

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Венгрия Олега Ігоровича** на тему **“Розвиток розрахунково-експериментальних методів оцінювання деградації сталей магістральних газопроводів за транспортування ними водню”**, представлену на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика

**Актуальність теми дисертації.** Світова тенденція до декарбонізації економіки та скорочення викидів парникових газів зумовлює активний розвиток водневої енергетики як одного з ключових напрямів забезпечення сталого енергетичного переходу. У цьому контексті особливого значення набуває створення ефективної системи транспортування водню. Використання наявної мережі магістральних газопроводів розглядається як найбільш економічно обґрунтований варіант формування водневої транспортної інфраструктури, оскільки дозволяє мінімізувати витрати на будівництво нових трубопровідних систем. Разом із тим можливість перепрофілювання існуючих газопроводів потребує комплексного аналізу їх технічного стану та роботоздатності в умовах транспортування водню. Значна частина магістральних трубопроводів перебуває в експлуатації протягом десятків років, унаслідок чого матеріал труб зазнає структурних змін, накопичення пошкоджень і деградації механічних властивостей. Додатковим чинником ризику є взаємодія водню з матеріалами трубопроводів, яка може спричиняти розвиток процесів водневого окрихчення, зменшення пластичності, зниження тріщиностійкості та прискорення росту тріщин, що безпосередньо впливає на надійність і безпечність експлуатації трубопровідних систем. Нормативні документи та існуючі методики оцінювання технічного стану магістральних газопроводів були розроблені для умов транспортування природного газу і не враховують механізми деградації матеріалу, характерні для водневого середовища, а також особливості зміни фізико-механічних характеристик сталей під впливом водню. Експериментальні дослідження щодо впливу водню на механічні властивості трубних сталей виконані в основному на неексплуатованих сталях і не відображають сукупного впливу тривалої експлуатації, накопичених пошкоджень та експлуатаційної деградації матеріалу. Особливо складним є визначення характеристик опору крихкому руйнуванню, зокрема тріщиностійкості, в умовах водневого середовища. Проведення відповідних експериментальних досліджень пов'язане зі значними матеріальними та часовими витратами, складністю відтворення умов експлуатації, а також конструктивними обмеженнями, зумовленими невеликою товщиною стінок труб, що ускладнює виготовлення стандартних зразків для випробувань. Тому особливої актуальності набуває розроблення сучасних розрахунково-експериментальних підходів до оцінювання деградації сталей трубопроводів, які поєднують результати експериментальних досліджень

механічних характеристик експлуатованих трубних сталей із методами математичного моделювання та алгоритмами машинного навчання. Такий підхід дає можливість прогнозувати зміну механічних властивостей матеріалу за сумісної дії експлуатаційного пошкодження та водню, а також формувати науково обґрунтовані критерії їх придатності до безпечного транспортування водню. Отже, створення відповідних методів і моделей є важливим науково-технічним завданням, вирішення якого сприятиме безпечному та економічно ефективному використанню існуючої газотранспортної інфраструктури в умовах розвитку водневої енергетики.

Враховуючи вищесказане, дана дисертаційна робота є, безперечно, актуальною в науковому та прикладному аспектах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Дисертаційну роботу виконано у відділі діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів (№ 3) Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. Результати отримано в межах виконання робіт за держбюджетними темами “Дослідження ролі водневого чинника в експлуатаційній деградації конструкційних сталей” (№ держреєстрації 0121U108961, 2021–2023 рр.) та “Дослідження закономірностей розвитку пошкоджень в тривало експлуатованих конструкційних сталях за впливу різних за природою наводнювальних середовищ” (№ держреєстрації 0124U000911, 2024–2026 рр.), а також конкурсного проєкту НФДУ № 2022.01/0099 “Розроблення методології оцінювання роботоздатності існуючих газопроводів для підвищення стійкості функціонування енергетичної системи України при транспортуванні зеленого водню” (2023–2024 рр., № держреєстрації 0123U103425), в яких автор працював як виконавець.

**Загальна характеристика роботи та отриманих у ній результатів.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації». У **вступі** висвітлено актуальність теми дослідження та її зв'язок із науково-дослідними роботами, визначено мету дослідження, сформульовано основні завдання, необхідні для її досягнення, а також окреслено об'єкт і предмет дослідження. Наведено характеристику методів дослідження, використаних під час виконання роботи. Представлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Також наведено інформацію про особистий внесок автора у виконання досліджень і підготовку наукових публікацій, апробацію основних результатів дисертації на наукових конференціях, а також подано відомості про структуру і загальний обсяг дисертаційної роботи. **Перший розділ** присвячено аналізу сучасного стану досліджень, що стосуються оцінювання деградаційних процесів і тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів за умов їх використання для транспортування водню. Розглянуто основні аспекти зміни технічного стану

трубопроводів у процесі тривалої експлуатації, а також проаналізовано сучасні підходи до визначення та прогнозування властивостей сталей під впливом водневого середовища. Окрему увагу зосереджено на методах моделювання процесів деградації матеріалу, зумовлених дією водню. На основі виконаного аналізу окреслено коло актуальних невирішених наукових питань, обґрунтовано вибір напрямку подальших досліджень і сформульовано мету та основні завдання дослідження. У **другому розділі** наведено опис комплексу експериментальних методик, використаних у дослідженні. Зокрема, представлено методики механічних випробувань і фрактографічного аналізу, процедуру електролітичного наводнювання зразків, методи оцінювання опору сталей воднему окрихченню та визначення вмісту водню в матеріалі. Також висвітлено підходи до статистичної обробки експериментальних результатів і наведено характеристики матеріалів, які були об'єктом дослідження. **Третій розділ** присвячено дослідженню впливу водню на механічні властивості трубопровідної сталі з урахуванням її експлуатаційного стану, ступеня наводнювання та швидкості прикладання навантаження. Встановлено, що тривала експлуатація спричиняє деградацію металу, яка проявляється як зменшення ударної в'язкості та пластичності порівняно з вихідним станом. Доведено, що сталь 17Г1С після 38 років експлуатації характеризується значно вищою чутливістю до водневого окрихчення під час стандартних випробувань на розтяг електролітично наводнених зразків, ніж неексплуатована. За результатами експериментального дослідження впливу тривалої експлуатації, наводнювання та швидкості навантаження на статичну тріщиностійкість сталі 17Г1С обґрунтовано застосування низьких швидкостей навантаження для оцінювання її в'язкості руйнування у водні. Такий підхід забезпечує необхідні умови для дифузії водню до зони передруйнування та дає змогу коректніше оцінити схильність матеріалу до окрихчення. Визначено показники статичної тріщиностійкості, які є найбільш інформативними для оцінювання водневого окрихчення залежно від вихідного або експлуатаційно деградованого стану матеріалу. На основі отриманих розрахункових та експериментальних даних запропоновано критерій досягнення граничного експлуатаційного стану сталі магістрального газопроводу за параметром тріщиностійкості під час його перепрофілювання для транспортування водню та розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання ступеня деградації експлуатованої сталі трубопроводу в умовах водневого середовища. **Четвертий розділ** роботи присвячено розробці математичних моделей прогнозування розподілу концентрації водню у матеріалі стінки труби у часі та тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів за дії водню, які враховують експлуатаційну деградацію матеріалу та концентрацію водню. Розв'язок рівняння дифузії водню за реальних параметрів експлуатації трубопроводу інтегрований у розроблені моделі, які уможливили прогнозування з високою точністю зміни тріщиностійкості матеріалу стінки труби під час експлуатації за дії водню. У

**додатках** наведено перелік публікацій здобувача, а також акти практичного використання результатів дисертаційного дослідження у ТОВ «ІПП-Центр» та Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу.

**Новизна одержаних теоретичних та/або експериментальних результатів дисертаційного дослідження** полягає в тому, що дисертантом:

- Обґрунтовано необхідність застосування зниженої швидкості навантаження зразків трубних сталей відносно рекомендованої під час випробувань методом  $J$ -інтегралу для коректного визначення впливу водню на характеристики в'язкості руйнування. Показано, що зменшення швидкості навантаження є важливою умовою забезпечення процесів дифузії водню до області передруйнування поблизу вершин втомної тріщини, що дає змогу адекватно оцінити схильність матеріалу до водневого окрихчення.

- Розроблено обчислювальну модель на основі фізико-інформованих нейронних мереж для прогнозування просторово-часового розподілу концентрації водню в матеріалі стінки трубопроводу та виконано оцінювання еволюції вмісту водню в матеріалі залежно від тривалості його впливу.

- Розроблено математичні моделі для прогнозування зміни характеристик тріщиностійкості трубопровідних сталей залежно від рівня концентрації водню з урахуванням деградації матеріалу в процесі тривалої експлуатації. Запропоновані моделі поєднано з розв'язанням задачі дифузії водню для умов реального функціонування трубопроводу, що забезпечує можливість прогнозування зміни статичної тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів під дією водневого середовища з урахуванням їх експлуатаційної деградації.

- Обґрунтовано критерій граничного експлуатаційного стану матеріалу експлуатованих магістральних газопроводів за параметром статичної тріщиностійкості під час транспортування водню. В основу критерію покладено встановлені закономірності впливу ступеня наводнювання та швидкості навантаження на характеристики опору руйнуванню трубних сталей, а також враховано зміну цих характеристик унаслідок експлуатаційної деградації матеріалу. Для визначення умов досягнення граничного експлуатаційного стану матеріалів трубопроводів виконано розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень у зоні вершин тріщиноподібних дефектів стінки труб із урахуванням їх геометричних параметрів та робочого тиску водню в трубопроводі.

**Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, положень і висновків дисертаційного дослідження.** Достовірність результатів, наведених у дисертаційній роботі, підтверджується коректним використанням фундаментальних положень механіки деформівного твердого тіла та математичної фізики, а також застосуванням сучасних математичних і чисельних

методів для розв'язання поставлених задач. Надійність отриманих результатів забезпечено їх зіставленням із відомими аналітичними та експериментальними даними, а також узгодженістю сформульованих висновків із фізичною природою процесів, що відбуваються в досліджуваних об'єктах.

**Рівень виконання поставленого наукового завдання, оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.** Поставлені наукові завдання у дисертаційній роботі виконані на високому науковому та методологічному рівнях з використанням сучасних методів механіки деформівного твердого тіла, математичної фізики, машинного навчання, поєднуючи розрахункові та експериментальні методи дослідження. Сформульована тема дисертації відповідає її фактичному змісту. Здобувач успішно опанував сучасну методологію наукової діяльності та набув компетентності, теоретичні знання та навички, необхідні для рівня ступеня доктора філософії з галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

**Повнота викладу наукових результатів, положень і висновків дисертаційного дослідження в опублікованих працях.** Отримані в дисертаційній роботі результати опубліковано у наукових фахових виданнях, пройшли апробацію на наукових міжнародних конференціях. За результатами дисертаційного дослідження автором опубліковано 18 наукових праць, серед них 7 статей у періодичних наукових виданнях, проіндексованих базами даних Web of Science Core Collection та/або Scopus (1 стаття віднесена до першого квартилю та 4 – до третього), 2 статті у наукових фахових виданнях України, 2 розділи у колективних книгах, проіндексованих базами даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 7 тез доповідей на міжнародних конференціях. Обсяг опублікованих робіт, їх кількість та якісні показники відповідають чинним вимогам для дисертаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

**Оцінка дотримання принципів академічної доброчесності.** Порухень академічної доброчесності у дисертаційній роботі О.І. Венгринюка та його наукових публікаціях не виявлено.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. Припущення, прийняті у роботі під час побудови математичної моделі, могли б бути чіткіше сформульовані та обґрунтовані.
2. У розділі 4 доцільно було б доповнити роботу графіками функцій втрат: окремо подати сумарну (зважену) функцію втрат та кожен складник.
3. Доречним є акцентування уваги на залишковій концентрації водню в матеріалі, а не на умовах наводнювання зразків, оскільки саме вона може бути більш інформативною характеристикою під час аналізу отриманих результатів.
4. Робота має незначну кількість орфографічних та стилістичних помилок.

Викладені зауваження не впливають на загальну високу позитивну оцінку дисертаційної роботи та не заперечують наукову та практичну цінність отриманих у дисертації результатів та висновків.

**Загальний висновок про відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам.** Дисертаційна робота Венгринюка Олега Ігоровича на тему “Розвиток розрахунково-експериментальних методів оцінювання деградації сталей магістральних газопроводів за транспортування ними водню” є завершеним самостійним науковим дослідженням, виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності, відзначається новизною теоретичних та практичних результатів проведених здобувачем досліджень, їхньою науковою обґрунтованістю, високим рівнем виконання поставленого наукового завдання та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності. Дисертаційна робота відповідає спеціальності 113 – Прикладна математика та вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор Венгринюк Олег Ігорович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

**Офіційний опонент:**

професор кафедри матеріалознавства та  
інженерії матеріалів  
Національного університету  
«Львівська політехніка»,  
доктор технічних наук, доцент



Володимир КУЛИК

« 06 » серпня 2026 року

Підпис професора кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів Національного університету «Львівська політехніка» Володимира КУЛИКА засвідчую.

Проректор  
Національного університету  
«Львівська політехніка»




Ірина ЯРЕМЧУК