

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Олега Ігоровича Венгринюка
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»

За результатами вивчення дисертаційної роботи Венгринюка Олега Ігоровича, поданої у вигляді спеціально підготовленого рукопису, а також аналізу наукових публікацій здобувача за темою дисертації слід зазначити таке, що робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, присвяченим розвитку математичних моделей і розрахунково-експериментальних методів оцінювання деградації сталей магістральних газопроводів за показниками тріщиностійкості під час транспортування водню.

Дисертаційна робота складається з анотацій українською та англійською мовами, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Структура роботи відповідає поставленій меті та забезпечує послідовне викладення теоретичних, експериментальних і розрахункових результатів дослідження.

Актуальність теми дисертації та зв'язок з науковими програмами, планами, темами, грантами. Використання наявних магістральних газопроводів для транспортування водню є одним із перспективних напрямів розвитку водневої енергетики та переходу до ширшого застосування енергії з відновлюваних джерел. Водночас значна частина газотранспортної інфраструктури України перебуває в тривалій експлуатації, що супроводжується накопиченням пошкоджень, структурними змінами та погіршенням механічних властивостей трубних сталей.

Дія водню може додатково знижувати пластичність, ударну в'язкість, тріщиностійкість і загальний опір руйнуванню металу. Особливо небезпечним є поєднання водневого чинника з експлуатаційною деградацією та наявністю тріщиноподібних дефектів, які не були виявлені під час технічного діагностування. За таких умов важливого наукового і практичного значення набуває розроблення методів, які поєднують експериментальне визначення характеристик опору руйнуванню експлуатованих трубних сталей із математичним моделюванням дифундування водню та прогнозуванням зміни тріщиностійкості металу.

У зв'язку з цим тема дисертаційної роботи Венгринюка Олега Ігоровича, спрямованої на розвиток математичних моделей і розрахунково-експериментальних методів оцінювання деградації сталей магістральних газопроводів під час транспортування водню, є актуальною, своєчасною та має вагомое наукове і практичне значення.

Дисертаційні дослідження виконано відповідно до наукових напрямів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України в межах науково-дослідних тем «Дослідження ролі водневого чинника в експлуатаційній деградації конструкційних сталей», № державної реєстрації 0121U108961, «Дослідження закономірностей розвитку пошкоджень у тривало експлуатованих конструкційних сталях за впливу різних за природою наводнювальних середовищ», № державної реєстрації 0124U000911, а також гранту Національного фонду досліджень України № 2022.01/0099 «Розроблення методології оцінювання роботоздатності існуючих газопроводів для підвищення стійкості функціонування енергетичної системи України при транспортуванні зеленого водню», у виконанні яких здобувач брав участь як виконавець.

Відповідність отриманих результатів темі дисертації

Сформульовані в роботі наукові положення та отримані теоретичні, розрахункові й експериментальні результати відповідають темі дисертації. Проведені дослідження послідовно спрямовані на розвиток математичних моделей і розрахунково-експериментальних методів оцінювання деградації сталей магістральних газопроводів під час транспортування водню.

Назва дисертації коректно відображає її зміст, мету, поставлені завдання та основні наукові результати. Об'єкт і предмет дослідження узгоджуються з обраними методами та структурою дисертаційної роботи.

Новизна представлених теоретичних та/або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розвитку математичних моделей і розрахунково-експериментальних методів оцінювання деградації трубних сталей за дії водню з урахуванням їх експлуатаційного стану.

До основних результатів, що характеризуються науковою новизною, належать такі.

Обґрунтовано доцільність застосування зниженої швидкості навантаження зразків трубних сталей порівняно зі швидкістю, рекомендованою під час визначення характеристик тріщиностійкості методом J-інтеграла. Зниження

швидкості навантаження створює сприятливіші умови для дифундування абсорбованого металом водню до зони передруйнування в околі вершини вихідної втомної тріщини та дає змогу повніше виявити його вплив на характеристики в'язкості руйнування.

Встановлено закономірності впливу інтенсивності наводнювання, швидкості механічного навантаження та експлуатаційної деградації на характеристики статичної тріщиностійкості сталі 17Г1С. Показано, що зниження швидкості навантаження на два порядки підвищує чутливість показників тріщиностійкості до дії водню. Визначено показники тріщиностійкості, найбільш чутливі до водневого окрихчення сталі у вихідному та тривало експлуатованому станах.

Розроблено обчислювальну модель прогнозування просторово-часового розподілу концентрації дифузійно рухливого водню в металі стінки труби на основі фізико-інформованої нейронної мережі. Здобувачем сформульовано задачу дифузії водню в циліндричних координатах, визначено початкові й граничні умови, обрано архітектуру нейронної мережі та сформовано функцію втрат, яка враховує диференціальне рівняння дифузії, початкові та граничні умови, а також опорні дані.

Проведено навчання і верифікацію фізико-інформованої нейронної мережі шляхом порівняння спрогнозованого розподілу концентрації водню з аналітичним розв'язком відповідної крайової задачі. Отримано задовільне узгодження результатів: середня абсолютна похибка становила 0,07 за використання шести опорних точок під час навчання моделі. Розроблена PINN-модель дає змогу оцінювати зміну концентрації водню по товщині стінки труби залежно від часу.

Сформульовано математичні моделі прогнозування статичної тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів залежно від концентрації водню з урахуванням експлуатаційної деградації металу. Для сталі у вихідному та тривало експлуатованому станах запропоновано відповідні функціональні залежності, параметри яких визначено на основі експериментальних даних із застосуванням методу найменших квадратів.

Розроблені моделі тріщиностійкості інтегровано з розв'язком рівняння дифузії водню за реальних геометричних параметрів трубопроводу. Це дає змогу прогнозувати зміну тріщиностійкості металу залежно від просторово-часового розподілу концентрації водню та експлуатаційного стану трубною сталі.

Обґрунтовано критерій досягнення металом магістрального газопроводу граничного стану за параметром статичної тріщиностійкості під час

транспортування водню. В основу критерію покладено встановлені закономірності впливу інтенсивності наводнювання, швидкості механічного навантаження й експлуатаційної деградації на характеристики тріщиностійкості трубних сталей, а також результати розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень в околі вершин можливих тріщиноподібних дефектів у стінці труби з урахуванням їх геометричних параметрів і тиску водню в трубопроводі.

Сукупність отриманих результатів розвиває математичні та розрахунково-експериментальні підходи до оцінювання роботоздатності експлуатованих магістральних газопроводів під час їх перепрофілювання для транспортування водню.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в розробленні розрахунково-експериментального методу оцінювання деградації сталі експлуатованого магістрального газопроводу під час його перепрофілювання для транспортування водню.

Запропонований метод ураховує поточний стан металу, можливу наявність тріщиноподібних дефектів, характеристики статичної тріщиностійкості, геометричні параметри дефектів, тиск у трубопроводі, умови навантаження та наводнювання. Розроблений підхід може бути використаний для оцінювання роботоздатності газопроводів, обґрунтування допустимих умов їх експлуатації та прогнозування зміни опору руйнуванню трубної сталі за дії водню.

Практичну спрямованість результатів підтверджено їх використанням у ТОВ «ІПП-Центр» під час апробації методів оцінювання роботоздатності магістральних газопроводів і прогнозування їх надійної та безпечної експлуатації в умовах транспортування водню.

Окремі результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу МОН України під час підготовки здобувачів другого рівня вищої освіти за спеціальністю 185 «Нафтогазова інженерія та технології».

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі забезпечується комплексним використанням методів математичного моделювання, математичної статистики, математичної фізики, механіки деформівного твердого тіла, механіки руйнування та машинного навчання.

Експериментальну частину роботи виконано із застосуванням стандартизованих методик визначення міцності, пластичності, ударної в'язкості

та статичної тріщиностійкості матеріалів. Концентрацію водню в металі визначено методом термічної десорбції. Для аналізу механізмів руйнування застосовано фрактографічні дослідження.

Обґрунтованість результатів підтверджується статистичним опрацюванням експериментальних даних, зіставленням властивостей сталі у вихідному та тривало експлуатованому станах, порівнянням результатів PINN-моделі з аналітичним розв'язком задачі дифузії, а також узгодженістю встановлених закономірностей із сучасними уявленнями про експлуатаційну та водневу деградацію трубних сталей.

Математичні моделі прогнозування тріщиностійкості побудовано на основі отриманих експериментальних даних, а їх параметри визначено методом найменших квадратів з оцінюванням середніх абсолютних і відносних похибок. Це забезпечує належний рівень обґрунтованості сформульованих у роботі висновків у межах розглянутих матеріалів, параметрів і умов дослідження.

Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих працях та оцінка їх наукового рівня

Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено в наукових публікаціях здобувача за темою дисертації.

Тематика опублікованих праць відповідає основним напрямкам проведеного дослідження та охоплює експериментальне оцінювання впливу водню на механічні характеристики і тріщиностійкість трубних сталей, визначення впливу швидкості навантаження на характеристики опору руйнуванню, обґрунтування критерію досягнення металом газопроводу граничного стану, моделювання дифундування водню із застосуванням фізико-інформованих нейронних мереж та прогнозування зміни тріщиностійкості з урахуванням експлуатаційної деградації металу.

Науковий рівень публікацій є належним, а наведені в них результати відповідають змісту дисертації та підтверджують апробацію її основних наукових положень. Зміст публікацій і наведена в дисертації інформація про особистий внесок здобувача у праці, підготовлені у співавторстві, дають змогу визначити результати, отримані ним безпосередньо.

Особистий внесок здобувача

Основні наукові результати, що становлять зміст дисертації та виносяться на захист, отримано за безпосередньої участі здобувача.

Особистий внесок Олега Ігоровича Венгринюка полягає в побудові та оптимізації фізико-інформованої нейронної мережі для оцінювання зміни розподілу концентрації водню в металі стінки труби з часом; формуванні складових функції втрат; проведенні навчання та верифікації обчислювальної моделі; розробленні математичних моделей прогнозування тріщиностійкості трубних сталей з урахуванням їх експлуатаційної деградації та концентрації водню.

Здобувач також брав безпосередню участь в оцінюванні чутливості механічних властивостей трубної сталі до наводнювання різної інтенсивності, дослідженні впливу інтенсивності наводнювання і швидкості механічного навантаження на характеристики тріщиностійкості, статистичному опрацюванні отриманих результатів та обґрунтуванні критерію досягнення металом труби граничного стану під час транспортування водню.

Вибір загального напрямку дослідження, формулювання окремих завдань, аналіз та обговорення отриманих результатів здійснювалися спільно з науковим керівником і співавторами публікацій, що належним чином відображено в дисертації.

Рівень виконання поставленого наукового завдання та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності. Поставлене наукове завдання виконано на належному науковому та методологічному рівні. Мету дисертаційної роботи досягнуто, а сформульовані завдання загалом виконано. Зміст дисертації відповідає її назві, об'єкту та предмету дослідження. Отримані результати послідовно викладено у відповідних розділах роботи й узагальнено у висновках.

Здобувач продемонстрував володіння методами математичного моделювання, математичної статистики, математичної фізики, механіки руйнування, експериментального дослідження матеріалів і машинного навчання.

Олег Ігорович Венгринюк виявив здатність формулювати крайові задачі математичної фізики, будувати й оптимізувати фізико-інформовані нейронні мережі, формувати функції втрат з урахуванням фізичних закономірностей досліджуваного процесу, проводити навчання та верифікацію обчислювальних моделей, статистично опрацьовувати експериментальні результати та встановлювати функціональні залежності між концентрацією водню і характеристиками тріщиностійкості матеріалу.

Поєднання експериментальних результатів із математичним моделюванням дифундування водню, методами машинного навчання та

математичними залежностями для прогнозування тріщиностійкості трубних сталей відповідає спрямованості спеціальності 113 «Прикладна математика».

Здобувач продемонстрував здатність самостійно розв'язувати комплексні наукові завдання, критично аналізувати й узагальнювати отримані результати, формулювати науково обґрунтовані висновки та практичні рекомендації. Це свідчить про набуття ним теоретичних знань, умінь, навичок і компетентностей, необхідних для присудження ступеня доктора філософії.

Відсутність порушень академічної доброчесності. За результатами аналізу дисертаційної роботи та наукових публікацій здобувача ознак академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації результатів дослідження не виявлено.

Використані в дисертації наукові положення, методи та результати інших авторів супроводжуються відповідними посиланнями на літературні джерела. Наведення запозичених теоретичних положень і результатів попередніх досліджень здійснено з дотриманням установлених правил академічного цитування.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. Параметри запропонованих моделей прогнозування тріщиностійкості визначено методом найменших квадратів, а середню абсолютну та відносну похибки моделей розраховано за тими самими експериментальними даними, які використано для визначення їх параметрів. Доцільно було додатково перевірити прогностичну здатність розроблених моделей на незалежній вибірці експериментальних даних або із застосуванням процедури перехресної перевірки.
2. Автору необхідно було чіткіше сформулювати можливі обмеження стосовно застосування розроблених моделей прогнозування тріщиностійкості.
3. У четвертому розділі було б корисним проаналізувати поведінку функції втрат за різних вагових коефіцієнтів і метрик відстані, щоб оцінити чутливість моделі до вибору цих параметрів, визначити їхній вплив на процес оптимізації та якість прогнозування.
4. У дисертації зустрічаються технічні описки та неточності, які не впливають на загальний логічний та зрозумілий виклад результатів та висновків дисертаційного дослідження.

Наведені зауваження мають переважно уточнювальний і рекомендаційний характер, не заперечують достовірності основних результатів дисертаційної

роботи, не знижують її наукової та практичної цінності й не впливають на загальну позитивну оцінку дослідження.

Висновок про відповідність дисертації 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, у якому отримано нові науково обґрунтовані теоретичні, розрахункові та експериментальні результати, що в сукупності забезпечують вирішення актуального науково-технічного завдання – розроблення математичних моделей і розрахунково-експериментальних методів оцінювання деградації сталей магістральних газопроводів за показниками тріщиностійкості під час транспортування водню.

До основних результатів роботи належать встановлені закономірності впливу наводнювання, швидкості механічного навантаження та експлуатаційної деградації на тріщиностійкість трубних сталей; розроблена із застосуванням фізико-інформованої нейронної мережі обчислювальна модель розподілу концентрації водню в стінці труби; сформульовані математичні моделі прогнозування тріщиностійкості сталі залежно від концентрації водню та її експлуатаційного стану; обґрунтований критерій досягнення металом магістрального газопроводу граничного стану.

Отримані результати відповідають темі дисертації, характеризуються належним рівнем наукової новизни, обґрунтованості та практичного значення. Мету дисертаційної роботи досягнуто, а поставлені завдання виконано. Основні результати достатньо повно висвітлено в наукових публікаціях здобувача, науковий рівень яких відповідає змісту проведеного дослідження. Практичне використання результатів підтверджено відповідними документами.

Здобувач продемонстрував належний рівень виконання поставленого наукового завдання, оволодіння методологією наукової діяльності та здатність самостійно формулювати й розв’язувати комплексні наукові завдання, будувати і перевіряти математичні та обчислювальні моделі, опрацьовувати експериментальні дані, формулювати обґрунтовані висновки і практичні рекомендації. Ознак порушення принципів академічної доброчесності в дисертаційній роботі та наукових публікаціях здобувача не виявлено.

Отже, за актуальністю теми, науковим рівнем, новизною представлених теоретичних, розрахункових та експериментальних результатів, їх науковою обґрунтованістю і відповідністю темі дисертації, практичним значенням,

повнотою висвітлення в наукових публікаціях, рівнем виконання поставленого наукового завдання та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності дисертаційна робота Венгринюка Олега Ігоровича 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 ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика».

Рецензент

старший науковий співробітник
відділу міцності матеріалів і конструкцій
у водневовмісних середовищах
Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
доктор технічних наук, старший дослідник



Ольга ЧЕПІЛЬ

Підпис Ольги ЧЕПІЛЬ засвідчую:

Учений секретар
Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка НАН України
к.т.н., ст.н.с.




Валентина КОРНІЙ