

## АНОТАЦІЯ

Степовий Є.Б. Розвиток теоретичних основ запобігання забруднення довкілля при транспортуванні вуглеводнів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 – Технології захисту навколишнього середовища. – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Міністерства освіти і науки України, Полтава, 2026.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі розвитку теоретичних основ запобігання забруднення довкілля при транспортуванні вуглеводнів шляхом застосування запропонованої методики оцінювання залишкового ресурсу екологічно безпечної експлуатації нафтопроводів.

У результаті виконання теоретичних та експериментальних досліджень у дисертаційній роботі сформульовано й науково обґрунтовано нові положення, висновки та практичні рекомендації, спрямовані на зниження ризиків забруднення навколишнього середовища нафтопродуктами, що виникають унаслідок зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів. Запропоновано методичний підхід до оцінювання залишкового ресурсу їх експлуатації, застосування якого дозволяє підвищити надійність та екологічну безпеку трубопровідних систем.

У дисертаційній роботі запропоновано та обґрунтовано методики проведення досліджень, які передбачали застосування теоретичних та експериментальних методів, зокрема методів кореляційно-регресійного аналізу, математичного моделювання, гравіметричного методу та інших.

У роботі узагальнено сучасні підходи до дослідження корозійних процесів у сталевих нафтопроводах та встановлено, що їх розвиток визначається комплексною взаємодією електрохімічних, фізико-хімічних і біокорозійних чинників, пов'язаних з умовами експлуатації та характеристиками ґрунтового середовища. Доведено, що електрохімічна неоднорідність поверхні трубопроводів спричиняє утворення макрогальванічних елементів, які впливають на локальний розподіл корозійних струмів та інтенсивність

руйнування металу. Для опису цих процесів запропоновано підходи, що враховують як поперечний, так і повздовжній перерозподіл електрохімічних параметрів. Встановлено особливості перебігу корозії у зонах зварних з'єднань, де геометрична та структурна неоднорідність металу зумовлює зміну характеру розподілу струмів і підвищення локальної корозійної активності.

У дисертаційній роботі розроблено комплекс математичних моделей електрохімічної корозії магістральних нафтопроводів, які враховують особливості формування корозійних процесів у характерних зонах експлуатації трубопровідних систем. Зокрема, розроблено математичну модель електрохімічної корозії трубопроводу за умов утворення поперечних макрогальванічних пар, що дала змогу встановити закономірності розподілу корозійних струмів по периметру труби; математичну модель електрохімічної корозії за умов функціонування повздовжніх макрогальванічних пар з урахуванням просторової неоднорідності корозійного потенціалу та поляризаційних характеристик металу; а також математичну модель локальної електрохімічної корозії в зонах зварних з'єднань нафтопроводів, яка враховує геометричну та електрохімічну неоднорідність поверхні металу. Розроблені моделі дозволяють прогнозувати розподіл корозійних струмів, визначати найбільш небезпечні ділянки розвитку корозійних пошкоджень та підвищувати достовірність оцінювання технічного стану й залишкового ресурсу трубопровідних систем.

Запропоновано модель біокорозійних процесів на ділянках трубопроводів із пошкодженим ізоляційним покриттям, яка базується на визначенні параметрів електричного поля в системі «сталь – електроліт» та дозволяє оцінювати розподіл потенціалів і корозійних струмів у зоні дефекту. За результатами експериментальних досліджень підтверджено суттєвий вплив вологості ґрунту на швидкість розвитку корозійних процесів. Виявлено, що підвищення вологості сприяє активізації електрохімічної корозії через зменшення електричного опору середовища та інтенсифікацію масопереносу.

Визначено закономірності зміни швидкості біокорозії сталі в різних типах ґрунтів. Встановлено, що найбільш агресивними середовищами для експлуатації

сталевих нафтопроводів є зволожені органічні ґрунти, зокрема торф'яні, у яких спостерігаються максимальні корозійні втрати металу.

Отримані результати створюють наукове підґрунтя для прогнозування корозійного стану підземних трубопровідних систем, оцінювання залишкового ресурсу їх безпечної експлуатації та вдосконалення методів забезпечення екологічної безпеки магістральних нафтопроводів.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан наукових досліджень щодо забезпечення екологічної безпеки сталевих нафтопроводів та оцінювання їх залишкового ресурсу. Розглянуто роль трубопровідного транспорту у формуванні техногенного навантаження на довкілля, основні причини втрати герметичності нафтопроводів, особливості перебігу корозійних процесів, сучасні математичні моделі та методики оцінювання залишкового ресурсу трубопровідних систем. За результатами аналізу сформульовано наукову концепцію дослідження, визначено його мету, завдання та основні напрями.

У другому розділі наведено характеристику об'єктів дослідження, зокрема ґрунтів Полтавської області та нафтопровідної мережі України, обґрунтовано комплекс теоретичних і експериментальних методів дослідження. Описано методики визначення фізико-хімічних характеристик ґрунтів, швидкості біокорозії сталі, вмісту сульфатів, кислотності середовища, а також підходи до математичної обробки експериментальних даних і планування повного факторного експерименту.

У третьому розділі розроблено математичні моделі електрохімічної корозії сталевих нафтопроводів за умов дії поперечних і повздовжніх макрогальванічних пар, а також у зонах зварних з'єднань. Проведено експериментальні дослідження біокорозійної активності ґрунтів, визначено вплив фізико-хімічних властивостей ґрунтового середовища на швидкість корозійних процесів та запропоновано математичну модель біокорозії на ділянках трубопроводів із пошкодженим ізоляційним покриттям.

У четвертому розділі розроблено методику оцінювання залишкового ресурсу сталевих нафтопроводів з урахуванням комплексного впливу електрохімічної корозії, макрогальванічних процесів, особливостей корозії у

зонах зварних з'єднань та біокорозійних чинників. Запропоновано розрахункові залежності для визначення глибини корозійного ураження за умов сталого та періодичного впливу електролітичних розчинів, що дозволяють прогнозувати залишковий ресурс безпечної експлуатації трубопроводів і мінімізувати ризики забруднення довкілля.

У дисертаційній роботі запропоновано методика оцінювання залишкового ресурсу безпечної експлуатації нафтопроводів з урахуванням поперечного та повздовжнього перерозподілу електрохімічних параметрів, особливостей перебігу корозії у зонах зварних з'єднань та біокорозії, що унеможливило забруднення довкілля нафтопродуктами внаслідок процесів зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні науково обґрунтованих підходів і методичних рішень щодо запобігання забрудненню навколишнього середовища під час транспортування вуглеводнів нафтопроводами. Запропоновані у роботі методи та моделі враховують особливості перебігу процесів зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів, вплив електрохімічної неоднорідності, біокорозійних чинників та умов ґрунтового середовища. Їх застосування дозволяє підвищити достовірність оцінювання технічного стану нафтопроводів, прогнозувати розвиток корозійних пошкоджень, визначати залишковий ресурс безпечної експлуатації та своєчасно впроваджувати превентивні заходи запобігання розгерметизації нафтопроводу. Практична реалізація отриманих результатів сприятиме зниженню ризиків аварійних ситуацій, витоків нафтопродуктів і техногенного навантаження на довкілля, а також підвищенню рівня екологічної безпеки нафтопровідного транспорту.

**Ключові слова:** екологічна безпека, технології захисту навколишнього середовища, забруднення довкілля, транспортування вуглеводнів, магістральний нафтопровід, зовнішня корозія, електрохімічна корозія, біокорозія, макрогальванічні пари, математичне моделювання, залишковий ресурс, технічний стан трубопроводів, прогнозування, ґрунтове середовище, екологічна надійність.

## **ABSTRACT**

Stepovyi E.B. Development of theoretical foundations for preventing environmental pollution during the transportation of hydrocarbons. – Qualification scientific work in the form of a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 183 – Environmental Protection Technologies. – Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Poltava, 2026.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of developing theoretical foundations for preventing environmental pollution during the transportation of hydrocarbons by applying the proposed methodology for assessing the residual resource of environmentally safe operation of oil pipelines.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of developing theoretical foundations for preventing environmental pollution during the transportation of hydrocarbons by applying the proposed methodology for assessing the residual resource of environmentally safe operation of oil pipelines.

As a result of theoretical and experimental research in the dissertation, new provisions, conclusions and practical recommendations aimed at reducing the risks of environmental pollution by oil products arising from external corrosion of steel oil pipelines have been formulated and scientifically substantiated. A methodological approach to assessing the residual resource of their operation has been proposed, the application of which allows to increase the reliability and environmental safety of pipeline systems.

The dissertation proposes and substantiates research methods that involve the use of theoretical and experimental methods, in particular, methods of correlation-regression analysis, mathematical modeling, gravimetric method and others.

The paper summarizes modern approaches to the study of corrosion processes in steel oil pipelines and establishes that their development is determined by the complex interaction of electrochemical, physicochemical and biocorrosion factors associated with operating conditions and characteristics of the soil environment. It is proven that the electrochemical heterogeneity of the pipeline surface causes the formation of macrogalvanic elements that affect the local distribution of corrosion currents and the

intensity of metal destruction. To describe these processes, approaches are proposed that take into account both transverse and longitudinal redistribution of electrochemical parameters. The features of the corrosion process in the areas of welded joints are established, where the geometric and structural heterogeneity of the metal causes a change in the nature of the current distribution and an increase in local corrosion activity.

The dissertation work develops a set of mathematical models of electrochemical corrosion of main oil pipelines, which take into account the features of the formation of corrosion processes in characteristic areas of operation of pipeline systems. In particular, a mathematical model of electrochemical corrosion of a pipeline under the conditions of the formation of transverse macrogalvanic pairs has been developed, which made it possible to establish the patterns of distribution of corrosion currents along the perimeter of the pipe; a mathematical model of electrochemical corrosion under the conditions of the operation of longitudinal macrogalvanic pairs taking into account the spatial heterogeneity of the corrosion potential and polarization characteristics of the metal; as well as a mathematical model of local electrochemical corrosion in the areas of welded joints of oil pipelines, which takes into account the geometric and electrochemical heterogeneity of the metal surface. The developed models allow predicting the distribution of corrosion currents, determining the most dangerous areas for the development of corrosion damage, and increasing the reliability of assessing the technical condition and residual resource of pipeline systems.

A model of biocorrosion processes in sections of pipelines with damaged insulating coating is proposed, which is based on determining the parameters of the electric field in the "steel - electrolyte" system and allows assessing the distribution of potentials and corrosion currents in the defect zone. The results of experimental studies confirmed the significant influence of soil moisture on the rate of development of corrosion processes. It was found that an increase in humidity contributes to the activation of electrochemical corrosion by reducing the electrical resistance of the medium and intensification of mass transfer.

The patterns of changes in the rate of biocorrosion of steel in different types of soils were determined. It was established that the most aggressive environments for the

operation of steel oil pipelines are humidified organic soils, in particular peat soils, in which maximum corrosion losses of metal are observed.

The results obtained create a scientific basis for predicting the corrosion state of underground pipeline systems, assessing the residual resource of their safe operation and improving methods for ensuring the environmental safety of main oil pipelines.

The first section analyzes the current state of scientific research on ensuring the environmental safety of steel oil pipelines and assessing their residual resource. The role of pipeline transport in the formation of man-made environmental loads, the main causes of loss of tightness of oil pipelines, the features of the course of corrosion processes, modern mathematical models and methods for assessing the residual resource of pipeline systems are considered. Based on the results of the analysis, the scientific concept of the study is formulated, its goal, objectives and main directions are determined.

The second section provides a description of the research objects, in particular the soils of the Poltava region and the oil pipeline network of Ukraine, and justifies a set of theoretical and experimental research methods. Methods for determining the physicochemical characteristics of soils, the rate of steel biocorrosion, sulfate content, acidity of the environment are described, as well as approaches to mathematical processing of experimental data and planning of a full factorial experiment.

The third section develops mathematical models of electrochemical corrosion of steel oil pipelines under the action of transverse and longitudinal macrogalvanic pairs, as well as in the zones of welded joints. Experimental studies of the biocorrosion activity of soils have been carried out, the influence of the physicochemical properties of the soil environment on the rate of corrosion processes has been determined, and a mathematical model of biocorrosion on sections of pipelines with damaged insulating coatings has been proposed.

In the fourth section, a methodology for assessing the residual resource of steel oil pipelines is developed, taking into account the complex influence of electrochemical corrosion, macrogalvanic processes, corrosion features in welded joint zones, and biocorrosion factors. Calculation dependencies are proposed for determining the depth of corrosion damage under conditions of constant and periodic

exposure to electrolytic solutions, which allow predicting the residual resource of safe operation of pipelines and minimizing the risks of environmental pollution.

The dissertation proposes a methodology for assessing the residual resource of safe operation of oil pipelines, taking into account the transverse and longitudinal redistribution of electrochemical parameters, the features of the course of corrosion in the zones of welded joints and biocorrosion, which makes it impossible to pollute the environment with oil products as a result of the processes of external corrosion of steel oil pipelines.

The practical significance of the results obtained lies in the development of scientifically sound approaches and methodological solutions to prevent environmental pollution during the transportation of hydrocarbons by oil pipelines. The methods and models proposed in the work take into account the features of the course of the processes of external corrosion of steel oil pipelines, the influence of electrochemical heterogeneity, biocorrosion factors and soil environment conditions. Their application allows to increase the reliability of assessing the technical condition of oil pipelines, predict the development of corrosion damage, determine the residual resource of safe operation and timely implement preventive measures to prevent depressurization of the oil pipeline. The practical implementation of the results obtained will contribute to reducing the risks of emergencies, oil product leaks and man-made environmental pollution, as well as increasing the level of environmental safety of oil pipeline transport.

**Keywords:** environmental safety, environmental protection technologies, environmental pollution, hydrocarbon transportation, main oil pipeline, external corrosion, electrochemical corrosion, biocorrosion, macrogalvanic pairs, mathematical modeling, residual resource, technical condition of pipelines, forecasting, soil environment, ecological reliability.