

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**Венгринюка 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**

Декарбонізація енергетичного сектору та перехід до використання водню як екологічно чистого енергоносія є одним із пріоритетних напрямів розвитку світової енергетики. Для впровадження водневої енергетики одним із найбільш економічно доцільних шляхів транспортування водню є використання існуючої газотранспортної інфраструктури. Однак реалізація такого підходу потребує науково обґрунтованого оцінювання технічного стану магістральних газопроводів, які є здебільшого тривало експлуатованими і метал труб може зазнавати деградації. Водночас взаємодія водню зі сталями експлуатованих труб може призводити до розвитку деградаційних процесів, зокрема водневого окрихчення, зниження пластичності та тріщиностійкості матеріалу.

Існуючі методи оцінювання деградації сталей трубопроводів переважно орієнтовані на умови транспортування природного газу та не враховують фізико-механічні особливості деградації сталей за дії водню. Відомі дослідження зміни механічних властивостей сталей під впливом водню в основному реалізовані на неексплуатованих сталях, а тому не враховують деградацію металу під час тривалої експлуатації.

Оцінювання впливу водню на критично важливі для роботоздатності трубопроводів характеристики опору крихкому руйнуванню, зокрема, тріщиностійкість, експериментально є складним завданням, зважаючи на трудоємність експериментів та обмеження, пов'язані з невеликою товщиною труб. Тому розвиток розрахунково-експериментальних методів, які поєднують прогнозування механічних властивостей металу трубопроводів за впливу водню та інших факторів за допомогою методів математичного моделювання та машинного навчання з результатами експериментальних досліджень механічних характеристик трубних сталей, є особливо актуальним науково-технічним завданням для розв'язання важливої проблеми енергетичного сектору щодо перепрофілювання наявних магістральних газопроводів для транспортування водню.

Робота виконана у відділі діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України у межах кількох бюджетних тем відповідно до тематичних планів НАН України та гранту Національного фонду досліджень України.

## **Загальна характеристика та структура роботи**

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основного змісту, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 189 сторінок (з них 132 – основний текст), ілюстративний матеріал представлено 63 рисунками та 17 таблицями, а бібліографія охоплює 237 найменувань. Дисертаційна робота написана українською мовою, з дотриманням вимог наукового стилю та принципів академічного викладення матеріалу. Логіка викладу підпорядкована сформульованій меті.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної тематики дослідження і відображено її взаємозв'язок із науковими роботами, у яких здобувач приймав участь. Сформульовано мету дисертаційних досліджень та означено перелік основних завдань, необхідні для її досягнення, визначено об'єкт і предмет дослідження, подано характеристику методів, які було застосовано під час виконання наукових досліджень. Висвітлено наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність. Подано відомості про особистий внесок автора у проведення досліджень і підготовку наукових праць, апробацію основних положень роботи на наукових конференціях, а також структуру дисертації та її загальний обсяг.

У першому розділі наведено результати аналітичного огляду щодо оцінювання деградації та опору руйнуванню сталей магістральних газопроводів за їх перепрофілювання для транспортування водню. Проаналізовано проблеми, пов'язані з технічним станом сталей магістральних газопроводів, сучасні методи та підходи до оцінювання та прогнозування зміни механічних характеристик сталей за дії водню та тривалої експлуатації. Значну увагу приділено моделюванню деградації сталей трубопроводів за дії водню. Підсумком огляду стало аргументоване виокремлення невирішених питань, обґрунтовано доцільність та напрям подальших досліджень, на основі чого сформульовано мету та визначено основні завдання дослідження.

У другому розділі викладено застосовані здобувачем методики експериментальних механічних та фрактографічних досліджень, електролітичного наводнювання зразків, визначення опору водневого окрихченню та концентрації водню у металі, статистичного аналізу результатів досліджень, наведений перелік досліджених матеріалів.

Третій розділ присвячено дослідженню впливу водню на механічні характеристики сталі трубопроводу з урахуванням її експлуатаційної деградації, інтенсивності наводнювання та швидкості навантаження. Виявлено, що тривала експлуатація трубопроводу окрихчує метал, знижується його ударна в'язкість та пластичність порівняно з неексплуатованим. Показано значно вищу схильність експлуатованої впродовж 38 років сталі 17Г1С до водневого окрихчення за стандартних випробувань на розтяг електролітично наводнених зразків, ніж неексплуатованої. На основі результатів проведених досліджень впливу тривалої експлуатації, наводнювання та швидкості навантаження на тріщиностійкість сталі 17Г1С методом  $J$ -інтегралу обґрунтовано доцільність використання низької швидкості навантаження для оцінювання її в'язкості руйнування за дії водню задля забезпечення умов для дифузії водню у зону передруйнування. Встановлено найчутливіші до водневого окрихчення показники статичної тріщиностійкості

залежно від стану металу, вихідного чи експлуатованого. На основі результатів експериментальних досліджень, а також розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершинах можливих тріщиноподібних дефектів у стінці труби, залежно від їх геометрії та тиску водню, обґрунтовано критерій досягнення граничного стану сталі магістрального газопроводу за параметром тріщиностійкості в умовах його перепрофілювання для водню. Розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання деградації сталі експлуатованого магістрального газопроводу за дії водню. Показано, що зниження тріщиностійкості сталі після 38 років експлуатації на магістральному газопроводі у типовому діапазоні зміни робочого тиску водню 3,5-7,5 МПа не виходить за допустимі межі.

У четвертому розділі розроблено обчислювальну модель для прогнозування розподілу концентрації водню у металі стінки труби у часі з використанням фізико-інформованих нейронних мереж та оцінено зміну такого розподілу. Модель забезпечує високу точність прогнозування. Розроблено математичні моделі прогнозування тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів, які враховують концентрацію в них водню і їх експлуатаційну деградацію. Запропоновано відповідну функціональну залежність для кожного стану металу, вихідного чи експлуатаційно деградованого отриману на основі експериментальних даних та їх обробки методом найменших квадратів. У розроблені моделі інтегрований розв'язок рівнянь дифузії водню за реальних параметрів експлуатації трубопроводу, що дало змогу прогнозувати розподіл концентрації водню по товщині стінки труби та оцінювати зміну тріщиностійкості металу за дії водню під час експлуатації.

У додатках наведено акти впровадження результатів досліджень та список опублікованих праць за темою дисертації.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та наукової новизни**

Достовірність і обґрунтованість основних наукових результатів, висновків і рекомендацій роботи забезпечена комплексом взаємодоповнювальних підходів – теоретичних, чисельних та експериментальних і їх взаємопов'язаністю та перевіркою, обґрунтованим застосуванням класичних положень та методів механіки деформівного твердого тіла та математичної фізики, строгістю застосування ефективних математичних та числових методів для розв'язування отриманих рівнянь, верифікацією отриманих результатів з аналітичними та експериментальними результатами, отриманими іншими дослідниками; відповідністю висновків суті фізичних явищ у досліджуваних об'єктах.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у наступному:

Обґрунтовано доцільність зниження швидкості навантаження зразків високо пластичних трубних сталей відносно рекомендованої під час випробувань з використанням методу  $J$ -інтегралу для визначенням впливу водню на в'язкість

руйнування, як необхідної передумови для дифузії водню до зони передруйнування у вершині втомної тріщини.

Розроблено обчислювальну модель для прогнозування розподілу концентрації водню у металі стінки труби з використанням фізико-інформованих нейронних мереж та оцінено зміну розподілу вмісту водню у металі з часом.

Сформульовано математичні моделі прогнозування тріщиностійкості сталей трубопроводів залежно від концентрації водню, які враховують експлуатаційну деградацію металу. Розроблені моделі інтегровані із розв'язком рівняння дифузії водню для реальних параметрів трубопроводу, що дає змогу прогнозувати, як змінюватиметься статична тріщиностійкість сталей магістральних газопроводів залежно від концентрації в них водню з урахуванням їх деградації під час експлуатації.

Обґрунтовано критерій граничного стану металу експлуатованого магістрального газопроводу за параметром статичної тріщиностійкості за умов транспортування водню, в основі якого встановлені закономірності впливу інтенсивності наводнювання та швидкості прикладеного навантаження на характеристики тріщиностійкості трубних сталей та їх зміну внаслідок деградації, а також розраховані коефіцієнти інтенсивності напружень в околі тріщиноподібних дефектів у стінці труб з урахуванням їх геометрії та тиску водню у трубопроводі.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Результати дисертації мають практичне значення для оцінювання роботоздатності магістральних трубопроводів за умов транспортування водню: запропоновано критерій досягнення металом граничного стану за дії водню, який враховує наявність можливих тріщиноподібних дефектів та умови експлуатації, навантаження і наводнювання. Їх використано ТОВ «ІПП-Центр» для апробації методів оцінювання роботоздатності магістральних газопроводів та прогнозування їх надійної та безпечної експлуатації за умов транспортування водню, а також включено у навчальну програму підготовки здобувачів вищої освіти другого кваліфікаційного рівня (магістр) за спеціальністю 185 – «Нафтогазова інженерія та технології» в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу МОН України.

### **Рівень виконання поставленого наукового завдання та рівень володіння здобувачем методологією наукової діяльності**

Робота виконана на високому науковому рівні, викладення матеріалу структуроване, зрозуміле, грамотне, логічне і послідовне. Мета і завдання дослідження сформульовані грамотно, логічно витікають і узгоджуються з відомими результатами отриманими іншими дослідниками, що дозволило сформулювати та вирішити основне наукове завдання з розроблення математичних моделей та розрахунково-експериментальних методів оцінювання деградації сталей магістральних газопроводів за їх тріщиностійкістю під час транспортування ними водню.

Здобувач продемонстрував високий рівень оволодіння сучасною методологією наукової діяльності, зокрема, методологією наукового пошуку,

аналізу відомих результатів, здатності виокремити ключові невирішені питання та запропонувати ймовірні напрямки та способи їх вирішення. У роботі успішно поєднано теоретичні та емпіричні методи дослідження, що дозволило забезпечити достовірність і наукову новизну отриманих результатів. Обрані підходи відповідають меті та завданням наукових досліджень. Отримані висновки базуються на результатах виконаних теоретичних та експериментальних досліджень та відповідають темі дисертації. Основні положення, результати та висновки, отримані у дисертаційній роботі, повною мірою розкриті в опублікованих працях автора, у тому числі у ряді фахових публікацій, цитованих у наукометричних базах SCOPUS та WoS. Результати дисертації були апробовані під час доповідей на відповідних авторитетних фахових міжнародних наукових конференціях. Дисертацію оформлено відповідно до наукових стандартів. Вищезазначене засвідчує опанування здобувачем методології наукової діяльності та набуття необхідних компетентностей доктора філософії з галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

### **Оцінка дотримання принципів академічної доброчесності**

За результатами перевірок та аналізу матеріалів дисертаційної роботи не було виявлено ознак плагіату чи фальсифікації даних та будь-яких інших порушень академічної доброчесності.

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Основні результати роботи висвітлено та належним чином апробовано у 18 наукових публікаціях, з яких 7 статей опубліковано у періодичних наукових виданнях, що індексуються базами даних Web of Science Core Collection та/або Scopus (з них у виданнях, віднесених до Q1 – 1 та до Q3 – 4, відповідно до класифікації SCImago Journal), 2 статті – у наукових фахових виданнях України, 2 розділи у колективних книгах, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus та 7 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Внесок здобувача у наукові праці, підготовлені у співавторстві та зараховані за тематикою дисертаційного дослідження, є вагомим і належним чином відображений у відповідних положеннях дисертаційної роботи. Наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. При формулюванні обчислювальної моделі для прогнозування розподілу концентрації водню у металі стінки труби слід було детальніше описати вибір архітектури нейронної мережі і показати порівняння різних архітектур – які справляються із задачею, а які ні, та пояснити чому.

2. У роботі недостатньо розглянуто питання чому існуючі нормативні документи не можуть бути безпосередньо застосовані для оцінювання технічного стану газопроводів при транспортуванні водню.

3. Доцільно було б сформулювати рекомендації щодо матеріалів, для яких розроблені моделі можна застосовувати.

4. У роботі не враховано можливий вплив температури експлуатації на процеси водневого окрихчення.

5. У тексті дисертаційної роботи зустрічаються окремі незначні редакційні помилки, термінологічні і стилістичні неточності, які не впливають на загальну логіку викладу матеріалу.

Зазначені зауваження не мають принципового значення з огляду аналізу наукової та практичної цінності отриманих у дисертації результатів та не впливають на загальну високу позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Дисертаційна робота Венгринюка Олега Ігоровича на тему «Розвиток розрахунково-експериментальних методів оцінювання деградації сталей магістральних газопроводів за транспортування ними водню» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним самостійним науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

За актуальністю, науковою новизною та практичною цінністю отриманих результатів, ступенем їх обґрунтованості, обсягом проведених досліджень та повнотою публікацій результатів досліджень і їх апробації дисертаційна робота повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6–9 «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 транспортування та зберігання енергоносіїв

Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу,  
доктор технічних наук, професор

 Ярослав ДОРОШЕНКО

«30» 07 2026 року

Затверджено  
Підписано  
30 07 2026 р.

