chemical stability / S. Lv et al. Journal of materials science. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08245-5>.
- Infusing paraffin-based lubricant into micro-/nanostructures for constructing slippery marine antifouling coatings / Z. Yang et al. Progress in organic coatings. 2023. Vol. 185. P. 107919. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107919>.
- Designing impact resistance and robustness into slippery lubricant infused porous surfaces / V. Singh et al. Advanced materials. 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.202409818>.
- Responsive slippery membrane with high efficiency in oil-water separation and mechano-bactericidal performances / J. Xu et al. Journal of membrane science. 2024. P. 123597. URL: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123597>.

24. Ramanamane N., Pita M. Improved oil/water separation by employing packed-bed filtration of modified quartz particles. *Water*. 2025. Vol. 17, no. 9. P. 1339. URL: <https://doi.org/10.3390/w17091339>.
25. Prakash C. G. J., Prasanth R. Recent trends in fabrication of nepenthes inspired SLIPs: design strategies for self-healing efficient anti-icing surfaces. *Surfaces and interfaces*. 2020. Vol. 21. P. 100678. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100678>.
26. Novel SLIPS based on the photo-thermal MOFs with enhanced anti-icing/de-icing properties / X. Fang et al. *RSC advances*. 2022. Vol. 12, no. 22. P. 13792–13796. URL: <https://doi.org/10.1039/d2ra02046g>.
27. Yaghoubi M., Parvini Ahmadi N., Yazdani S. Fabrication of slippery lubricant-infused porous surfaces of galvanized steel with durable anti-icing and anti-corrosion behavior. *Materials today communications*. 2025. Vol. 42. P. 111251. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111251>.
28. Fabrication of slippery liquid-infused porous surfaces on magnesium alloys with durable anti-corrosion and anti-tribocorrosion properties / Q. Cai et al. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*. 2023. P. 131549. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131549>.

Makovkyi D.P., Myronyuk O.V. Liquid-repellent infused surfaces: a review of current trends and prospects

The article presents a comprehensive overview of the current state of research in the field of liquid-infused surfaces (LIS), which represent a promising direction in the development of functional coatings with tunable wetting properties. Based on the analysis of recent literature, the key physicochemical principles underlying the formation of infused surfaces are considered, including the presence of a stable lubricant layer retained in a capillary-active porous or textured matrix, the surface energy of the solid substrate, and interfacial interaction mechanisms. The properties of liquid-infused surfaces (LIS) are compared with those of traditional superhydrophobic coatings, particularly in terms of durability, stability under aggressive conditions, as well as self-cleaning, anti-corrosion, and anti-icing performance.

The article systematizes modern approaches to the fabrication of LIS based on both hydrophobic and

hydrophilic textures with subsequent infusion of chemically compatible lubricants. Special attention is paid to the use of advanced materials such as polymers, nanostructured metal oxides, and biocompatible lubricating fluids that ensure both functionality and environmental safety of the coatings. The development of adaptive surfaces capable of dynamically altering their properties in response to external stimuli—such as light, temperature, or magnetic field—is also considered. The study highlights key challenges in ensuring mechanical, chemical, and thermal stability of LIS under real-world conditions, including freeze-thaw cycles, dynamic loads, and contact with aggressive liquids.

The study analyzes the current application areas of liquid-infused surfaces in modern technical and industrial systems, including anti-icing technologies, corrosion protection, biomedical devices, membrane-based liquid separation, microfluidic components, and low-adhesion coatings. It is shown that LIS possesses significant interdisciplinary potential for implementation in energy, environmental protection, transportation, medicine, and other sectors, provided that existing technical, technological, and environmental barriers are overcome. The prospects for further development of this innovative technology are summarized in the context of materials science, applied engineering, and sustainable manufacturing.

Keywords: liquid-infused surfaces; wetting; anti-icing; corrosion protection;

Маковський Денис Петрович - аспірант хіміко-технологічного факультету, Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", makovskiy.denis@lil.kpi.ua.

Миронюк Олексій Володимирович - д.т.н., доцент, завідувач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів хіміко-технологічного факультету, Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", o.myronyuk@kpi.ua.

Стаття подана 20.05.2025.