

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Фізико-математичний факультет
Кафедра фізики та методики її навчання

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ
УЧНІВ ЛІЦЕЇВ ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ ТЕМИ «АДГЕЗІЯ ЛЬОДУ ДО
ПОВЕРХОНЬ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ»

Кваліфікаційна робота
студента групи ФМм-24
ступінь вищої освіти магістр
спеціальності 014.08 Середня освіта
(Фізика та астрономія)
Бабенка Володимира Едуардовича

Керівник:
Доктор фізико-математичних наук,
професор
Балабай Р.М.

ЗАПЕВНЕННЯ

Я, Бабенко Володимир Едуардович, розумію і підтримую політику Криворізького державного педагогічного університету з академічної доброчесності. Запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Криворізького державного педагогічного університету ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

(підпис)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ.....	7
1.1. Поняття, сутність та структура дослідницької компетентності.....	7
1.2. Роль дослідницької компетентності в сучасній освіті.....	13
1.3. Особливості формування дослідницької компетентності в учнів академічних і професійних ліцеїв.....	16
1.4. Сучасні підходи та методики формування дослідницької компетентності учнів у процесі вивчення фізики.....	21
Висновки до розділу 1.....	26
РОЗДІЛ 2. НАУКОВ-ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА АДГЕЗІЇ ЛЬОДУ.....	29
2.1. Природа та особливості явища адгезії.....	29
2.2. Практичне застосування знань про адгезію льоду у різних сферах.....	31
2.3. Дослідження адгезії льоду до поверхонь різних матеріалів.....	35
2.4. Використання цифрових технологій та віртуальних лабораторій у процесі вивчення адгезії для формування дослідницької компетентності учнів.....	42
2.5. Методи та прийоми вивчення явища адгезії льоду у шкільному курсі фізики та інтегрованому навчанні.....	46
Висновки до розділу 2.....	49
РОЗДІЛ 3. ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ НА ПРИКЛАДІ ВИВЧЕННЯ ТЕМИ «АДГЕЗІЯ ЛЬОДУ ДО ПОВЕРХОНЬ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ».....	50
3.1. Методичні рекомендації щодо вивчення теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» з урахуванням дослідницької компетентності.....	50
3.2. Розробка уроку-дослідження для учнів академічного ліцею на тему «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів».....	54
3.3 Розробка проектно-дослідницького заняття для учнів профільного ліцею на тему «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів».....	61
Висновки до розділу 3.....	70
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	73

ВСТУП

Сучасний етап розвитку освіти в Україні характеризується інтенсивними перетвореннями, спрямованими на модернізацію змісту, форм і методів навчання відповідно до вимог інформаційного суспільства та глобальних освітніх тенденцій. Центральне місце у цих змінах посідає реалізація компетентнісного підходу, закріпленого в Законі України «Про освіту» та Концепції «Нова українська школа», що передбачає переорієнтацію навчального процесу з передавання готових знань на формування здатності учнів діяти, критично мислити, самостійно розв'язувати проблеми та застосовувати здобуті знання в реальних життєвих ситуаціях.

У системі ключових компетентностей особливе місце займає дослідницька компетентність, яка передбачає вміння ставити запитання, висувати гіпотези, планувати та організовувати експеримент, проводити вимірювання, аналізувати результати, формулювати висновки й використовувати їх для розв'язання пізнавальних і практичних завдань. Фізика як навчальна дисципліна має значний потенціал для формування дослідницької компетентності, оскільки ґрунтується на експерименті та передбачає активне залучення учнів до природничих досліджень. Однією з тем, що відкриває широкі можливості для організації дослідницької діяльності, є «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів». Її вивчення дає змогу актуалізувати знання з молекулярної фізики, термодинаміки, матеріалознавства, а також продемонструвати практичну значущість наукових закономірностей у побуті, техніці й безпеці життєдіяльності.

Аналіз чинних освітніх програм показує, що питання адгезії в межах шкільного курсу фізики висвітлюються переважно на теоретичному рівні, у той час як можливості експериментального дослідження, моделювання та застосування цифрових технологій залишаються недостатньо реалізованими. Це зумовлює потребу у створенні методичного забезпечення, яке б дозволило ефективно реалізувати компетентнісний підхід у вивченні означеної теми.

Особливої актуальності набуває створення методики, адаптованої для двох різних типів ліцеїв. В академічних ліцеях головним є формування системного наукового мислення, уміння аналізувати й інтерпретувати дані, готуватися до подальшої освіти у сфері природничих і технічних наук. У професійних ліцеях акцент зміщується на практичне застосування результатів дослідження, розвиток інженерно-прикладних умінь, виконання робіт, наближених до реальних виробничих ситуацій. Це зумовлює необхідність диференційованого підходу та створення методичних матеріалів, що відповідають потребам кожної категорії учнів.

Мета дослідження: розробити та теоретично обґрунтувати методику формування дослідницької компетентності учнів ліцеїв у процесі вивчення теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» та визначити її педагогічну ефективність.

Об'єкт дослідження: процес формування дослідницької компетентності учнів ліцеїв у процесі вивчення фізики.

Предмет дослідження: методи і засоби формування дослідницької компетентності під час вивчення теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» у різних типах ліцеїв.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати психолого-педагогічну та науково-методичну літературу щодо поняття, сутності та структури дослідницької компетентності учнів.
2. Визначити особливості та відмінності у формуванні дослідницької компетентності учнів академічних та професійних ліцеїв.
3. Проаналізувати науково-теоретичні та прикладні аспекти явища адгезії льоду для реалізації дослідницького підходу в шкільному курсі фізики.

4. Обґрунтувати методи та прийоми використання STEM-підходів, ІКТ-технологій та повного дослідницького циклу для забезпечення ефективного формування дослідницької компетентності.
5. Розробити методичні рекомендації та диференційовані навчальні матеріали (урок-дослідження, проєктно-дослідницьке заняття) для вивчення теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів».

Практичне значення дослідження полягає в тому, що розроблені методичні рекомендації та навчальні матеріали можуть бути впроваджені в освітній процес ліцеїв різних типів. Їх використання дає можливість учителям фізики та інтегрованих природничих дисциплін ефективно організовувати дослідницьку діяльність учнів під час вивчення теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» та сприяти цілеспрямованому формуванню їхньої дослідницької компетентності.

Структура роботи: магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 81 сторінка, основного тексту 66 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ

1.1. Поняття, сутність та структура дослідницької компетентності

Сучасна освітня парадигма характеризується докорінним переходом від традиційної знаннєвої моделі до компетентнісного підходу. Результатом навчання сьогодні є не просто накопичення фактів, а здатність особистості діяти, критично мислити, приймати рішення та самостійно розв'язувати проблеми на основі здобутих знань.

Цей підхід закріплений у Законі України «Про освіту», де зазначено, що освіта має ґрунтуватися на принципах науковості, гуманізму, інноваційності та забезпечувати формування ключових компетентностей, необхідних для життя в суспільстві та навчання впродовж життя. Результатом повної загальної середньої освіти є «набуття особою компетентностей, необхідних для життя, соціалізації та продовження освіти» – серед них зокрема вміння критично мислити, здатність до пошуку, аналізу та застосування інформації, уміння працювати в команді, ініціативність та креативність – складові дослідницької компетентності [49].

Державний стандарт базової середньої освіти підтверджує наскрізний характер дослідницької компетентності. Документ не лише включає її елементи до 11 ключових компетентностей (зокрема, природничої, математичної, технологічної), але й прямо наголошує на необхідності розвитку «здатності планувати й організовувати дослідницьку діяльність, формулювати гіпотези, збирати, аналізувати й інтерпретувати дані» [47].

Концепція «Нова українська школа» (НУШ) проголошує компетентнісний підхід центральним принципом реформування освіти. Згідно з нею, навчальний процес має забезпечувати «активну діяльність учня, спрямовану на пошук, експериментування, дослідження», а вчитель стає фасилітатором навчання [78].

Сучасна освітня політика України узгоджена з європейськими орієнтирами. В праці *Key Competences for Lifelong Learning, 2019*, критичне мислення та дослідження визнані ключовими вміннями. Дослідницька компетентність є не додатковим елементом, а універсальним, наскрізним способом пізнання світу та необхідною передумовою для успішної соціалізації та навчання впродовж життя [4].

Теоретичні засади компетентнісного підходу в освіті були розроблені й представлені як зарубіжними науковцями – Р. Бадером, Д. Мертенсом, Б. Оскарсоном, А. Шелтенем, – так і українськими дослідниками. Вітчизняні вчені, зокрема І. Бех, Н. Бібік, Л. Ващенко, І. Єрмаков, О. Локшина, О. Овчарук, Л. Паращенко, О. Пометун, О. Савченко, С. Трубачова та інші, зробили вагомий внесок у розвиток і впровадження компетентнісного підходу в сучасну українську освіту. Зарубіжні дослідники, серед яких Р. Бадер, Д. Мертенс, Б. Оскарсон, наголошували на важливості формування здатності особистості ефективно діяти в конкретних життєвих і професійних ситуаціях.

Теоретико-методологічні основи компетентнісного підходу в українській освіті опрацьовували також С. Бондар, І. Гушлевська, Б. Грудінін, О. Дубасенюк, О. Овчарук, О. Пометун, О. Савченко, С. Трубачова та ін. У дослідженнях цих учених наголошується, що компетентнісний підхід виступає ключовим напрямом розвитку сучасної освіти України, оскільки орієнтується не на засвоєння визначених програмою знань, умінь і навичок, а на формування в особистості здатності діяти практично та застосовувати набуті знання й досвід у різних видах діяльності. Як зазначає В. Сидоренко «...компетентнісний підхід – це місток, що поєднує школу з реальним світом і тими потребами, які ставить перед людиною життя, здатен забезпечити життєвий успіх у суспільстві знань» [88 с. 5].

На думку Н. Бібік саме компетентнісний підхід дає змогу подолати невідповідність між обсягом навчального матеріалу і його актуальністю для сучасного здобувача освіти. [30]

I. Бех звертає увагу на багатогранність трактування поняття «компетентність», підкреслюючи, що у широкому розумінні воно означає обізнаність у певній галузі, а у вузькому – здатність фахівця високого рівня робити компетентні судження [29]. Науковець зазначає, що компетентність не зводиться лише до наявності знань та вмінь, адже її формування неможливе без особистого досвіду діяльності, активності та свідомого ставлення до навчання і праці.

На сучасному етапі розвитку освіти традиційна парадигма поступається місцем компетентнісному підходу, у межах якого особливого значення набуває дослідницька компетентність як одна з провідних складових професійної підготовки фахівців.

У сучасній педагогічній науці поняття «дослідницька компетентність» розглядається з різних наукових підходів і не має єдиного трактування. Аналіз наукових джерел свідчить, що більшість дослідників визначають її як інтегровану якість особистості, що поєднує знання, уміння, навички, досвід, мотиваційно-ціннісні орієнтації та здатність до самостійної пошукової діяльності.

Так, Л. Карпова характеризує дослідницьку компетентність як синтез особистісних і професійних якостей, який відображає готовність до наукового пошуку, володіння методологією дослідження та сформованість внутрішніх мотивів і цінностей [52]. Подібної позиції дотримуються М. Головань і В. Яценко, які підкреслюють, що дослідницька компетентність – це цілісне утворення, яке поєднує знання, уміння, навички, досвід дослідника, а також проявляється у здатності творчо підходити до розв’язання наукових завдань, аналізу, оцінки результатів і прийняття рішень [37]. О. Норкіна розглядає її як інтегративну характеристику педагога, що включає систему знань, умінь і ціннісних орієнтацій, які забезпечують готовність до організації власної дослідницької діяльності задля вдосконалення освітнього процесу [79].

Вагомий внесок у розкриття сутності цього поняття зробив П. Нечипуренко, який визначає дослідницьку компетентність як складне особистісне утворення, що охоплює знання та вміння, необхідні для здійснення та організації дослідницької діяльності, позитивне ставлення до неї та усвідомлення її значущості як у самотійній, так і в колективній роботі. Учений виокремлює низку її характеристик: по-перше, вона є інтегральним утворенням, яке проявляється на предметному, міжпредметному та методологічному рівнях; по-друге, розглядається як здатність особистості до здійснення навчально-дослідницької й науково-дослідницької діяльності; по-третє, тісно пов'язана з формуванням загальнонавчальних (академічних) компетентностей і є важливою умовою професійного самовдосконалення; і, нарешті, найвищого рівня розвитку вона досягає у процесі самотійної творчої діяльності [76].

Дослідницька компетентність учня проявляється у його здатності до когнітивної діяльності, що передбачає володіння на належному рівні різноманітними методами та прийомами наукового пізнання. Серед них виділяють уміння аналізувати, синтезувати, абстрагувати, ідеалізувати, проводити аналогії, моделювати, спостерігати, експериментувати, здійснювати індуктивні та дедуктивні висновки, а також формулювати гіпотези [48].

Дослідницька компетентність являє собою комплекс знань, умінь, ціннісних орієнтацій та практичних навичок, необхідних для ефективного виконання науково-дослідницької діяльності. У структурі дослідницької компетентності виокремлюють кілька взаємопов'язаних компонентів:

Структура дослідницької компетентності, запропонована М. С. Головань та В. В. Яценко, охоплює низку взаємопов'язаних компонентів, кожен із яких має свій зміст і прояви. Мотиваційно-ціннісний компонент відображає систему професійно значущих мотивів, цінностей і ставлень до навчання та наукової діяльності, що виявляється в усвідомленні цінності дослідження, умінні формулювати його цілі відповідно до гіпотези й завдань, а також у позитивному ставленні до пізнання. Когнітивний компонент включає

професійні, міждисциплінарні та методологічні знання, необхідні для проведення досліджень, і проявляється у володінні методами дослідження, здатності аналізувати й узагальнювати інформацію та теоретичній підготовці. Діяльнісно-практичний компонент охоплює методи й прийоми здійснення дослідницької діяльності, самостійність та творчу активність, що виявляється у плануванні й організації дослідження, використанні методів збору та аналізу даних, ініціативності й самостійності. Рефлексивний компонент передбачає здатність аналізувати власну діяльність і результати дослідження, визначати недоліки й шляхи самовдосконалення, здійснювати самооцінку та прагнути професійного зростання. Інформаційно-комунікаційний та комунікативний компоненти забезпечують уміння працювати з інформацією, здійснювати збір і обробку даних, налагоджувати професійні контакти й співпрацю з колегами та респондентами. Особистісно-творчий компонент характеризує рівень розвитку творчого потенціалу, здатність до генерування нових ідей, інноваційного мислення та створення нових знань [9].

За даними О. Мерзликіна, до структури дослідницької компетентності належать когнітивний, праксеологічний, аксіологічний та соціально-поведінковий компоненти [70]. М. Гриньова виділяє мотиваційно-ціннісний, когнітивний, особистісний та діяльнісно-операційний компоненти, що підкреслюють взаємозв'язок знань, умінь та особистісних мотивів у формуванні дослідницької компетентності. [38] О. Любчак пропонує більш диференційовану модель, що включає теоретичний, діагностичний, проєктивно-конструктивний, операційно-процесуальний, інтерпретаційно-рефлексійний та комунікативний компоненти, акцентуючи увагу на практичній реалізації дослідницьких завдань [64]. Л. Василенко виділяє мотиваційно-ціннісний, інформаційно-змістовий, діяльнісно-поведінковий та оцінювально-рефлексивний компоненти, підкреслюючи роль самооцінки та рефлексії в дослідницькій діяльності [32]. У свою чергу, Л. Бурчак пропонує спрощену модель із трьох складових: мотиваційно-ціннісний, когнітивний (знаннєвий) та діяльнісний (операційний), що відображає взаємозв'язок знань, умінь та

мотивації [31]. Сучасні дослідники, такі як Н. Баюрко та Л. Голунова, доповнюють структуру компонентами етико-екологічним та контрольньо-оціночним, акцентуючи увагу на морально-етичному та контрольному аспектах дослідницької діяльності [27].

Таким чином, аналіз сучасних наукових джерел дозволяє констатувати, що дослідницька компетентність формується на перетині когнітивних, діяльнісних, ціннісних і соціально-поведінкових компонентів, що взаємодіють між собою та забезпечують ефективність освітньо-дослідницької діяльності вчителя.

Дослідницька компетентність відображає рівень розвитку мислительних процесів та активність у пізнавальній діяльності. Вона передбачає здатність виявляти проблеми, формулювати припущення щодо способів їх вирішення, ставити завдання та визначати їх умови. Крім того, вона включає вміння будувати гіпотези про можливі причини й наслідки явищ матеріального та ідеального світу та аргументовано їх обґрунтовувати, а також утримувати одночасно кілька смислових аспектів складних явищ, подій, текстів чи висловлювань. Дослідницька компетентність проявляється через діяльнісну здатність особистості, до складу якої входять вміння ставити мету та визначати цілі діяльності, визначати предмет і засоби для її реалізації та здійснювати заплановані дії, а також аналізувати досягнуті результати й порівнювати їх із поставленими цілями, здійснюючи рефлексію [34].

Отже, дослідницька компетентність є комплексною особистісною якістю, що формується у процесі цілеспрямованої дослідницької діяльності та спрямована на самостійне пізнання нового й ефективне вирішення проблем. У шкільному віці її формування особливо важливе, оскільки від рівня розвитку цієї компетентності залежить здатність учня не лише здобувати знання, а й продовжувати навчання самостійно в майбутньому. Узагальнюючи позиції науковців, можна відзначити, що дослідницька компетентність має багатокomпонентну інтегративну структуру, яка включає знання, вміння,

навички, досвід, мотивацію та ціннісні орієнтації, необхідні для організації пошукової діяльності. Вона сприяє розвитку творчого мислення, самостійного пізнання та професійного становлення особистості. Структура дослідницької компетентності охоплює мотиваційно-ціннісний, когнітивний, діяльнісно-поведінковий, комунікативно-інформаційний, рефлексивний та особистісно-творчий компоненти, розуміння яких дозволяє цілеспрямовано формувати відповідні навички в освітньому процесі, готуючи майбутніх фахівців-педагогів до ефективної дослідницької діяльності.

1.2. Роль дослідницької компетентності в сучасній освіті

Сучасна українська освіта перебуває в процесі глибокого реформування, орієнтованого на перехід від знаннєвої до компетентнісної моделі навчання. Ця парадигма передбачає, що результатом освіти є не лише засвоєння певного обсягу знань, а формування здатності особистості діяти, мислити, приймати рішення, застосовувати знання в практичних ситуаціях і вчитися протягом життя.

Основою впровадження компетентнісного підходу є Концепція «Нова українська школа» (НУШ), у якій дослідницьку компетентність визначено як важливу складову, що має формуватися на всіх рівнях освіти. Як зазначають Д. Рябець та Т. Молнар, сутність поняття «дослідницька компетентність» у науковій літературі тісно пов'язана зі здатністю особистості до самостійного пізнання та трансформації навколишньої дійсності [85]. Конкретизація цих вимог відображена у Державних стандартах базової та повної загальної середньої освіти (2020-2023 рр.), де детально описані очікувані вміння та компетентності учнів, включно з дослідницькими. Ці стандарти вимагають від освітнього процесу не просто передачі готових знань, а організації активної пізнавальної діяльності, що включає формулювання проблемних питань, висунення гіпотез, збір та аналіз даних, а також презентацію результатів. Отже, дослідницька компетентність виступає як інтегративна характеристика

освітнього процесу, що забезпечує реалізацію головної мети сучасної освіти – підготовку компетентного, самостійного та критично мислячого громадянина.

Дослідницька компетентність є основою розвитку пізнавальної активності, творчості та самостійності учня, виступаючи ключовим елементом сучасної освітньої парадигми, орієнтованої на компетентнісний підхід. Науковці, зокрема І. Щербань, В. Бербец та Б. Грудинін, наголошують, що дослідницька компетентність формує готовність до пошуку нових знань, а також забезпечує практичні вміння, необхідні для успішного навчання та життя: ставити запитання, висувати гіпотези, планувати та проводити експерименти, критично аналізувати результати та логічно презентувати висновки.

І. Щербань визначає дослідницьку компетентність як інтегральну характеристику особистості, що виявляється у здатності застосовувати наукові методи пізнання для розв'язання як навчальних, так і реальних життєвих проблем [94]. Це означає, що дослідницька компетентність є не просто сумою навичок, а внутрішньою установкою особистості на активну, перетворювальну діяльність. В. Бербец зазначає, що дослідницька діяльність допомагає учням здійснити фундаментальний перехід: від пасивного споживання знань до їх свідомого конструювання [28]. Цей процес активно формує рефлексію (здатність аналізувати власну діяльність), аналітичне мислення та комунікативні навички (здатність ефективно взаємодіяти та обмінюватися результатами). Своєю чергою, Б. Грудинін у своїй педагогічній моделі розвитку дослідницької компетентності старшокласників наголошує, що участь у дослідницьких проєктах забезпечує інтеграцію знань із різних предметів (міжпредметні зв'язки), а також сприяє розвитку інформаційної грамотності та цифрових навичок, які є необхідними для орієнтації та успішної роботи у сучасному освітньому просторі та інформаційному суспільстві [41].

Формування дослідницької компетентності має важливе значення не лише для учнів, а й для педагогів та освітньої системи загалом. Сучасний

учитель, відповідно до концепції Нової української школи (НУШ), повинен трансформувати свою роль, стаючи не лише носієм знань, а й дослідником власної педагогічної практики. Педагог із розвиненою дослідницькою компетентністю здатний ефективно організовувати дослідно-орієнтоване навчання, креативно проектувати інноваційний освітній процес, глибоко аналізувати ефективність власних методик та оперативно впроваджувати нові педагогічні технології (наприклад, елементи цифровізації). Дослідницька компетентність учителя, таким чином, є основою для створення уроків-досліджень, де учень виступає активним суб'єктом пізнання, а також є потужним засобом професійного зростання самого педагога. Такий учитель стає агентом змін, здатним забезпечити сталий розвиток школи та якісну реалізацію державних освітніх стандартів.

Розвиток дослідницької компетентності учнів і педагогів призводить до очікуваних позитивних освітніх результатів. На індивідуальному рівні це сприяє зростанню пізнавальної активності, глибокому розвитку критичного та системного мислення, а також формуванню практичних умінь планувати, організовувати та презентувати результати діяльності (як-от, публічні виступи та створення звітів). Дослідницька компетентність сприяє інтеграції знань з різних предметних галузей у цілісну картину світу та розвиває ключові м'які навички (soft skills): командну роботу, комунікацію, саморефлексію та саморозвиток. Ці результати узгоджуються з європейською концепцією Lifelong Learning («Навчання впродовж життя»), у якій дослідницька діяльність визначається основою ініціативності, креативності та інноваційності – якостей, необхідних для економічного та соціального успіху [4]. На рівні освітньої системи формування дослідницької компетентності підвищує якість навчальних результатів, сприяє розвитку інноваційної культури в закладах освіти та зміцнює науковий потенціал суспільства в цілому.

Однак, попри нормативну підтримку та очевидну важливість, упровадження дослідницької компетентності стикається з низкою суттєвих

викликів та обмежень. Серед них – кадрова неготовність педагогів, які часто орієнтовані переважно на репродуктивні методи навчання через їхню власну підготовку у знаннєвій парадигмі. Додатковими перешкодами є інерційність освітньої системи, значне перевантаження навчальних програм, обмежена матеріально-технічна база (відсутність належних лабораторій та обладнання для експериментів), а також недосконалість системи оцінювання, оскільки процес дослідження, на відміну від засвоєння фактів, складніше виміряти об'єктивними стандартизованими тестами. Для подолання цих труднощів необхідна комплексна стратегія, що включає модернізацію програм підготовки та підвищення кваліфікації вчителів, створення дослідницьких лабораторій та освітніх хабів, розвиток цифрової інфраструктури та, що є найважливішим, формування позитивного ставлення до експериментування та пошукової діяльності в освітньому середовищі.

Отже, дослідницька компетентність є ключовим елементом сучасної української освіти, який поєднує ключові цілі реформи: розвиток критичного мислення, самостійності, інноваційності та здатності до навчання впродовж життя. Її формування закріплене в Законі України «Про освіту», Державних стандартах та Концепції Нової української школи, а значення для учня та педагога є визначальним. Учень із розвиненою дослідницькою компетентністю стає активним творцем знань, готовим до професійного самовизначення та життєвих викликів, а педагог-дослідник – рушієм інновацій і підвищення якості освіти. Незважаючи на існуючі виклики, системний розвиток дослідницької компетентності залишається ключовим чинником успішності освітньої реформи та забезпечення конкурентоспроможності української освіти у глобальному контексті.

1.3. Особливості формування дослідницької компетентності в учнів академічних і професійних ліцеїв

Різниця між академічними та професійними ліцеями визначає специфіку процесу формування дослідницької компетентності. Обидва типи закладів

мають спільну мету – розвиток дослідницьких умінь як складової ключових компетентностей учнів, однак зміст, форми та методи цієї діяльності суттєво відрізняються залежно від освітнього профілю, кадрового потенціалу та матеріально-технічних можливостей закладу.

Академічні ліцеї орієнтовані насамперед на підготовку учнів до навчання у закладах вищої освіти. Їхня діяльність спрямована на розвиток аналітичного, критичного мислення, формування навичок академічного письма та роботи з науковими джерелами. Як зазначає Н. Венцель, ефективність цього процесу забезпечується створенням системи наукових гуртків, лабораторій і співпрацею з університетськими кафедрами, що сприяє практичному застосуванню теоретичних знань у дослідницькій діяльності [33].

В академічних ліцях домінує теоретико-пошуковий напрям досліджень: основними цілями навчання в академічних ліцях є опанування фундаментальних знань із профільних дисциплін, розвиток умінь аналізувати першоджерела, формулювати гіпотези та здійснювати теоретичне узагальнення результатів. Дослідницькі роботи в таких закладах здебільшого мають фундаментальний або аналітичний характер: написання наукових рефератів, оглядово-аналітичних праць, історичних чи літературознавчих розвідок. Значна частина учнів бере участь у секціях Малої академії наук України (МАН), що сприяє ранньому зануренню у наукове середовище.

О. Чугунова підкреслює, що формування дослідницької компетентності учнів у процесі підготовки науково-дослідних робіт МАН ґрунтується на засвоєнні ними алгоритму наукового пошуку, який передбачає вміння визначати проблему, аналізувати літературу, висувати гіпотезу, обирати методи дослідження та логічно обґрунтовувати висновки [93]. Водночас В. Нелипович наголошує на доцільності інтеграції елементів STEM-освіти навіть у традиційно теоретичні дисципліни (зокрема, математику), щоб усунути розрив між теорією та практикою в академічному середовищі [75].

Сильними сторонами учнів академічних ліцеїв є вміння формулювати проблему, аналізувати джерела, критично мислити, логічно обґрунтовувати висновки. Проте, як зауважує О. Чугунова, деякі труднощі виникають на етапі практичного експериментування або реалізації інженерних проєктів, що пов'язано з недостатньою матеріально-технічною базою та домінуванням теоретичного аспекту навчання [93].

Мотиваційна структура навчання в академічних ліцеях здебільшого орієнтована на академічний успіх – високі результати НМТ, вступ до престижних університетів, перемоги в олімпіадах і наукових конкурсах. Така мотивація часто має зовнішній (результативний) характер, спрямований на досягнення соціально значущого статусу або відзнаки. У цьому контексті важливим завданням педагогів є створення умов для розвитку внутрішньої мотивації до дослідження, коли учень сприймає наукову діяльність як самостійний ціннісний процес пізнання.

Отже, головним завданням педагогів академічних ліцеїв є забезпечення балансу між теоретичним та практичним аспектами дослідження, розвиток уміння учнів застосовувати набуті знання для вирішення реальних наукових або соціальних проблем. У цьому контексті ефективними є інтегровані STEM/STEAM-проєкти, участь у міждисциплінарних дослідницьких командах, а також залучення учнів до університетських наукових експериментів.

На відміну від академічних, професійні ліцеї зорієнтовані на підготовку здобувачів до практичної діяльності в певній галузі. Їхня місія полягає не лише у формуванні професійних компетентностей, але й у розвитку творчого, інноваційного мислення, що ґрунтується на вмінні досліджувати, аналізувати технологічні процеси, знаходити шляхи вдосконалення виробництва. Як зазначає В. Ланкіна, дослідницька діяльність у професійних ліцеях має переважно прикладний характер і спрямована на створення конкретного продукту чи вдосконалення технологічного процесу [63].

У професійних ліцєях формування дослідницької компетентності тісно пов'язане з проєктно-технологічним підходом, який передбачає виконання учнями реальних інженерних, кулінарних, будівельних чи ІТ-завдань. Це дає змогу поєднати навчання з досвідом практичної діяльності, забезпечити високу внутрішню мотивацію до пошуку, експериментування та перевірки гіпотез у реальному середовищі. М. Гетманська підкреслює, що важливим фактором розвитку дослідницьких навичок у таких закладах є наявність матеріально-технічної бази – лабораторій, навчально-виробничих майстерень, симуляційних платформ тощо [36].

Учні професійних ліцєїв демонструють високий рівень готовності до діяльнісно-практичного етапу дослідження, однак часто мають труднощі на рівні теоретичного узагальнення та оформлення результатів. Саме тому, на думку Г. Сердюк, педагоги професійних ліцєїв повинні цілеспрямовано формувати у здобувачів навички академічної доброчесності, логічного обґрунтування висновків і представлення результатів дослідження у письмовій формі [87].

Мотиваційна сфера учнів професійних ліцєїв має переважно практичний характер: дослідницька діяльність розглядається як спосіб професійного зростання, підвищення кваліфікації або створення інновацій у власній галузі. Мотивація зростає тоді, коли результати дослідження мають безпосередню цінність – економічну, технологічну чи соціальну.

Таким чином, процес формування дослідницької компетентності має різну природу у двох типах ліцєїв:

- в академічних – домінує аналітичний, теоретико-дослідницький підхід;
- у професійних – діяльнісно-прикладний, зорієнтований на практичний результат.

Узагальнюючи, можна виділити:

Таблиця 1

**Ключові відмінності між формуванням дослідницької компетентності
в академічних і професійних ліцеях:**

Аспект	Академічні ліцеї	Професійні ліцеї
Мета дослідження	Поглиблення теоретичних знань, розвиток аналітичного мислення	Вирішення практичних виробничих чи технологічних проблем
Зміст діяльності	Теоретичні дослідження, аналітичні проєкти, участь у МАН	Проектно-технологічна діяльність, експериментування, створення інноваційних продуктів
Методи формування	Академічне письмо, аналіз джерел, критичне мислення	STEM/STEAM-підхід, практичне моделювання, командна проєктна робота
Мотивація учнів	Академічна – підготовка до ЗВО, конкурси, олімпіади	Професійна – реалізація власних ідей, вдосконалення виробничих процесів
Проблемні зони	Недостатня практична складова, обмеженість лабораторної бази	Слабка теоретична підготовка, труднощі з академічним письмом
Ключове завдання педагога	Забезпечення балансу теорії та практики, посилення STEM-компонента.	Навчити теоретично узагальнювати й обґрунтовувати практичні результати, посилення методологічної бази .

Отже, розвиток дослідницької компетентності є спільним завданням для обох типів ліцеїв, але шляхи його реалізації мають бути диференційованими. В академічних ліцеях доцільно посилювати практичну та експериментальну складову, впроваджуючи STEM-підходи. У професійних – приділяти більшу увагу методології наукового пошуку, формуванню рефлексії та грамотному оформленню результатів дослідження.

Як підкреслює А. Каленський, оптимальним напрямом розвитку сучасної профільної школи є інтеграція двох моделей – академічної й професійної – у єдиний освітній простір, де аналітичне мислення поєднується з діяльнісно-практичними навичками [50]. Такий підхід дозволить сформувати покоління учнів, здатних не лише сприймати знання, а й створювати нове – через дослідження, творчість і науково-технологічні інновації.

1.4. Сучасні підходи та методики формування дослідницької компетентності учнів у процесі вивчення фізики

Формування дослідницької компетентності учнів у процесі вивчення фізики є одним із ключових завдань сучасної шкільної освіти, орієнтованої на розвиток особистості, здатної до самостійного пізнання, критичного мислення та творчого застосування знань. Цей процес передбачає створення такого освітнього середовища, у якому навчання набуває дослідницького характеру, а учні стають активними суб'єктами навчальної діяльності.

Згідно з позицією О. Мерзликіна, дослідницький підхід у фізичній освіті має бути не епізодичним елементом, а системоутворювальним принципом, який визначає зміст, форми та методи навчання [71]. Отже, навчання фізики має будуватися як процес відкриття знань, у ході якого учні самостійно здобувають нову інформацію через спостереження, експеримент, аналіз і моделювання.

У сучасній педагогічній науці виокремлюють кілька провідних підходів до формування дослідницької компетентності з фізики: компетентнісний,

діяльнісний, особистісно-орієнтований, інтеграційний, а також STEM- і ІКТ-орієнтований підходи.

Компетентнісний підхід полягає у переорієнтації навчання з передачі знань на розвиток ключових компетентностей, серед яких дослідницька є однією з провідних. Як зазначає Н. Грицай, застосування цього підходу передбачає формування у школярів здатності до самостійного планування, постановки проблеми, висунення гіпотези, проведення експерименту та інтерпретації результатів [39]. В основі цього підходу лежить ідея навчання через діяльність, у процесі якої учень не лише засвоює фактичні знання, але й опановує способи наукового мислення, що формують підґрунтя для подальшої освітньої і професійної діяльності.

Діяльнісний підхід акцентує увагу на тому, що знання набувають реальної цінності лише в процесі активної діяльності. За О. Мерзликіним, формування дослідницьких компетентностей старшокласників з фізики можливе лише за умови, якщо навчання базується на активній діяльності учнів, спрямованій на розв'язання практичних і експериментальних завдань [40]. Така діяльність передбачає використання методів наукового пізнання – спостереження, вимірювання, експерименту, моделювання, аналізу та узагальнення. Так, науковиця Г. Войтків наголошує, що саме дослідницька діяльність є ефективним способом підвищення розуміння навчального матеріалу, адже учні безпосередньо переконуються у зв'язку теоретичних знань із реальними явищами [35].

Особистісно-орієнтований підхід забезпечує врахування індивідуальних освітніх потреб і можливостей учнів. Як зазначає Л. Бурчак, ефективність формування дослідницької компетентності зростає тоді, коли педагог організовує індивідуальні та групові форми роботи, створює ситуації вибору, стимулює саморефлексію та самооцінку результатів діяльності [31]. Це може бути реалізовано через: індивідуальні або групові дослідження, де учні самостійно обирають тему; створення ситуацій вибору (учень може обрати

метод експерименту або форму представлення результатів); портфоліо дослідника, у якому фіксуються результати експериментів, спостереження та власні висновки. Таким чином, учень стає не об'єктом навчання, а активним учасником наукового пошуку.

Інтеграційний підхід полягає в поєднанні знань із різних галузей науки, що сприяє формуванню цілісного світогляду. Фізика тісно пов'язана з математикою, хімією, біологією, інформатикою, тому міжпредметна інтеграція сприяє застосуванню фізичних знань у реальних життєвих і технологічних ситуаціях. О. Стецюк наголошує, що інтеграція фізики в межах STEM-освіти формує у здобувачів освіти дослідницьке мислення, ініціативність, здатність до колективної роботи та творчого застосування технологій [89]. П. Атаманчук підкреслює, що STEM-інтеграційні інновації сприяють становленню сучасної природничо-наукової обізнаності та підвищенню мотивації до вивчення фізики [26].

Важливим напрямом сучасної методики є використання Інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) та хмарних технологій. Як доводить О. Мерзликін цифрові платформи (PhET, GeoGebra, Tinkercad, Arduino, Google Workspace for Education) створюють умови для проведення віртуальних експериментів, збору й аналізу даних, спільної дослідницької діяльності учнів [72]. Наприклад, за допомогою симуляцій PhET учні можуть експериментально досліджувати закони Ньютона або електричні явища без необхідності дорогого обладнання, що розширює доступність дослідницької освіти. Такі засоби сприяють індивідуалізації навчання, розвитку критичного мислення та формуванню навичок роботи з інформацією.

Сучасні методики формування дослідницької компетентності базуються на поєднанні класичних експериментальних методів із новітніми формами організації навчальної діяльності, забезпечуючи реалізацію компетентнісного та діяльнісного підходів.

Метод проєктів є однією з ефективних форм організації дослідницької діяльності. За визначенням В. М. Аніщенко та Н. В. Кулалаєва, проєктна діяльність дозволяє учням самостійно формулювати проблему, планувати хід її вирішення, здійснювати пошук і аналіз інформації, узагальнювати результати та презентувати висновки [25]. У фізиці цей метод часто поєднується з експериментом, що дозволяє створювати дослідницькі, інженерні та інформаційні проєкти.

Серед сучасних методик формування дослідницької компетентності особливе місце посідає метод навчального дослідження, який, за О. Мерзликіним, реалізується через систему навчальних експериментів, лабораторних робіт, міні-досліджень і проблемних задач [70]. Його сутність полягає у поступовому переході від демонстраційного експерименту до самостійних і творчих дослідницьких завдань. Етапи навчального дослідження включають постановку проблеми, висунення гіпотези, планування експерименту, проведення вимірювань, обробку даних і формулювання висновків.

Не менш важливою методикою є проблемне навчання, у межах якого учні залучаються до самостійного пошуку шляхів розв'язання пізнавальних суперечностей. І. Тонконцова, В. Шарко та І. Коробова вважають, що проблемне навчання у фізиці активізує мислення учнів, сприяє розвитку гіпотетико-дедуктивного підходу до пізнання, а також підвищує рівень самостійності у виконанні експериментальних завдань [55].

Ефективність формування дослідницької компетентності також забезпечується використанням навчально-дослідницьких задач, які мають пошуковий характер і передбачають висунення гіпотези, пошук шляхів перевірки та обґрунтування результатів [35]. Такі задачі інтегрують знання, розвивають аналітичне мислення та вміння аргументувати власну позицію.

Отже, сучасні підходи до формування дослідницької компетентності у процесі вивчення фізики відображають перехід від репродуктивного навчання до активного, творчого і практично зорієнтованого пізнання. Поєднання компетентнісного, діяльнісного, особистісно-орієнтованого, інтеграційного, STEM- і ІКТ-орієнтованого підходів забезпечує створення гнучкої, інноваційної системи навчання, у якій учень виступає дослідником, творцем, співавтором знань.

Реалізація зазначених підходів сприяє: розвитку наукового мислення й експериментальних умінь; формуванню навичок роботи з інформацією; підвищенню навчальної мотивації; підготовці учнів до подальшої наукової та професійної діяльності.

Таким чином, дослідницька компетентність у сучасній фізичній освіті виступає інтегральною якістю особистості, що забезпечує здатність до осмисленого пізнання світу, саморозвитку й участі в інноваційному суспільстві.

Висновки до розділу 1

Аналіз наукових джерел, нормативно-правових документів та сучасних концепцій освіти дозволяє зробити висновок, що формування дослідницької компетентності є одним із провідних завдань сучасної української школи, що відповідає вимогам компетентнісного підходу, задекларованого у Законі України «Про освіту», Державному стандарті базової середньої освіти та Концепції «Нова українська школа». У цих документах підкреслюється, що головною метою освіти є розвиток особистості, здатної критично мислити, самостійно здобувати знання, аналізувати інформацію та застосовувати її у практичній діяльності.

З'ясовано, що поняття *«дослідницька компетентність»* у сучасній педагогічній науці розглядається як інтегративна особистісна характеристика, що поєднує знання, уміння, навички, досвід, цінності та мотивацію до пізнавально-пошукової діяльності. Вона забезпечує здатність особистості самостійно організовувати дослідницький процес, формулювати гіпотези, збирати й аналізувати дані, робити узагальнення й висновки. Структура дослідницької компетентності є багатокомпонентною й охоплює мотиваційно-ціннісний, когнітивний, діяльнісно-практичний, комунікативно-інформаційний, рефлексивний та особистісно-творчий компоненти.

Доведено, що дослідницька компетентність виступає одним із ключових чинників ефективної реалізації компетентнісного підходу в освіті. Вона сприяє розвитку в учнів критичного, аналітичного й творчого мислення, уміння працювати з інформацією, формулювати гіпотези, обґрунтовувати висновки та застосовувати знання у нових контекстах. Крім того, формування дослідницької компетентності забезпечує розвиток м'яких навичок (*soft skills*) – комунікації, рефлексії, командної роботи, ініціативності та саморозвитку, що відповідає європейській концепції Lifelong Learning. Важливою умовою ефективного розвитку цієї компетентності є дослідницька готовність самого педагога, який виступає фасилітатором, наставником і співучасником пізнавальної діяльності.

Проаналізовано особливості формування дослідницької компетентності в учнів академічних і професійних ліцеїв. Установлено, що в академічних ліцеях дослідницька діяльність має переважно теоретико-пошуковий характер і спрямована на розвиток аналітичного мислення, роботи з джерелами, підготовку до наукових досліджень. Натомість у професійних ліцеях дослідницька компетентність формується через практико-орієнтовану діяльність, що має прикладний, інноваційний та виробничий характер. Відмінності у змісті, формах і методах навчання зумовлюють різні підходи до організації дослідницької роботи, проте в обох випадках спільною метою є розвиток пізнавальної активності, самостійності та творчого потенціалу учнів.

Формування дослідницької компетентності у фізиці здійснюється через поєднання декількох підходів: компетентнісного, діяльнісного, особистісно-орієнтованого, інтеграційного, STEM- та ІКТ-орієнтованого. Ключові методики включають: проєктну діяльність, що дозволяє учням самостійно формулювати проблему, планувати дослідження, збирати та аналізувати дані, презентувати результати; метод навчального дослідження, який поєднує демонстраційні, лабораторні та міні-дослідження з етапами постановки проблеми, висунення гіпотези, експерименту та аналізу результатів; використання ІКТ та цифрових платформ (PhET, Tinkercad, GeoGebra, Arduino), що сприяє віртуальному моделюванню, колективній дослідницькій діяльності та розвитку інформаційної грамотності.

Системне застосування цих методів забезпечує комплексний розвиток дослідницької компетентності, інтеграцію теорії і практики, розвиток критичного та креативного мислення, комунікативних та цифрових навичок.

Таким чином, дослідницька компетентність є системоутворювальним елементом сучасної освіти, що забезпечує перехід від репродуктивного до діяльнісного типу навчання. Її формування сприяє розвитку в учнів умінь мислити, аналізувати, діяти творчо й самостійно, що відповідає потребам суспільства знань і європейським освітнім стандартам. Для ефективного

розвитку цієї компетентності необхідна інтеграція теорії та практики, упровадження активних і дослідницько-орієнтованих методів навчання, створення сприятливого освітнього середовища та підвищення рівня дослідницької культури педагогів.

РОЗДІЛ 2. НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА АДГЕЗІЇ ЛЬОДУ

2.1. Природа та особливості явища адгезії

У науковій літературі поняття *адгезії* (від лат. *adhaesio* – прилипання, зчеплення) трактується як сукупність фізичних і хімічних явищ, що відбуваються на межі розділу двох різнорідних фаз і зумовлюють їх взаємне зчеплення. Це явище має надзвичайно важливе значення у фізиці поверхневих явищ, матеріалознавстві, хімії полімерів, нанотехнологіях, а також у природних процесах, де беруть участь рідкі, тверді та газоподібні середовища [61].

З позицій фізики твердого тіла адгезія зумовлена міжмолекулярними силами взаємодії – силами Ван-дер-Ваальса, водневими зв'язками, дипольно-електростатичними взаємодіями, а також можливими хімічними зв'язками, що утворюються на поверхні контакту двох матеріалів. Ці сили визначають енергію зчеплення, а відтак і роботу відриву однієї поверхні від іншої. Енергія адгезії є мірою міцності зв'язку між фазами та визначається не лише властивостями матеріалів, а й умовами середовища, зокрема температурою, вологістю та тиском [77].

Особливо цікавим для дослідження є явище *адгезії льоду*, тобто взаємодії твердої фази води з поверхнями різних матеріалів. У цьому випадку адгезія набуває складного характеру, оскільки до міжмолекулярних взаємодій додаються механічні ефекти – утворення мікрозачепів льодових кристалів за нерівності поверхні, а також термодинамічні чинники, пов'язані з фазовими переходами води [6;21]. На відміну від адгезії твердих тіл у звичайних умовах, взаємодія льоду з поверхнею відбувається при низьких температурах, коли суттєвого впливу набувають параметри теплопередачі, змочуваність і мікроструктура поверхні.

Дослідження М. Макконена (L. Makkonen, 2012) показали, що адгезія льоду не може бути описана лише в термінах класичної теорії змочування.

Вирішальну роль відіграє наявність *квазірідкої поверхневої плівки*, яка зберігається навіть при температурах нижче 0 °С. Цей тонкий шар води діє як сполучна ланка між льодом і матеріалом, формуючи додаткові водневі зв'язки, що збільшують силу адгезії [68]. На практиці адгезія льоду визначається також такими факторами:

матеріал підкладки – гідрофільні поверхні (метали, скло) мають значно вищу адгезію, ніж гідрофобні (тефлон, поліетилен, силікони);

шорсткість – мікронерівності збільшують контактну площу і створюють механічне заклинювання кристалів льоду;

температурний режим – при зниженні температури нижче –10 °С адгезія може зменшуватися через зниження пластичності льоду;

вологість та швидкість охолодження – впливають на структуру льоду та рівномірність зчеплення з поверхнею [11;20].

Слід відзначити, що в науковій літературі розрізняють поняття *адгезії* та *когезії*. Адгезія – це зчеплення між різними фазами, тоді як когезія – взаємодія всередині однієї речовини (наприклад, всередині кристала льоду). У процесі обмерзання конструкцій чи поверхонь ці два явища відбуваються одночасно, створюючи складну багатофазну систему «лід – контактна плівка – поверхня» [86].

З огляду на фізичну природу процесу, адгезію можна розглядати як явище, що має енергетичну, молекулярну та структурну складові. Енергетична складова характеризує роботу, необхідну для руйнування зчеплення; молекулярна – визначає механізм взаємодії на атомному рівні; структурна – враховує макро- і мікронерівності поверхонь. Ці три аспекти мають бути враховані не лише у наукових дослідженнях, а й у процесі навчання фізики, зокрема при формуванні в учнів уявлень про поверхневі явища та міжмолекулярні взаємодії [59;82].

З методичної точки зору, вивчення адгезії у шкільному курсі фізики дозволяє інтегрувати знання з молекулярної фізики, термодинаміки, механіки та хімії. Явище адгезії льоду може стати прикладом застосування міждисциплінарного підходу у викладанні, оскільки воно поєднує поняття «змочування», «поверхневий натяг», «фазові переходи», «теплота плавлення» тощо. Це відкриває можливість для формування дослідницької компетентності учнів шляхом виконання простих експериментів: вимірювання сили зчеплення льоду з різними матеріалами, вивчення впливу температури або вологості на прилипання тощо.

Варто підкреслити, що явище адгезії льоду має не лише теоретичне, а й значне практичне та освітнє значення. У контексті підготовки майбутніх учителів фізики його вивчення сприяє розвитку системного мислення, вмінню поєднувати теоретичні знання з реальними прикладами з життя, а також формуванню навичок дослідницької діяльності. Зокрема, експериментальні завдання з адгезії можуть бути включені до навчальних лабораторій або проєктної діяльності студентів, що відповідає сучасним освітнім тенденціям STEM-освіти [45].

2.2. Практичне застосування знань про адгезію льоду у різних сферах

Явище адгезії льоду має надзвичайно велике прикладне значення у різних галузях науки, техніки, промисловості та екології. Його розуміння дозволяє розробляти технології, спрямовані на запобігання обмерзанню, підвищення безпеки експлуатації технічних систем, а також створення нових матеріалів з керованими поверхневими властивостями.

Авіація та аерокосмічна техніка

Однією з найважливіших сфер застосування знань про адгезію льоду є авіація. Під час польоту в умовах низьких температур та підвищеної вологості на крилах літаків, лопатях гвинтів, датчиках та обтічниках виникає *обмерзання*.

Це призводить до збільшення маси повітряного судна, погіршення аеродинамічних характеристик і навіть втрати керованості.

За даними досліджень М. Скотта (М. Scott, 2017), навіть тонкий шар льоду товщиною 0,5 мм може знизити підйомну силу крила на 20 %, а при товщині 1 мм – до 50 % [19]. Саме тому розуміння механізмів адгезії льоду до металевих та композитних поверхонь дозволяє створювати ефективні системи антиобмерзання. Наприклад: *електротермічні* (нагрівальні елементи у крилах); *пневматичні* (механічне видалення льоду шляхом роздування обшивки); *хімічні* (використання антиобмерзних рідин, що знижують поверхневу енергію).

Сучасні дослідження спрямовані на створення *ліофобних покриттів* – спеціальних наноструктурованих шарів, що зменшують адгезію льоду до мінімуму (нижче 100 кПа). Такі покриття базуються на принципах *супергідрофобності*, коли крапля води практично не контактує з поверхнею, а при замерзанні не утворює міцного зчеплення. Наприклад, полімерні покриття на основі фторвмісних сполук (PTFE, FEP) або кремнійорганічних матеріалів успішно застосовуються у виробництві авіаційних компонентів [8;60].

Енергетика та транспорт

Проблема обмерзання є критичною також для енергетичних систем – ліній електропередач, вітрових турбін, антенних веж. Відомо, що при сильних снігопадах та ожеледі на проводах може утворюватися шар льоду масою до кількох кілограмів на метр довжини, що призводить до обривів ліній та аварій [5]. В зв'язку з вище згаданими негараздами знання про адгезію льоду дозволяє уникнути ряд таких викликів, та дає змогу:

- визначати *умови ініціації обмерзання* (температура, швидкість вітру, вологість);
- моделювати *механічні навантаження* на конструкції;

- розробляти *покриття з низькою адгезією льоду* для зменшення ризику аварій.

У вітроенергетиці проблема адгезії льоду на лопатях турбін особливо актуальна для північних регіонів. За оцінками фахівців, утворення шару льоду товщиною 1 см може знизити ефективність роботи вітротурбіни на 25-30 % [16]. Тому для таких установок розробляються спеціальні поверхні з нанорельєфом, які одночасно мають високі антикорозійні та антиадгезійні властивості.

У транспортній галузі (залізничний, автомобільний транспорт) адгезія льоду вивчається у зв'язку з експлуатацією рухомого складу, дорожніх покриттів та систем гальмування. Удосконалення антиобмерзних технологій дозволяє забезпечити безпеку руху, особливо при низьких температурах та високій вологості повітря.

Будівництво та архітектура

У будівництві знання про адгезію льоду застосовуються при проектуванні конструкцій, які працюють у холодному кліматі: мостів, антенних щогл, дахів, зовнішніх трубопроводів тощо. Адгезія льоду до будівельних матеріалів (бетону, металу, скла, полімерів) визначає міцність обмерзлих з'єднань і впливає на довговічність конструкцій [91].

Сучасні дослідження зосереджені на розробці *антиобмерзних покриттів для архітектурних поверхонь*, які дозволяють мінімізувати ризик падіння бурульок, утворення крижаних наростів і збільшити термін служби споруд. Такі покриття використовують принцип «пасивного захисту» – створення шару, що не дає льоду змочувати поверхню.

Космічні та кріогенні технології

У космічній техніці явище адгезії льоду має подвійне значення: з одного боку, обмерзання може призводити до втрати працездатності механізмів, з іншого – воно використовується у системах зберігання та транспортування зріджених газів. При температурах нижче $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ структура льоду змінюється, і адгезія стає суттєво меншою, однак залишається важливим фактором у проектуванні кріогенних ємностей [24].

Екологічні та біологічні аспекти

У природних екосистемах адгезія льоду відіграє важливу роль у процесах *обмерзання рослин, утворення снігової кірки, прилипанні снігу до гілок*. Розуміння механізмів прилипання льоду допомагає розробляти методи захисту сільськогосподарських культур від обмерзання.

Деякі організми мають природну здатність *зменшувати адгезію льоду*, утворюючи слизові або воскові покриття на поверхні листків. Цей біонічний принцип використовується у сучасних дослідженнях для створення штучних антиадгезійних поверхонь, що імітують структуру листя лотоса або крил комах [2].

Освітній та методичний контекст

З педагогічної точки зору, практичні приклади адгезії льоду – це ефективний матеріал для формування у студентів та учнів зв'язку між наукою й технікою. Використання реальних прикладів (авіація, енергетика, архітектура) підвищує мотивацію до вивчення фізики та демонструє її значення для сучасних технологій.

У шкільному курсі фізики ці приклади можуть бути інтегровані у теми «Молекулярна фізика», «Теплові явища», «Фізика твердих тіл», що сприяє розвитку *практичного мислення та компетентнісного навчання*.

Застосування мультимедійних матеріалів, віртуальних симуляцій і лабораторних досліджень дозволяє зробити процес навчання більш наочним і дослідницьким [43;57].

2.3. Дослідження адгезії льоду до поверхонь різних матеріалів

Дослідження адгезії льоду є одним із ключових напрямів сучасної фізики поверхневих явищ та матеріалознавства. Це питання має не лише теоретичне, а й велике прикладне значення, оскільки дозволяє прогнозувати поведінку матеріалів у низькотемпературних умовах, розробляти антиобмерзні технології та створювати нові поверхні з керованими властивостями.

Вивчення адгезії льоду базується на поєднанні експериментальних, теоретичних та чисельних методів. Основним завданням є визначення *сили зчеплення (адгезійної міцності)* між льодом і певним матеріалом, а також факторів, що впливають на цей процес: хімічний склад, шорсткість, змочуваність, температуру, структуру поверхні тощо [12;17].

Теоретичні основи вимірювання адгезії

Простий та фізично чіткий підхід, для розрахунку кількісної характеристики адгезії рідини (W_{sl}^{smooth}) до твердого тіла науковці виконують на основі рівняння Юнга – Дюпре. Якщо ж розглядати практичну роботу адгезії, пов'язану з відривом рідкого меніска перпендикулярно до твердої поверхні, необхідно використовувати відступаючий кут змочування [53;67], адже цей термодинамічний процес супроводжується деформацією меніска під час відступу рідини, коли за нею залишається суцільна або частково перервана рідка плівка:

$$W_{sl}^{smooth} = \sigma_{lv}(1 + \cos\Theta_{sl(r)}^{smooth}), \quad (1)$$

де σ_{lv} - це поверхневий (міжфазний) натяг рідина–пара, що визначається властивостями рідини та дією короткодійних поверхневих сил [16]. Величина

$\cos\Theta_{sl(r)}^{smooth}$ - це відступаючий кут змочування, утворений меніском рідини на гладкій твердій поверхні, до якої відбувається адгезія. На цей кут впливають характеристики усіх трьох фаз – рідкої, твердої та парової, – які визначаються поверхневими силами другого роду [16], або, інакше кажучи, ізотермою розклинюючого тиску. Кут змочування Юнга для будь-якої трифазної системи можна розрахувати на основі ізотерм розклинюючого тиску, використовуючи підхід Дерягіна–Фрумкіна. Під час аналізу змочуваності твердих тіл водними рідинами слід враховувати вплив ван-дер-ваальсових, іонно-електростатичних, стеричних, гідрофобних і гідрофільних структурних сил [16;24;91]. Щоб зменшити енергію адгезії для певної рідини, необхідно модифікувати властивості трифазної системи так, щоб збільшився кут контакту.

Цього можна досягти різними способами. Наприклад, змінюючи склад водної фази або її рН, можна впливати на знак і величину поверхневих зарядів на межах вода/повітря та вода/тверде тіло, тим самим регулюючи електростатичні сили. Нанесення нанорозмірного шару з малою поляризованістю на тверду поверхню забезпечує часткові водовідштовхувальні властивості, пов'язані з силами Ван-дер-Ваальса або гідрофобними ефектами.

Одним із найефективніших способів змінити роботу адгезії є надання поверхні певної шорсткості. Для шорсткої поверхні з коефіцієнтом шорсткості r (що дорівнює відношенню фактичної площі до проєктованої - див. рисунок 1а) рівняння Юнга–Дюпре для роботи адгезії в режимі змочування за Венцелем набуває вигляду:

$$W_{sl}^{smooth} = r \cdot \sigma_{lv} (1 + \cos\Theta_{sl(r)}^{smooth}) = r \cdot W_{sl}^{smooth} \quad (2)$$

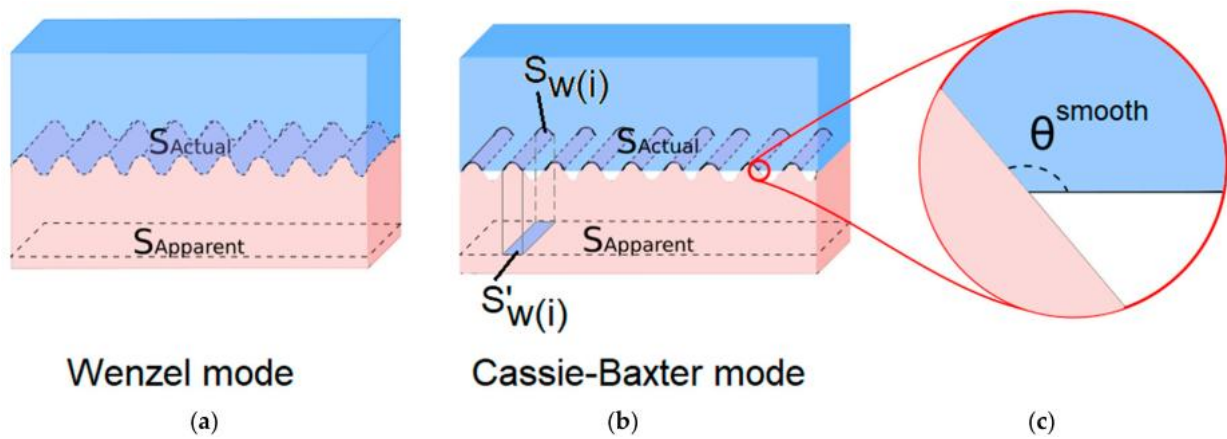


Рис. 1. Схематичне зображення змочування шорсткої поверхні: (a) у гомогенному (Венцеля) режимі рідина заповнює всі нерівності; (b) у гетерогенному (Кассі–Бакстера) режимі між рідиною і поверхнею залишаються повітряні включення ; (c) у рівновазі локальний кут контакту на стінках канавок дорівнює куту, визначеному рівнянням Юнга для плоскої поверхні з тим самим хімічним складом [Emelyanenko K.A. et al., *Coatings*, 2020].

Оскільки $r \geq 1$, шорсткість за рівнянням (2) призводить до збільшення роботи адгезії як для гідрофільних, так і для гідрофобних поверхонь порівняно з гладкими зразками того самого хімічного складу. Проте поєднання шорсткості з гідрофобізацією може спричиняти як збільшення, так і зменшення роботи адгезії – залежно від параметрів поверхні. Якщо шорстка супергідрофобна поверхня змочується в режимі Кассі–Бакстера, рівняння Юнга–Дюпре для роботи адгезії W_{sl}^{CB} , рідкої та твердої фаз (Рисунок 1b), нормалізованої на одиницю видимої площі контакту, набуває вигляду:

$$W_{sl}^{CB} = r_f \cdot f \cdot \sigma_{lv} (1 + \cos \theta_{sl(r)}^{smooth}) = r_f \cdot f \cdot W_{sl}^{smooth}, \quad (3)$$

де f – частка поверхні, що безпосередньо контактує з рідиною (частка змоченої площі, $f = \frac{\sum_i S'_{wi}}{S_{apparent}}$, див. Рисунок 1b). Також r_f – коефіцієнт шорсткості змоченої області $\frac{\sum_i S_{wi}}{\sum_i S'_{wi}}$. Відповідно $\theta_{sl(r)}^{smooth}$ – це локальний кут відступу в трифазній зоні контакту (Рисунок 1c).

Аналіз рівняння (3) свідчить, що під час відступу рідкого меніска для твердих тіл, змочених у гетерогенному (Кассі–Бакстер) режимі з малою часткою змоченої площі $f < 1\%$, вплив адгезії буде значно менший, ніж для гладкої поверхні з однаковим хімічним складом поверхневого шару. Це особливо добре простежується для підкладок із текстурою у вигляді стовпчиків із плоскими вершинами. У таких структурах рідина не заповнює простір між стовпчиками, коефіцієнт шорсткості змоченої площі дорівнює $r_f = 1$, і рівняння (3) набуває вигляду:

$$W_{sl}^{CB} = f \cdot W_{sl}^{smooth} \quad (4)$$

Тобто, для певних типів текстур і при видимому зменшенні кута контакту $\theta_{sl(r)}^{CB} > 174^\circ$ робота адгезії може становити менше ніж 1% від W_{sl}^{smooth} .

Температурна залежність роботи адгезії рідини до твердих поверхонь зумовлена змінами кута контакту та поверхневого натягу при зміні температури. Однією з ключових умов льодофобної поведінки поверхні є збереження низької роботи адгезії навіть для сильно переохолоджених водних рідин. Експериментальні результати свідчать, що зниження температури навколишнього середовища до глибоких від'ємних значень супроводжується певним зростанням роботи адгезії (рис. 2), що пояснюється зменшенням кута контакту та підвищенням поверхневого натягу рідини [2;69;82]. Червоні ромби - для води на супергідрофобному PDMS [82]; зелені квадрати - для 0,5 М водних розчинів NaCl на супергідрофобних алюмінієвих підкладках [2]; сині кола - для води на супергідрофобних алюмінієвих підкладках [2]

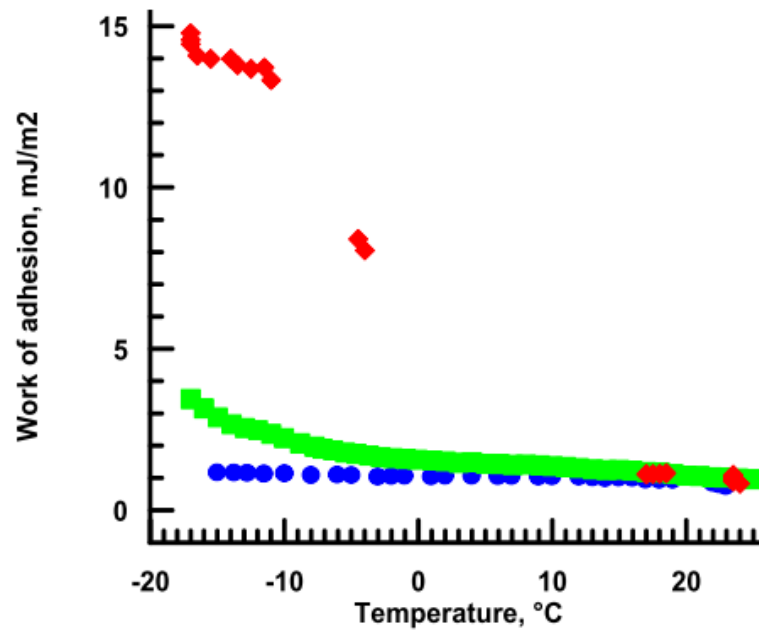


Рис. 2. Робота адгезії для рідкої водної краплі для переохолодженої рідини за від'ємних температур

Експериментальні методи дослідження

Метод відриву (Pull-off test)

Суть методу полягає у прикладанні до зразка льоду контрольованого зусилля у напрямі, перпендикулярному поверхні. Визначається максимальна сила, за якої лід відривається. Метод простий у реалізації та дозволяє порівнювати різні матеріали за силою зчеплення.

Метод зсуву (Shear test)

Використовується для визначення опору льоду зсуву по поверхні. Установка складається з охолоджуваної платформи, на якій заморожується шар води, та механізму, який прикладає силу паралельно площині контакту. Цей метод більш точно відображає реальні умови обмерзання (наприклад, на лопатях турбін) [13].

Кут змочування

Кут змочування краплі води на поверхні при температурах близьких до 0 °С дає змогу оцінити схильність матеріалу до утворення льоду. Гідрофобні поверхні (кут понад 100°) демонструють нижчу адгезію, тоді як гідрофільні (кут менше 60°) – вищу [10].

Візуально-оптичні та термографічні методи

Використовуються для вивчення процесів замерзання та росту кристалів льоду. Оптична мікроскопія, ІЧ-термографія та 3D-візуалізація дозволяють аналізувати структуру кристалів і нерівномірність контакту льоду з поверхнею [8;22].

Матеріали та порівняльні результати

Метали

Металеві поверхні (алюміній, сталь, мідь) характеризуються високою теплопровідністю і добре змочуються водою, що зумовлює **високу адгезію льоду** – від 400 до 1000 кПа. Для зменшення цього ефекту метали часто покривають полімерними або фторованими шарами [53].

Полімери

Полімери (поліетилен, поліпропілен, тефлон) демонструють низьку енергію поверхні, тому адгезія льоду тут значно менша (50-150 кПа). Такі матеріали широко використовуються для антиобмерзних покриттів у транспорті та будівництві [92].

Композити та наноструктуровані покриття

Сучасні композитні матеріали можуть мати **супергідрофобні властивості**, коли крапля води майже не контактує з поверхнею. Такі структури досягаються завдяки мікро- та нанорельєфу, що утворює повітряні

пори між поверхнею та водою. Адгезія льоду на таких покриттях становить менше 20 кПа, тобто в десятки разів нижча, ніж на металі [3].

Скло

Скляні поверхні, незважаючи на гладкість, демонструють значну адгезію через високу полярність. Для зменшення зчеплення використовують кремнійорганічні або фторосиланові покриття [23].

Вплив умов середовища

Експерименти показують, що сила адгезії льоду змінюється залежно від **температури**:

- при $-2...-5$ °C адгезія максимальна через наявність тонкої водяної плівки;
- при -15 °C і нижче — зменшується через втрату пластичності льоду [46].

Крім того, **швидкість замерзання** води впливає на структуру кристалів: при повільному охолодженні формується однорідний шар з високою адгезією, тоді як при швидкому — пористий, менш міцний.

Також важливу роль відіграє **вологість повітря**: при надмірній вологості формується товстий шар намерзлого снігу, що збільшує контактну площу та міцність прилипання [16].

Моделювання та комп'ютерні дослідження

Сучасні дослідження адгезії льоду активно використовують **комп'ютерне моделювання** (Molecular Dynamics, CFD-аналіз), що дозволяє вивчати взаємодію молекул води з поверхнею на нанорівні. Такі моделі враховують розподіл температури, силу міжмолекулярних зв'язків та енергію поверхні. Наприклад, симуляції показали, що на поверхнях із нанорельєфом вода контактує лише з 5-10 % площі, що пояснює низьку адгезію льоду [1]. Ці

результати узгоджуються з експериментальними спостереженнями і слугують основою для створення нових антиобмерзних матеріалів.

Методика досліджень у навчальному процесі

Вивчення адгезії льоду до різних матеріалів може бути ефективно інтегроване в курс лабораторних робіт з фізики. Для цього використовуються прості прилади – динамометри, термометри, охолоджувані пластини. Учні можуть самостійно: виміряти силу, необхідну для відриву кубика льоду від різних матеріалів (метал, скло, пластик); порівняти результати при різних температурах; зробити висновки про вплив шорсткості та гідрофобності поверхні.

Такі досліді сприяють розвитку *дослідницьких умінь*, уміння формулювати гіпотези, проводити експеримент і робити науково обґрунтовані висновки [81].

2.4. Використання цифрових технологій та віртуальних лабораторій у процесі вивчення адгезії для формування дослідницької компетентності учнів

Розвиток цифрових технологій та віртуальних середовищ навчання відкриває нові можливості для організації дослідницької діяльності учнів у процесі вивчення фізичних явищ, зокрема адгезії. У сучасній педагогіці спостерігається перехід від репродуктивного навчання до діяльнісно-орієнтованого, у якому ключову роль відіграє *дослідницька компетентність* – здатність самостійно планувати, проводити, аналізувати й інтерпретувати результати наукових експериментів [44;58].

Знання про адгезію льоду належить до складних для безпосереднього експериментування тем у шкільних умовах через специфіку низькотемпературних процесів. Тому використання *віртуальних лабораторій, цифрових симуляторів і комп'ютерних моделей* стає ефективним засобом моделювання процесів, які важко реалізувати фізично.

Використання таких засобів дозволяє моделювати процес утворення льоду на поверхнях різної структури. Аналізувати вплив температури, вологості, швидкості охолодження. Спостерігати мікроскопічні процеси змочування та кристалізації. Експериментально визначати залежність сили адгезії від типу матеріалу.

Усе це сприяє формуванню в учнів навичок наукового аналізу, критичного мислення та вміння оперувати фізичними моделями [68].

Віртуальні лабораторії у вивченні адгезії

Віртуальна лабораторія – це інтерактивне середовище, яке дозволяє імітувати експериментальні умови, змінювати параметри та отримувати результати у реальному часі. Її використання у вивченні адгезії льоду дає змогу учням самостійно «проводити» експерименти, не виходячи за межі класу.

Серед найпоширеніших платформ, які можна адаптувати для вивчення явища адгезії, є:

- 1). ***PhET Interactive Simulations (Університет Колорадо, США)*** – містить модулі з молекулярної фізики, змочування, міжмолекулярних сил. За допомогою них можна візуалізувати формування зв'язків між молекулами води та поверхнею.
- 2). ***Labster*** – пропонує віртуальні лабораторії з фізики твердого тіла, термодинаміки, нанотехнологій;
- 3). ***Crocodile Physics*** – дозволяє створювати власні симуляції, наприклад, моделювання кристалізації льоду на різних поверхнях;
- 4). ***Algodoo*** – застосовується для створення інтерактивних фізичних моделей, що ілюструють принципи змочування та прилипання [9,18].

У педагогічній практиці доцільно створювати *власні цифрові симуляції*, використовуючи середовища *GeoGebra*, *PhyLab* або *Python* з бібліотеками *Matplotlib* та *Pugame*. Такі інструменти дають змогу студентам педагогічних університетів не лише вивчати фізичні явища, а й розвивати інформаційно-комунікаційну компетентність, необхідну сучасному вчителю [62].

Формування дослідницької компетентності через цифровий експеримент

Дослідницька компетентність охоплює систему знань, умінь і цінностей, що забезпечують здатність учня виконувати науково обґрунтовані дії: постановку проблеми, формулювання гіпотези, планування експерименту, збір та аналіз даних, формулювання висновків [83].

Під час вивчення адгезії льоду за допомогою цифрових технологій учні можуть проходити повний цикл дослідження:

1. **Формулювання проблеми:** «Від яких чинників залежить сила адгезії льоду до різних матеріалів?»
2. **Висування гіпотези:** «Адгезія зменшується при збільшенні кута змочування поверхні».
3. **Планування експерименту:** обрати тип поверхні, температуру, вологість.
4. **Проведення моделювання у віртуальній лабораторії.**
5. **Обробка результатів:** побудова графіків залежності сили зчеплення від температури або типу матеріалу.
6. **Висновок і самооцінка результатів.**

Таким чином, цифрова лабораторія стає не просто демонстраційним інструментом, а засобом розвитку *наукового мислення* та *практичних дослідницьких навичок*.

Інтеграція з STEM-освітою

STEM-освіта (Science, Technology, Engineering, Mathematics) орієнтована на застосування знань у реальних контекстах. Вивчення адгезії льоду може бути інтегроване у різні міждисциплінарні STEM-проекти. Наприклад «*Антиобмерзні матеріали для транспорту*» об'єднує фізику, хімію та інформатику, або «*Моделювання адгезії льоду за допомогою цифрових симуляцій*» – застосування алгоритмів програмування для фізичного експерименту. «*Біонічні поверхні з низькою адгезією*» інтеграція фізики з біологією та екологією [74].

Такі проекти сприяють формуванню **інженерного мислення**, навичок аналізу, моделювання, командної роботи й критичного оцінювання результатів.

Педагогічні переваги використання цифрових технологій

Порівняно з традиційними методами навчання, використання цифрових лабораторій має низку переваг, таких як **безпе́чність**, моделювання процесів при низьких температурах без ризику травм чи пошкодження обладнання. **Візуалізація невидимих процесів**, тобто можливість спостерігати міжмолекулярні взаємодії, структуру поверхонь, фазові переходи. **Мотиваційний ефект**, учні активніше залучаються до навчання через інтерактивність і гейміфікацію. **Доступність** віртуальних експериментів можна проводити навіть дистанційно. **Персоналізація**, кожен учень може змінювати параметри та отримувати унікальні результати [16].

Підготовка майбутніх фахівців

Для здобувачів освіти цифрові технології є не лише засобом вивчення, а й предметом методичної підготовки. Під час виконання завдань вони можуть створювати інтерактивні демонстрації адгезії льоду. Розробляти цифрові моделі. Аналізувати результати через електронні таблиці, статистичні програми або Python. Інтегрувати віртуальні лабораторії у власні методичні системи

навчання. Це сприяє розвитку *цифрової, дослідницької та методичної компетентностей*, визначених у Державному стандарті базової середньої освіти (2020) та Концепції розвитку STEM-освіти в Україні [74].

Отже, використання цифрових технологій і віртуальних лабораторій у процесі вивчення явища адгезії льоду є потужним інструментом формування дослідницької компетентності учнів. Воно забезпечує інтеграцію теорії з практикою, підвищує мотивацію до навчання, сприяє розвитку навичок наукового експерименту та цифрової грамотності. Для підготовки майбутніх спеціалістів фізики це напрям, який поєднує науково-дослідну діяльність, педагогічну творчість та інноваційні підходи до навчання.

2.5. Методи та прийоми вивчення явища адгезії льоду у шкільному курсі фізики та інтегрованому навчанні

Явище адгезії льоду є прикладом міждисциплінарного та практично значимого фізичного процесу, який може бути ефективно використаний у шкільному курсі фізики для формування наукового мислення, дослідницьких навичок та інтеграції знань з інших предметів.

Традиційні методи навчання

Лекційно-демонстраційний метод. На уроках фізики вчитель може демонструвати явище адгезії за допомогою простих дослідів:

- прилипання кубиків льоду до різних матеріалів (метал, скло, пластик);
- відрив льоду за допомогою динамометра;
- змочування поверхні водою та спостереження за утворенням льоду після охолодження.

Такий підхід дозволяє пояснити учням механізми взаємодії молекул, поверхневі сили, енергію адгезії та вплив шорсткості поверхні [80].

Лабораторний метод. У шкільних лабораторіях можна проводити експерименти з відриву льоду, вимірюючи силу адгезії на різних матеріалах та при різних температурах. Це сприяє розвитку різних умінь, таких як планування експерименту, проведення вимірювань, аналіз результатів, робити висновки на основі наукових спостережень [42].

Інтегроване навчання

Інтегроване навчання дозволяє поєднувати фізику з хімією, біологією, технологією, інформатикою та математикою. **Фізика + Хімія.** Учні зможуть вивчати властивості води та льоду, водневих зв'язків та аналізувати поверхневу енергію та змочуваність. **Фізика + Біологія.** Досліджувати природні механізми антиобмерзання рослин та комах. Моделювати біонічних поверхонь із низькою адгезією [66]. **Фізика + Інформатика.** Використання учнями цифрових лабораторій, симуляторів, програмних моделей. Також побудова графіків залежності сили адгезії від матеріалу, температури, вологості. **Фізика + Математика.** Розрахунок роботи адгезії та обробка експериментальних даних, побудова графіків та статистичний аналіз.

Проектна та дослідницька діяльність учнів

Для формування дослідницької компетентності доцільно використовувати **проектні методи**:

1. *Міні-досліди* – учні експериментують із різними матеріалами, збирають дані, роблять висновки.
2. *STEM-проекти* – розробка моделей антиобмерзних покриттів, аналіз ефективності різних матеріалів у віртуальному середовищі.
3. *Інтерактивні групові дослідження* – порівняння результатів на різних поверхнях, обговорення факторів, що впливають на адгезію.

Такий підхід забезпечує **активне навчання**, через інноваційні прийоми викладання, розвиток критичного мислення та практичних навичок дослідника

[15;56]. **Використання віртуальних лабораторій** для моделювання процесів адгезії льоду, що важко реалізувати в школі. **Мультимедійні презентації та відеодемонстрації** – показ реальних умов обмерзання у транспорті, будівництві, енергетиці. **Інтерактивні тести та симуляції** забезпечить учнів можливістю змінювати параметри (матеріал, температуру) і спостерігати результати. **Метод кейсів** допоможе проаналізувати аварійні ситуації, де адгезія льоду мала критичне значення (авіація, лінії електропередач, мости). Отже, використання таких методів сприяє підвищенню мотивації, розвитку навичок самостійного дослідження та інтеграції знань.

Практичні рекомендації для уроків. Доречно починати з демонстраційного експерименту, показуючи різницю адгезії на металі та полімері. Слід проводити лабораторні роботи у групах, де учні визначають силу зчеплення льоду з різними поверхнями. Також використовувати цифрові симуляції для моделювання процесів при екстремальних температурах. Інтегрувати міжпредметні завдання: обчислити роботу відриву льоду (фізика + математика), пояснити біонічні покриття (біологія + технології). Обговорювати практичне значення явища у різних сферах (STEM-проекти, кейси).

Ці прийоми формують у учнів системне розуміння явища, розвивають дослідницькі вміння та компетентності, які відповідають вимогам сучасної освіти. Отже, методи та прийоми вивчення явища адгезії льоду у шкільному курсі фізики повинні поєднувати традиційні експериментальні підходи, інтегроване навчання, цифрові та віртуальні технології, проектну і дослідницьку діяльність.

Такий комплексний підхід сприяє формуванню дослідницької компетентності, розвитку критичного мислення, інтеграції знань із фізики, хімії, біології, інформатики та математики, а також підготовці учнів до подальшого навчання у STEM-напрямах [73;74].

Висновки до розділу 2

Явище адгезії льоду є складним фізичним процесом, що характеризується взаємодією молекул льоду та поверхні матеріалу. Адгезія залежить від хімічного складу, шорсткості та змочуваності поверхні, температури та вологості середовища.

Практичне застосування знань про адгезію льоду охоплює авіацію, енергетику, транспорт, будівництво, космічні та кріогенні технології, а також екологічні та біологічні дослідження. Розуміння цього явища дозволяє розробляти антиобмерзні системи, покриття з низькою адгезією та безпечні конструкції.

Дослідження адгезії льоду до різних матеріалів показують, що найвища адгезія спостерігається на металах та полярних поверхнях, а найнижча — на полімерних і наноструктурованих покриттях. Важливим фактором є температура, швидкість замерзання та контактна площа.

Використання цифрових технологій, віртуальних лабораторій та комп'ютерного моделювання дозволяє ефективно вивчати явище адгезії льоду, моделювати процеси, що важко реалізувати в школі, та формувати дослідницьку компетентність учнів.

У шкільному курсі фізики ефективне вивчення адгезії льоду досягається через поєднання традиційних експериментальних методів, інтегрованого навчання, STEM-проектів, цифрових лабораторій та проектної діяльності учнів.

Комплексний підхід до вивчення адгезії льоду сприяє розвитку наукового мислення, практичних навичок дослідника, критичного мислення, міжпредметної інтеграції та цифрової компетентності майбутніх учителів фізики.

РОЗДІЛ 3. ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ НА ПРИКЛАДІ ВИВЧЕННЯ ТЕМИ «АДГЕЗІЯ ЛЬОДУ ДО ПОВЕРХОНЬ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ»

3.1. Методичні рекомендації щодо вивчення теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» з урахуванням дослідницької компетентності

Вивчення природничих явищ через організацію дослідницької діяльності є ефективним засобом формування наукового мислення, пізнавальної активності та експериментальних умінь учнів. Тема «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» має значний потенціал для реалізації компетентнісного, діяльнісного та дослідницького підходів, оскільки передбачає безпосереднє експериментування, спостереження, аналіз результатів і формулювання висновків.

Згідно з положеннями Закону України «Про освіту» та Державного стандарту базової середньої освіти, освітній процес має бути спрямований на формування у здобувачів освіти здатності застосовувати знання в практичних ситуаціях, здійснювати спостереження, аналізувати результати, висувати гіпотези й доводити їх експериментально [49,54 84].

У межах природничої освіти ці вимоги реалізуються через дослідницько-орієнтоване навчання, яке поєднує елементи проблемного, проектного та експериментального методів. За визначенням О. Мартиненка та Г. Ковтун, дослідницька діяльність у шкільному курсі природничих наук є системою навчальних дій, спрямованих на самостійне здобуття нових знань у процесі наукового пошуку [65].

Тема «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» дозволяє реалізувати міжпредметну інтеграцію – фізики, хімії, біології, екології та технологій, що відповідає принципам STEAM-освіти й сприяє розвитку не лише предметних, а й ключових компетентностей, визначених у європейському

документі *Key Competences for Lifelong Learning*, зокрема «scientific literacy», «digital competence» і «learning to learn» [4].

Організація вивчення теми має ґрунтуватися на дидактичних принципах:

- Науковості – розкриття природи явища адгезії на основі фізичних і хімічних закономірностей.
- Проблемності – постановка дослідницького запитання («Від чого залежить сила зчеплення льоду з різними поверхнями?»).
- Активності й самостійності – учні виступають ініціаторами пошуку розв’язання проблеми.
- Міжпредметності – зв’язок із темами «Молекулярна взаємодія», «Стан води», «Теплопровідність матеріалів».
- ІКТ-супроводу – використання цифрових засобів для фіксації результатів, моделювання процесів, опрацювання даних.

Як підкреслює Л. Карпова, формування дослідницької компетентності у Новій українській школі має спиратися на проєктно-дослідницькі форми роботи, що дають можливість учневі виступати не лише спостерігачем, а й творцем нового знання [51].

Залежно від рівня підготовки учнів і профілю навчання, тему «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» доцільно реалізовувати у двох форматах:

Для академічних ліцеїв – у форматі уроку-дослідження, метою якого є ознайомлення з явищем адгезії, формування вмінь планувати простий експеримент, проводити спостереження, аналізувати результати та робити висновки. Такий урок передбачає використання проблемного питання, демонстраційного експерименту або лабораторної роботи з елементами самостійного пошуку.

Для професійних ліцеїв – у форматі проєктно-дослідницького заняття, де учні самостійно або в групах розробляють міні-дослідження, визначають змінні фактори (матеріал поверхні, температура, шорсткість), проводять серію експериментів, опрацьовують результати з використанням цифрових інструментів (електронні таблиці, графіки), презентують висновки та обґрунтовують їх практичне значення.

Такий підхід забезпечує диференціацію навчання та врахування освітніх потреб учнів, підвищує мотивацію до вивчення природничих наук і сприяє глибшому розумінню міждисциплінарних зв'язків.

Рекомендовано реалізовувати тему за логікою повного дослідницького циклу, який охоплює такі етапи:

1. Мотиваційно-пізнавальний етап

- створення проблемної ситуації (приклади з життя: чому лід прилипає до металу сильніше, ніж до дерева?);
- формулювання дослідницького запитання;
- висування гіпотез.

2. Дослідницько-експериментальний етап

- добір матеріалів (метал, пластик, скло, дерево, гума тощо);
- визначення критеріїв оцінювання сили адгезії (зусилля, площа контакту, температура);
- проведення експериментів, фіксація спостережень у таблицях.

3. Аналітичний етап

- обробка результатів, побудова графіків;
- формулювання висновків;
- обговорення чинників, що впливають на силу адгезії.

4. Рефлексивно-оцінювальний етап

- самооцінювання власної діяльності;
- порівняння гіпотези з результатами;

– визначення практичного значення дослідження (антиобмерзальні покриття, безпека транспорту тощо).

Як зазначає, В. Федорчук ефективність розвитку дослідницької компетентності забезпечується тоді, коли навчальний процес побудований за логікою повного дослідницького циклу – від постановки проблеми до презентації результатів [90].

Методичні акценти організації дослідження:

1. Змістовий аспект

- тема може бути включена в розділ «Агрегатні стани речовини» або «Теплові явища»;
- для учнів академічного ліцею дослідження носить ілюстративно-експериментальний характер;
- для профільного ліцею – поглиблений, із використанням вимірювальних приладів і цифрової обробки даних.

2. Організаційний аспект

- доцільно проводити роботу в малих групах (3–4 учні);
- ролі розподіляються між експериментатором, фіксатором даних, аналітиком і презентатором;
- результати представляються у формі коротких звітів, постерів або усних презентацій.

3. ІКТ-компонент

- використання онлайн-ресурсів (PhET, Tinkercad) для моделювання молекулярних процесів;
- створення Google-таблиць для обробки експериментальних даних;
- оформлення звіту у вигляді цифрової презентації або інфографіки.

4. Оцінювальний аспект

- оцінювання здійснюється за критеріями: вміння формувати проблему, планувати дослідження, аналізувати результати, аргументувати висновки, презентувати результати;

– враховується не лише кінцевий результат, а й процес мислення, командна робота, самостійність.

Отже, вивчення теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» доцільно здійснювати з урахуванням специфіки навчальних закладів:

- *в академічних ліцях* – у форматі уроку-дослідження, що передбачає поетапне засвоєння дослідницьких умінь;
- *у професійних ліцях* – у форматі проєктно-дослідницького заняття, яке спрямоване на самостійну розробку, проведення й презентацію експерименту.

Методичні рекомендації щодо вивчення теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» передбачають реалізацію компетентнісного, дослідницького та діяльнісного підходів. Основними педагогічними умовами є:

1. організація навчального дослідження за етапами наукового пізнання;
2. використання проблемно-дослідницьких і проєктних методів;
3. застосування ІКТ для підтримки експериментальної діяльності;
4. розвиток рефлексивних і комунікативних умінь учнів.

Такі умови забезпечують ефективне формування дослідницької компетентності учнів, сприяють інтеграції природничої освіти зі STEAM-підходом і підготовці учнів до активної участі в науково-технічному прогресі.

3.2. Розробка уроку-дослідження для учнів академічного ліцею на тему «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів».

План-конспект уроку-дослідження

Тема: Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів

Тип уроку: урок-дослідження

Мета уроку

Навчальна: сформувати розуміння фізичної природи адгезії льоду та чинників, що на неї впливають; показати взаємозв'язок між міжмолекулярними силами, змочуванням, теплопровідністю та силою зчеплення; навчити вимірювати силу адгезії експериментальним шляхом.

Розвивальна: розвивати вміння висувати гіпотези, планувати експеримент, аналізувати дані, робити науково обґрунтовані висновки; сприяти розвитку дослідницької компетентності, критичного мислення та здатності до командної роботи..

Виховна: виховувати дослідницьку культуру, уважність, відповідальність.

Очікувані результати:

Після уроку учні зможуть: пояснювати, що таке адгезія льоду і від чого вона залежить; проводити експеримент з визначення сили адгезії льоду до різних поверхонь; фіксувати та аналізувати отримані дані; робити висновки та співвідносити їх з попередньою гіпотезою.

Обладнання: кубики льоду, динамометри, набір поверхонь (метал, скло, пластик, дерево), секундомір, термометр, вода, ноутбук, проєктор, інтерактивний симулятор (PhET).

Хід уроку

I. Організаційно-мотиваційний етап

1. Створення проблемної ситуації

Вчитель демонструє металеву ложку з намерзлим льодом; пластикову картку, з якої лід легко відпадає.

Проблемні запитання:

– Чому лід прилипає до металу сильніше, ніж до пластику?

– Від чого залежить сила адгезії льоду?

2. *Формулювання дослідницького запитання*

«Від яких чинників залежить сила адгезії льоду до різних поверхонь?»

Вчитель фіксує питання на дошці

3. *Міні-візуалізація через симуляцію «States of Matter: Basics»*

https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter-basics/latest/states-of-matter-basics_all.html?locale=uk

Ми бачимо, що лід прилипає до металу сильніше, ніж до пластику. Щоб зрозуміти, чому саме лід має таку поведінку, давайте згадаємо, що відбувається з молекулами води в різних станах.

Вчитель вмикає PhET «States of Matter: Basics» і перемикає «Water → Solid»

Подивіться: молекули льоду щільно упаковані й коливаються навколо фіксованих положень. А тепер – рідка вода.

Вчитель перемикає «Solid → Liquid»

У рідкому стані молекули рухливі, вони ковзають одна повз одну, тому адгезія води значно менша, ніж адгезія льоду.

Тож одна з причин сильного «прилипання» льоду – це його тверда, жорстка й структурована молекулярна будова.

4. *Висування гіпотез*

Учні пропонують ідеї:

- адгезія більша там, де матеріал добре проводить тепло (метал);
- шорсткість збільшує площу контакту і адгезія більша;

- сила зчеплення залежить від змочуваності (гідрофільності);
- вода – полярна молекула, тому полярні матеріали притягують її сильніше.

Вчитель фіксує 1–2 основні гіпотези

II. Дослідницько-експериментальний етап

1. Планування експерименту

Ми перевіримо гіпотезу про залежність сили адгезії від типу матеріалу та змочування. Сформулюйте конкретну гіпотезу.

Вчитель спрямовує до перевірки: «Адгезія льоду буде найвищою на металі (добре змочується) і найнижчою на полімерах (погано змочуються)»

1. Які матеріали будемо досліджувати?
2. Як виміряємо силу адгезії?
3. Які змінні потрібно контролювати? (температура, площа, вологість)
4. Як будемо фіксувати дані? (Google-таблиця)

2. Проведення експерименту

Об'єднайтеся в 4 групи. Кожна група отримує набір матеріалів та динамометр. Ваше завдання – провести серію вимірювань для 4 різних поверхонь і внести дані до Google-таблиці.

Вчитель надає інструкцію проведення вимірювання:

- покласти кубик льоду на матеріал;
- дочекатися 30 секунд;
- прикріпити динамометр;
- плавно тягнути до моменту відриву;
- зафіксувати максимальне значення сили.

Кожна група проводить серію вимірювань: експериментатор вимірює, фіксатор даних записує результат у таблицю.

Таблиця 1

Дані експерименту

Матеріал	S контакту (см ²)	F відриву (Н)	Коментарі
Метал			
Скло			
Пластик			
Дерево			

III. Аналітичний етап

1. Обробка та аналіз даних

Ми зібрали дані від усіх груп. Обчисліть середнє значення $F_{адг}$ для кожного матеріалу та побудуйте стовпчасту діаграму (залежність сили адгезії від типу матеріалу). Який матеріал показав найбільшу адгезію, а який – найменшу?

Учні обчислюють середні значення. Спільно аналізують графік, бачать тенденцію: $F_{метал}$ $F_{скло}$, $F_{дерево}$, $F_{пластик}$.

Ми побачили, що лід найсильніше прилипає до металу та скла. А тепер – чому?

Для цього подивимося, як молекули води взаємодіють із полярними та неполярними поверхнями. <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/molecule-polarity>

Вчитель відкриває «Molecule Polarity» та обирає молекулу води.

Зверніть увагу: молекула води має позитивні і негативні частини – це означає, що вона полярна. Полярні молекули сильно притягуються до інших полярних речовин.

Вчитель додає другий об'єкт та демонструє зміни притягання.

Скло → полярний матеріал → сильні електростатичні взаємодії → велика адгезія.

Пластик → неполярний → сили взаємодії слабкі → адгезія мінімальна.

Метал → особливий випадок: висока теплопровідність + поверхневий оксид → сильна адгезія льоду.

Очікувані відповіді: вода притягується до полярних матеріалів сильніше; пластик неполярний, тому лід не прилипає; вода має диполь, тому взаємодіє з зарядженими або полярними поверхнями.

2. *Формулювання висновків*

Спираючись на дані та знання про змочування, сформулюйте висновок щодо перевіреної гіпотези. Чи підтвердилася наша початкова гіпотеза?

Висновок: сила адгезії льоду дійсно залежить від матеріалу поверхні. Найвища адгезія до матеріалів, які добре змочуються водою (метал, скло), оскільки міжмолекулярні зв'язки води з цією поверхнею міцніші.

Як цей висновок можна застосувати на практиці? Де знання про адгезію льоду є критично важливими?

Очікувані відповіді: розробка антиобмерзних покриттів для літаків, дорожнього транспорту, ліній електропередач.

IV. Рефлексивно-оцінювальний етап

Метод кейсів

На екрані кейс (аварія через обмерзання крила літака чи обрив ЛЕП).

Ваше завдання: як би інженер, озброєний сьогоdnішніми знаннями, вирішив цю проблему?

Очікувані відповіді: обговорюють шляхи вирішення (наприклад, біонічні поверхні з низькою енергією, що імітують листя лотоса; або використання матеріалів з низькою адгезією, як-от спеціальні полімери).

Рефлексія та самооцінювання

Метод «Три слова»:

- Що я дізнався нового?
- Що було складним?
- Що я зробив би інакше?

Учні оцінюють свою діяльність, висловлюють думки щодо успішності дослідження та командної роботи.

V. Домашнє завдання

1. Сформулювати нову гіпотезу, наприклад «Як впливає температура поверхні на силу адгезії льоду?» та розробити план експерименту для її перевірки.
2. Підготувати міні-презентацію про біонічні покриття (ефект лотоса) як приклад низької адгезії.

3.3 Розробка проєктно-дослідницького заняття для учнів профільного ліцею на тему «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів»

Проектно-дослідницьке заняття

Тема: Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів

Хід заняття

I. Вступно-мотиваційний блок

Вчитель демонструє коротке відео про наслідки обмерзання:

– обліпання льодом дротів ЛЕП;

- обмерзання гальмівних систем техніки;
- налипання льоду на будівельні конструкції;
- зледеніння на транспорті.

1. Ключове запитання проєкту

«Як зробити поверхню, до якої лід НЕ прилипатиме?»

Вчитель підкреслює:

Сьогодні ви – дослідники та інженери. Ваше завдання – не повторити готовий експеримент, а спроектувати власний, на основі поставленої проблеми.

2. Коротка постановка проблеми

Вчитель пояснює тільки контекст, але не дає відповідей:

- адгезія льоду залежить від будови матеріалу, структури поверхні, температури;
- реальні інженери створюють покриття, що зменшують зледеніння;
- перед вами стоїть схожа задача.

II. Планування проєкту та вибір напрямку дослідження

Учні працюють у командах по 3–4 особи. Команди обирають напрям дослідження. Учитель пропонує 6 варіантів, або учні додають свої.

Можливі напрями проєкту:

1. Вплив типу матеріалу (метал, пластик, дерево, гума, скло).
2. Вплив шорсткості поверхні (гладка / шліфована / шорстка).
3. Вплив температури поверхні (тепла / кімнатна / охолоджена).

4. Вплив форми поверхні (плоска / рельєфна / перфорована).
5. Вплив покриття (олія, силікон, тефлон, вода).
6. Порівняння промислових матеріалів (алюміній, оцинкована сталь, оргскло, ПВХ).

Різні команди обирають різні напрями, щоб результати були різноманітними.

III. Конструктор експерименту.

Учні самостійно створюють протокол дослідження.

Команди отримують шаблон з 8 основними питаннями:

1. Мета експерименту (що хочемо дізнатися).
 2. Гіпотеза (очікуваний результат).
 3. Матеріали та обладнання (короткий список).
 4. Змінні:
 - незалежна (те, що змінюємо);
 - залежна (що вимірюємо);
 - контрольовані (що має залишатися однаковим).
 5. План проведення експерименту – у вигляді алгоритму.
 6. Форма запису даних – учні самі створюють таблицю.
 7. Можливі труднощі та як їх уникнути.
 8. Критерії успішності експерименту.
- Вчитель допомагає лише питаннями:
- А що саме ви будете вимірювати?
 - Як ви забезпечите однаковий час контакту льоду з поверхнею?
 - Як будете контролювати температуру?

– Чи достатня ваша вибірка (кількість повторів)?

IV. Проведення дослідження

Це основна частина: учні працюють повністю самостійно.

Завдання команди: провести експеримент за своїм протоколом і зібрати дані.

Ролі в команді: експериментатор; фіксатор даних; аналітик; технік-контролер (за обладнанням і безпекою).

Учні:

- відміряють однакові кубики льоду;
- проводять 3–5 повторів;
- вимірюють силу відриву динамометром;
- роблять фото або коротке відео процесу (для презентації);
- заносять дані у власну таблицю.

Учитель лише спостерігає й консультує за потреби.

V. Аналітична частина

Команди переходять до самостійного опрацювання даних:

1. Обчислюють середнє значення сили адгезії:

$$F_{\text{адг}} = \sigma_{\text{адг}} \cdot A,$$

$F_{\text{адг}}$ – сила адгезії, Н;

$\sigma_{\text{адг}}$ – адгезійна напруга (адгезійний тиск), Па;

A – площа контакту поверхонь, m^2 .

- Оцінюють надійність даних (чи є великий розкид), та виводять середнє значення:

$$F_{\text{адг}} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n}$$

де F_i – результати окремих вимірювань;

n – їх кількість.

- Створюють графік: – або на аркуші, – або в Google Sheets, – або на ноутбучі.
- Порівнюють реальні результати зі своєю гіпотезою.
- Пишуть короткий висновок (3–4 речення).

VI. Підготовка проєктної міні-презентації

Формат – дуже короткий «пітч»: команда готує презентацію на 2-4 хвилини, з відповідями на питання:

- Яку проблему ви досліджували?
- Яку гіпотезу висунули?
- Як був влаштований ваш експеримент?
- Які дані отримали?
- Чи підтвердилася ваша гіпотеза?
- Яке практичне значення мають результати?
- Яке інженерне рішення ви можете запропонувати?

VII. Презентація проєктів

Кожна команда представляє експеримент. Інші команди ставлять уточнювальні питання. Учитель ставить професійно орієнтовані запитання:

- У якій галузі ваші результати можуть бути корисними?
- Як би ви удосконалили експеримент?
- Які інженерні рішення можна розробити на основі ваших даних?

VIII. Оцінювання. Рефлексія

Метод «Сходинки дослідника»:

Учні дописують 3 речення:

1. Сьогодні я дізнався...
2. Найскладнішим було...
3. У наступному дослідженні я покращив би...

VIV. Домашнє завдання (на вибір)

1. Дослідницьке

Запропонуйте новий експеримент на тему адгезії льоду та опишіть його протокол.

2. Професійно-орієнтоване

Опишіть 3 приклади технічних систем вашої спеціальності, де важлива низька або висока адгезія льоду.

Фрагмент уроку: Робота групи «Промислові матеріали»

1. Формулювання проблеми та цілей дослідження

Група обирає напрям і формулює проблему: «У промислових умовах різні матеріали використовують для конструкцій, покриттів, корпусів обладнання. Їх здатність до обмерзання впливає на безпеку та довговічність техніки. Ми

хочемо визначити, який із обраних матеріалів – оцинкована сталь, оргскло, ПВХ чи дерево (сосна) – має найменшу і найбільшу адгезію льоду».

Учні самі формулюють мету, наприклад: *«Виміряти силу адгезії льоду до чотирьох промислових матеріалів і проаналізувати, які властивості визначають їхнє прилипання»*

2. Висування гіпотези

Учні пропонують можливі гіпотези (типові та очікувані):

1. Оцинкована сталь – висока адгезія через теплопровідність і шорстку поверхню цинку.
2. Оргскло (акрил) – середня або низька адгезія, тому що поверхня гладка та неполярна.
3. ПВХ – дуже низька адгезія через неполярність і низьке змочування водою.
4. Сосна – непередбачуваний результат: пориста структура може збільшувати механічне зчеплення.

Група оформлює свою гіпотезу:

«Найвищу адгезію матиме оцинкована сталь, найнижчу – ПВХ.»

3. Проектування експерименту

Учні заповнюють свій протокол:

Незалежна змінна (тип матеріалу).

Залежна змінна (сила відриву льоду (Н)).

Контрольовані змінні:

- площа льоду (однакові кубики);
- час контакту (30 секунд);

- температура середовища;
- спосіб тягнення динамометра;
- кількість повторів (не менше 3).

План роботи (діти формулюють самі):

1. Взяти чотири зразки матеріалів.
2. Покласти на кожен кубик льоду.
3. Через 30 секунд прикріпити динамометр.
4. Плавню тягнути вертикально вгору до моменту відриву.
5. Зафіксувати максимальну силу.
6. Провести серію з 3 повторів для кожного матеріалу.
7. Внести дані у таблицю.

Таблиця 2

Створена учнями таблиця:

Матеріал	F_1 (Н)	F_2 (Н)	F_3 (Н)	$F_{\text{середнє}}$ (Н)	Коментар
Оцинкована сталь					
Оргскло (акрил)					
ПВХ					
Сосна					

4. Проведення експерименту

Група працює автономно.

Особливі спостереження, які учні можуть помітити:

- *Оцинкована сталь*: лід може «схопитися» сильніше через швидке промороження контактної поверхні.
- *Оргскло*: лід посковзується, адгезія слабка.
- *ПВХ*: майже не прилипає — іноді кубик відпадає під власною вагою.

- *Сосна*: іноді лід прилипає до ворсистих ділянок, що дає нестабільний результат.

Учні самі фіксують усі аномалії в колонці «Коментарі».

5. Аналіз результатів

Учні:

1. Обчислюють середнє значення сили для кожного матеріалу за формулою:

$$F_{\text{адг}} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n}$$

де F_i – результати окремих вимірювань; n – їх кількість.

2. Створюють стовпчасту діаграму.
3. Порівнюють результати з гіпотезою.

Приклад типової закономірності (якої учні можуть досягти):

- найвища адгезія у оцинкованої сталі;
- середня - дерево (через шорсткість);
- низька - оргскло;
- найнижчу має ПВХ.

Учні формулюють короткий висновок:

«Адгезія льоду найбільша на метали, середня на пористих матеріалах і найнижча на полімерних неполярних поверхнях. Наша гіпотеза частково/повністю підтвердилася.»

6. Підготовка презентації

Команда готує:

- 1 слайд з проблемою;
- 1 слайд з гіпотезою;
- 1 слайд із фотографіями експерименту;
- 1 графік;
- 1-2 висновки;
- 1 практичну рекомендацію.

7. Презентація групи на загальному обговоренні

Приклад професійно орієнтованих висновків, які можуть зробити учні. Для зовнішніх конструкцій, що обмерзають, ПВХ – вигідніший матеріал. Оцинкована сталь потребує антиобмерзаючих покриттів. Оргскло безпечніше для застосування в холодному середовищі (вивіски, щити, світильники). Деревина у зимових умовах може бути непередбачувана через структуру волокон.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було обґрунтовано та продемонстровано ефективність застосування дослідницько-орієнтованого підходу у процесі вивчення теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів». Аналіз наукових джерел та нормативних документів засвідчив, що вимоги сучасної освіти орієнтовані на формування в учнів умінь самостійно здобувати знання, проводити експериментальні дослідження, аналізувати результати та використовувати їх у реальних життєвих і професійних ситуаціях.

Впровадження методичних рекомендацій на прикладі дослідження адгезії льоду забезпечує реалізацію повного наукового циклу: від постановки проблеми та висування гіпотез до проведення експерименту, опрацювання даних і презентації результатів. Це сприяло розвитку ключових компонентів дослідницької компетентності, зокрема умінь планувати експеримент, працювати з обладнанням, аналізувати дані та формулювати науково обґрунтовані висновки.

Ключовим моментом стала диференціація методики: для академічних ліцеїв було реалізовано формат уроку-дослідження, який забезпечив поетапне засвоєння дослідницьких умінь, від висування гіпотези до формулювання висновків. У професійних ліцеях застосовано формат проєктно-дослідницького заняття, що дозволило учням самостійно проєктувати та реалізовувати повний дослідницький цикл з яскраво вираженою інженерно-прикладною орієнтацією. Ефективність підвищили використання проблемно-дослідницьких методів, ІКТ-технологій, а також розвиток рефлексивних і комунікативних умінь.

Отже, впровадження методики формування дослідницької компетентності на прикладі теми адгезії льоду забезпечує підвищення ефективності природничої та STEAM-освіти, поглиблює розуміння фізичних закономірностей, розвиває критичне й інженерне мислення і готує учнів до практичного застосування наукових знань у майбутній професійній діяльності.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі здійснено теоретичне обґрунтування та методичну розробку підходів до формування дослідницької компетентності учнів ліцеїв у процесі вивчення природничих явищ на прикладі теми «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів». Аналіз нормативних документів психолого-педагогічної та науково-методичної літератури засвідчив, що формування дослідницької компетентності є одним із ключових завдань сучасної освіти, оскільки вона забезпечує здатність здобувачів освіти самостійно отримувати знання, здійснювати експериментальну діяльність, розв'язувати проблемні ситуації, критично оцінювати результати та застосовувати їх на практиці. Дослідницька компетентність розглядається як інтегроване утворення, що охоплює мотиваційний, когнітивний, операційно-технологічний і рефлексивний компоненти, які формуються у процесі цілеспрямованої діяльності.

Теоретичний аналіз дозволив визначити, що провідними засадами формування дослідницької компетентності є проблемне, проєктне та експериментальне навчання, організація повного дослідницького циклу, залучення учнів до аналізу й інтерпретації даних, використання STEM/STEAM-підходів та інформаційно-комунікаційних технологій. Встановлено, що найефективнішим є поєднання традиційних експериментальних методів із сучасними цифровими інструментами, оскільки це дозволяє забезпечити активну пізнавальну діяльність, розвиток критичного мислення та формування навичок наукового аналізу.

З'ясовано, що тема «Адгезія льоду до поверхонь різних матеріалів» має значний дидактичний потенціал для реалізації дослідницько-орієнтованого навчання. Її міждисциплінарний характер, можливість проведення вимірювань, спостережень, моделювання та формування гіпотез сприяють розвитку аналітичного мислення учнів і дозволяють інтегрувати знання фізики, хімії, матеріалознавства й технічних дисциплін. Актуальність теми зумовлена й

широким спектром її практичного застосування, що підсилює мотивацію учнів до науково-дослідної діяльності.

У роботі розроблено навчальні матеріали, які включають організацію повного дослідницького циклу, використання проблемних запитань, експериментальних і модельних завдань, цифрових ресурсів, групових форм роботи, а також рефлексивних прийомів. Методика адаптована до специфіки навчання в академічному та професійному ліцеях і передбачає варіативність завдань залежно від рівня підготовленості учнів та особливостей навчального середовища.

Отже, результати дослідження підтверджують, що запропонована методична система може стати дієвим засобом формування дослідницької компетентності учнів ліцеїв у процесі вивчення фізики та інших природничих дисциплін. Представлені напрацювання створюють підґрунтя для подальших досліджень, практичної апробації, удосконалення освітніх програм, а також для розроблення інтегрованих STEM-проектів і модернізації освітнього середовища сучасного ліцею.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bhushan, B. *Nanotribology and nanomechanics of ice adhesion. Applied Physics Reviews*, 2019.
2. Chen, X., et al. Bioinspired anti-icing surfaces. *Advanced Materials*, 2016.
3. Chen, X., et al. Nanostructured surfaces for icephobicity. *Advanced Materials*, 2016.
4. European Commission. *Key Competences for Lifelong Learning*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019 [Електронний ресурс]. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2766/569540>
5. Fikke, S., et al. Atmospheric icing of structures. *Cold Regions Science and Technology*, 2018
6. He Z., Zhuo Y., Zhang Z. та ін. Design of Icephobic Surfaces by Lowering Ice Adhesion Strength: A Mini Review // *Coatings*. — 2021. — Т. 11, № 11
7. He, Z., et al. Icephobic coatings and measurement. *Progress in Materials Science*, 2021.
8. He, Z., et al. Icephobic coatings: mechanisms and materials. *Progress in Materials Science*, 2020.
9. Labster Virtual Labs [Електронний ресурс]. URL: <https://www.labster.com/>
10. Li, H., et al. Contact angle hysteresis and ice adhesion. *Surface & Coatings Technology*, 2020.
11. Li, H., et al. Effect of temperature on ice adhesion strength. *Surface & Coatings Technology*, 2020.
12. Makkonen, L. *Ice adhesion — theory, measurements and countermeasures* / L. Makkonen // *Journal of Adhesion Science and Technology*. — 2012. — Vol. 26, № 4–5. — P. 413–445.
13. Meuler A. J., Smith J. D., Varanasi K. K., Mabry J. M., McKinley G. H., Cohen R. E. *Relationships between water wettability and ice adhesion* / A. J. Meuler, J. D. Smith, K. K. Varanasi та ін. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. — 2010. — Vol. 2, № 11. — P. 3100–3110.

14. OECD. *Digital Education for the 21st Century* / OECD. — Paris: OECD Publishing, 2020. — 128 p
15. OECD. *Innovating Education and Educating for Innovation: The Power of Digital Technologies and Skills* / OECD. — Paris: OECD Publishing, 2020. — 200 p.
16. Parent O., Ilinca A. *Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review* / O. Parent, A. Ilinca // *Cold Regions Science and Technology*. — 2011. — Vol. 65, № 1. — P. 88–96.
17. Petrenko V. F., Whitworth R. W. *Physics of Ice* / V. F. Petrenko, R. W. Whitworth. — Oxford: Clarendon Press, 2002. — 320 с.
18. PhET Interactive Simulations. University of Colorado Boulder [Електронний ресурс]. URL: <https://phet.colorado.edu/>
19. Scott, M. Ice accretion and aerodynamic performance. *Aerospace Science and Technology*, 2017.
20. Work A. H., Lian Y. S. A critical review of the measurement of ice adhesion to solid substrates // *Progress in Aerospace Sciences*. — 2018. — Vol. 98. — P. 1–26.
21. Zhang, X., et al. Surface roughness and ice adhesion. *Cold Regions Science and Technology*, 2019.
22. Zhang, X., et al. Visualization of ice nucleation. *Cold Regions Science and Technology*, 2019.
23. Zhao, L., et al. Glass-ice adhesion reduction by silane coatings. *Coatings*, 2021.
24. Zhao, L., et al. Ice adhesion at cryogenic temperatures. *Cryogenics*, 2022.
25. Аніщенко, В. М., Артюшина, М. В., Герлянд, Т. М., Кулалаєва, Н. В., Романова, Г. М., Шимановський, М. М. та ін. Теорія і практика проектного навчання у професійно-технічних навчальних закладах / за заг. ред. Н. В. Кулалаєвої. — Житомир : «Полісся», 2019. — 208 с.
26. Атаманчук, П. С., Атаманчук, В. П. STEM-інтеграційні аспекти становлення сучасної природничо-наукової освіти / П. С. Атаманчук, В. П. Атаманчук //

- Педагогіка XXI століття: сучасний стан та тенденції розвитку : колективна монографія.* – Львів–Торунь : Ліга-Прес, 2021. – С. 586–619.
27. Баюрко, Н. В., Голунова, Л. А. Формування дослідницької компетентності майбутніх учителів біології: теоретичний аспект / Н. В. Баюрко, Л. А. Голунова // *Дніпровський університет.* – 2021. – № 59.
 28. Бербец, В. В., Кожевніков, Р. Сутність та значення дослідницької компетентності в особистісному та освітньому розвитку учнів / В. В. Бербец, Р. Кожевніков // *Збірник наукових праць Уманського державного педагогічного університету.* – 2024. – № 3. – С. 58–65.
 29. Бех, І. Д. Теоретико-прикладний сенс компетентнісного підходу в педагогіці / І. Д. Бех // *Педагогіка і психологія: вісник АПН України.* – 2009. – № 2. – С. 27–33.
 30. Бібік, Н. М. Компетентність у навчанні / Н. М. Бібік // *Енциклопедія освіти* / гол. ред. В. Г. Кремень ; Акад. пед. наук України. – Київ : Юрінком Інтер, 2008. – С. 408–409.
 31. Бурчак, Л. В. Формування дослідницької компетентності майбутнього вчителя хімії в системі вищої освіти : автореф. дис. ... канд. пед. наук / Л. В. Бурчак. – Полтава, 2011.
 32. Василенко, Л. В. Дослідницька компетентність майбутнього вчителя початкових класів: структурні компоненти / Л. В. Василенко // *Освітній простір України.* – 2019. – № 16. – С. 56–62.
 33. Венцель, Н. В. Особливості формування науково-дослідницької компетентності учнів Наукового ліцею Державного університету «Житомирська політехніка» // *Педагогічна Житомирщина.* – Спецвипуск № 1. – 2025.
 34. Вербицький, В. В. Дослідницька компетентність старшокласників як засіб формування особистості / В. В. Вербицький // *Сучасний виховний процес: сутність та інноваційний потенціал : матеріали звіт. наук.-практ. конф. Ін-ту проблем виховання НАПН України за 2011 рік (м. Івано-Франківськ, 2012 р.).* – Івано-Франківськ, 2012. – Вип. 2. – С. 43–47.

35. Войтків, Г. В. Дослідницька діяльність як спосіб підвищення розуміння навчального матеріалу з фізики / Г. В. Войтків // *Педагогічний альманах*. – 2023. – Вип. 55. – С. 16–20.
36. Гетманська М. О. *Формування природничо-наукового світогляду ліцеїстів через дослідницькі практики у галузі природничих наук*. // Педагогічна Житомирщина. – 2024.
37. Головань, М. С., Яценко, В. В. Сутність та зміст поняття «дослідницька компетентність» // *Теорія та методика навчання фундаментальних дисциплін у вищій школі*. – Кривий Ріг : Видавничий відділ НМетАУ, 2012. – Вип. VII. – С. 55–62.
38. Гриньова, М. В. Професійна підготовка майбутніх учителів природничих спеціальностей до дослідницької діяльності / М. В. Гриньова // *Імідж сучасного педагога*. – 2018. – № 1 (178). – С. 13–18.
39. Грицай, Н. Дослідницький підхід у методичній підготовці майбутніх учителів природничих наук / Н. Грицай // *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Педагогіка, соціальна робота*. – 2017. – Вип. 2 (41). – С. 67–70.
40. Грицай, Н. Підготовка майбутніх учителів природничих наук до роботи в Новій українській школі / Н. Грицай // *Наукові записки [Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка]*. Серія: *Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. – 2018. – Вип. 13 (2). – С. 132–136.
41. Грудинін, Б. О. Педагогічна модель розвитку дослідницької компетентності старшокласників у процесі навчання фізики / Б. О. Грудинін. – *Зб. наук. праць Кам'янець-Подільського нац. ун-ту ім. І. Огієнка. Серія «Педагогічна»*. – 2015. – Вип. 21. – С. 187–191.
42. Гуревич Р. С. *Цифрові технології у навчанні фізики* / Р. С. Гуревич. — Київ: Освіта, 2021. — 168 с.
43. Гуревич Р. С., Пащенко О. П. *Інтеграція STEM-підходу у викладанні фізики* / Р. С. Гуревич, О. П. Пащенко. — Київ: Освіта, 2021. — 160 с.

44. Гуревич Р. С., Пащенко О. П. *Інформаційно-комунікаційні технології у навчанні фізики* / Р. С. Гуревич, О. П. Пащенко. — Київ: Освіта, 2021. — 176 с.
45. Гуревич Р. С., Прохорова С. М. STEM-освіта у підготовці вчителя фізики // *Фізика та астрономія в школі*. — 2020. — № 4. — С. 208-213.
46. Гурський П. І. *Фізика низьких температур* / П. І. Гурський. — Київ: Освіта, 2017. — 272 с.
47. Державний стандарт базової середньої освіти [Електронний ресурс]. URL: <https://mon.gov.ua/osvita-2/zagalna-serednya-osvita/nova-ukrainska-shkola2/derzhavnyi-standart-bazovoi-serednoi-osviti>
48. Енциклопедія освіти / Нац. акад. пед. наук України ; гол. ред. В. Г. Кремень ; заст. гол. ред. В. І. Луговий, О. М. Топузов ; відп. наук. секр. С. О. Сисоєва ; редкол.: О. І. Ляшенко, С. Д. Максименко, Н. Г. Ничкало, П. Ю. Саух, Л. Д. Березівська, І. Д. Бех, В. Ю. Биков, М. С. Гальченко, В. В. Засенко, С. А. Калашнікова, М. О. Кириченко, Л. Б. Лук'янова, В. Г. Панок, В. О. Радкевич, О. Я. Савченко, М. М. Слюсаревський, О. В. Сухомлинська. — 2-ге вид., допов. та перероб. — Київ : Юрінком Інтер, 2021. — 1144 с.
49. Закон України «Про освіту». Редакція від 2023 р. [Електронний ресурс] / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19>
50. Каленський А. І. *Наукові підходи до розвитку дослідницької компетентності вчителів ліцею*. // Педагогічна Житомирщина. — 2024.
51. Карпова Л. Дослідницька компетентність учителя Нової української школи. — Київ: [Генеза], 2025. — 120 с.
52. Карпова, Л. Дослідницька компетентність вчителя Нової української школи // *Молодь і ринок*. — 2019. — № 1 (168). — С. 85–89. [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.24919/2308-4634.2019.158531>
53. Кондратьєв, М. Д. *Фізика поверхневих явищ* / М. Д. Кондратьєв. — К. : Наук. думка, 2015.

54. Концепція «Нова українська школа» [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України. — Київ, 2017. URL: <https://mon.gov.ua/ua/osvita/innovaciyi/novaukrainska-shkola>
55. Коробова, І. В., Тонконцова, І. О., Шарко, В. Д. Організація дослідницької діяльності учнів на уроках фізики / І. О. Тонконцова, В. Д. Шарко, І. В. Коробова // *Пошук молодих : матеріали Всеукр. студ. наук.-практ. конф. «Формування компетентностей учнів і студентів засобами природничо-математичних дисциплін»* (Херсон, 19–20 квітня) / уклад. В. Д. Шарко, І. В. Коробова. — Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2012. — Вип. 11. — С. 73–75.
56. Костюк В. М. *STEM-проекти у викладанні фізики* / В. М. Костюк. — Харків: ХНПУ, 2022. — 192 с.
57. Костюк В. М. *Методика навчання фізики в контексті компетентнісної освіти* / В. М. Костюк. — Харків: ХНПУ, 2022. — 240 с.
58. Костюк В. М. *Методика навчання фізики: цифровий компонент STEM-освіти* / В. М. Костюк. — Харків: ХНПУ, 2022. — 200 с.
59. Костюк В. М. *Сучасні освітні технології у навчанні фізики* / В. М. Костюк. — Харків: ХНПУ, 2022. — 256 с.
60. Кулініч S. A., Farzaneh M. *Ice adhesion on super-hydrophobic surfaces* / S. A. Kulinich, M. Farzaneh // *Applied Surface Science*. — 2009. — Vol. 255, № 18. — P. 8153–8157.
61. Кулініч, С. А., Фарзане, М. *Ice adhesion on surfaces: Mechanisms and control* / С. А. Кулініч, М. Фарзане // *Langmuir*. — 2009.
62. Кучер С. В. *GeoGebra та Python у навчанні фізики* / С. В. Кучер. — Вінниця: Нілан, 2022. — 208 с.
63. Ланкіна, В. В. Особливості формування дослідницької компетентності учнів старших класів у закладах спеціалізованої освіти // *Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні аспекти розвитку STEAM-освіти в умовах євроінтеграції»*. — Кропивницький: ДонДУВС, 2025. — С. 194–196.

64. Любчак, О. М. Теоретичні аспекти визначення сутності дослідницької компетентності майбутнього вчителя / О. М. Любчак // *Проблеми сучасної педагогіки*. – 2013. – № 60.
65. Мартиненко О. В., Ковтун Г. І. Дослідницька компетентність учителя математики та економіки: специфіка формування / О. В. Мартиненко, Г. І. Ковтун. — Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології. — 2014. — № 5(39). — С. 286-294.
66. Мельник І. Г. *STEM-проекти у викладанні фізики* / І. Г. Мельник. — Київ: Генеза, 2021. — 176 с.
67. Мельник, І. Г. *Основи фізичної хімії поверхонь* / І. Г. Мельник. — Харків : ХНУ, 2017. — 256 с.
68. Мельниченко О. І. *Віртуальні лабораторії у шкільному курсі фізики* / О. І. Мельниченко. — Львів: ЛНУ, 2020. — 144 с.
69. Мельниченко О. І. *Фізика фазових переходів і структур льоду* / О. І. Мельниченко. — Львів: ЛНУ, 2020. — 280 с.
70. Мерзликін, О. В. Дослідницькі компетентності з фізики старшокласників : структура, рівні, критерії сформованості / О. В. Мерзликін ; Ін-т інформаційних технологій і засобів навчання НАПН України. — *Зб. наук. праць Кам'янець-Подільського нац. ун-ту. Серія педагогічна*. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський нац. ун-т ім. І. Огієнка, 2014. — Вип. 20. — С. 42–46.
71. Мерзликін, О. В. Навчальні дослідження у курсі фізики профільної школи: компетентнісний підхід / О. В. Мерзликін // *Педагогічні науки : зб. наук. праць*. — Херсон : ХДУ, 2014. — Вип. 66. — С. 157–163.
72. Мерзликін, О. В. Хмарні технології як засіб формування дослідницьких компетентностей старшокласників у процесі профільного навчання фізики / О. В. Мерзликін. — *Педагогічні науки : зб. наук. праць*. — Херсон : ХДУ, 2015. — Вип. 68. — С. 145–152.
73. МОН України. *Державний стандарт базової середньої освіти* / Міністерство освіти і науки України. — Київ, 2020. — 60 с.

74. МОН України. *Концепція розвитку STEM-освіти в Україні* / Міністерство освіти і науки України. — Київ, 2020. — 24 с.
75. Нелипович, В. В. Елементи STEM-освіти на уроках математики як засіб формування науково-дослідницької компетентності // *Педагогічна Житомирищина*. — 2024.
76. Нечипуренко, П. П. Інформаційно-комунікаційні технології як засіб формування дослідницьких компетентностей старшокласників у профільному навчанні хімії : автореф. дис. канд. пед. наук : 13.00.10. — Кривий Ріг, 2017. — 24 с.
77. Нікітін В. С. *Молекулярна фізика і поверхневі явища* / В. С. Нікітін. — Київ: Вища школа, 2016. — 312 с.
78. Нова Українська школа [Електронний ресурс]. URL: <https://nus.org.ua/>
79. Норкіна, О. В. Розвиток дослідницької компетентності вчителів математики засобами інформаційно-комунікативних технологій : автореф. дис. ... канд. пед. наук : 13.00.04. — Умань, 2017. — 20 с.
80. Пащенко О. П. *Методика навчання фізики: дослідницька діяльність* / О. П. Пащенко. — Суми: Університетська книга, 2021. — 200 с.
81. Пащенко О. П. *Методика навчання фізики: експеримент і дослідження* / О. П. Пащенко. — Суми: Університетська книга, 2021. — 208 с.
82. Пащенко О. П. *Методика навчання фізики: компетентнісний підхід* / О. П. Пащенко. — Суми: Університетська книга, 2021. — 224 с.
83. Пащенко О. П. *Формування дослідницької компетентності учнів у процесі навчання фізики* / О. П. Пащенко. — Суми: Університетська книга, 2021. — 192 с.
84. Про деякі питання державних стандартів повної загальної середньої освіти : Постанова Кабінету Міністрів України № 898 від 30 вересня 2020 р. [Електронний ресурс] / Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/898-2020-%D0%BF>

85. Рябец, Д. В., Молнар, Т. І. Сутність поняття «Дослідницька компетентність» у науковій літературі / Д. В. Рябец, Т. І. Молнар. — Київ : [Генеза], 2020. — 10 с.
86. Сахно Т. В. *Поверхневі явища в курсі фізики середньої школи* / Т. В. Сахно. — Київ: Освіта, 2019. — 192 с.
87. Сердюк Г. А. *Дослідницька компетентність учителя як основа успішної організації дослідно-орієнтованого навчання в науковому ліцеї.* // Педагогічна Житомирщина. — 2024.
88. Сидоренко, В. В. Концептуальні засади Нової української школи: ключові компетентності, ціннісні орієнтири, освітні результати / В. В. Сидоренко // *Методист.* — 2018. — № 5. — С. 5–9.
89. Стецюк, О. Формування дослідницьких компетентностей при навчанні фізики на засадах STEM-освіти / О. Стецюк // *Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти.* — 2018. — Вип. 14 (2). — С. 182–186.
90. Федорчук В. В. Формування дослідницької компетентності майбутніх педагогів у процесі вивчення методики наукових досліджень / В. В. Федорчук. — *Освіта дорослих: теорія, досвід, перспективи.* — 2022. — Вип. 1 (21). — С. 117–125.
91. Чиженко В. М. *Будівельна фізика низьких температур* / В. М. Чиженко. — Київ: Ліра-К, 2019. — 304 с.
92. Чиженко В. М. *Фізичні властивості полімерів* / В. М. Чиженко. — Харків: ХНУ, 2018. — 256 с.
93. Чугунова, О. В. Формування дослідницької компетентності учнів у процесі підготовки науково-дослідних робіт МАН // *Педагогічна Житомирщина.* — 2023.
94. Щербань, І., Савченко, В. Сутність поняття «дослідницька компетентність» у вітчизняній та зарубіжній літературі / І. Щербань, В. Савченко // *Психолого-педагогічні проблеми сучасної школи.* — 2021. — № 2(6). — С. 240–247.