

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Потопальська Ксенія Євгенівна

УДК 539.43:621.64

ДИСЕРТАЦІЯ
ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З
ЛОКАЛЬНИМИ КОРОЗІЙНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ НА ОСНОВІ
СТАТИСТИЧНОЇ ОЦІНКИ СТАТИЧНОЇ ТА ЦИКЛІЧНОЇ МІЦНОСТІ

05.02.09 – динаміка та міцність машин

13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Потопальська К.Є.

Науковий керівник

Ларін Олексій Олександрович

доктор технічних наук, доцент

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Потопальська К.Є. Прогнозування надійності елементів конструкцій з локальними корозійними пошкодженнями на основі статистичної оцінки статичної та циклічної міцності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин (13 – механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти та науки Харків, 2019.

Актуальність. Машинобудівні конструкції, що застосовуються в енергетиці, працюють в умовах інтенсивних циклічних навантажень та дії агресивних зовнішніх або робочих середовищ. Тривала експлуатація конструкцій у таких умовах призводить до корозійного зношення або формування об'ємних дефектів на робочих поверхнях, стоншення стінок корпусних деталей тощо. Це призводить до появи зон додаткової набутої локалізації напружено-деформованого стану (НДС) у елементах конструкцій, що здатні суттєво відрізнятись від проектних значень, та разом із циклічним характером навантаження призводить до інтенсивного накопичення втоми матеріалу і викликає відмову. Несвоєчасне їх виявлення може стати причиною виникнення аварійних ситуацій, екологічних катастроф, завдати суттєвих споживчих збитків. Прогнозування показників надійності елементів таких конструкцій є актуальною проблемою, вирішення якої дає можливість попередити їх раптові відмови, спланувати ремонтні роботи, оцінити експлуатаційні ризики тощо.

Метою дослідження є розробка розрахункових підходів до прогнозування надійності та оцінки залишкового ресурсу елементів конструкцій, що використовуються в транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні, та які мають набути пошкодження корозійної природи на

основі статистичної оцінки концентрації напружено-деформованого стану і процесів накопичення втоми.

При розв'язанні сформульованих на основі вказаної мети завдань було удосконалено підхід до оцінки надійності елементів конструкцій, які використовуються в транспортуванні енергоносіїв та енергетичному машинобудуванні з корозійно пошкодженими ділянками, які дозволяють спрогнозувати можливий розвиток корозійних пошкоджень процеси накопичення втоми, що мають наступну **наукову новизну**:

Отримані нові закономірності, щодо впливу об'ємних дефектів корозійної природи на концентрацію напружень в елементах конструкцій, які використовуються при транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні за різних параметрів цих дефектів на криволінійних ділянках конструкцій;

1. **Вперше** отримані статистичні оцінки щодо можливої варіації концентрації напружень в елементах конструкцій, які використовуються при транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні в умовах прогнозу можливого стохастичного розвитку корозії у часі та з урахуванням експлуатаційної варіації циклічного навантаження.

2. Знайшли подальший розвиток статистичні моделі та методи оцінки процесу розвитку пошкоджуваності при багато- та мало-цикловій втомі, що на відміну від існуючих моделей враховують випадкову зміну параметрів НДС в часі, яка викликана формуванням концентрації напружень навколо об'ємних поверхневих дефектів.

3. **Вперше** встановлено закономірності впливу наявності корозійних дефектів різного ступеня розвитку на прогноз надійності залишкового ресурсу елементів конструкцій на основі удосконалених статистичних моделей оцінки процесу накопичення втомних пошкоджень.

З використанням розробленого підходу до прогнозування надійності елементів конструкцій були вирішені наступні **практичні задачі**:

1. Визначено параметри пошкоджуваності та кількість циклів до відмови коліна трубопроводу з тривимірним поверхневим дефектом середніх розмірів з урахуванням експлуатаційної варіації навантаження, які мають значення в межах від 1 до 50 циклів (до 1,5 років) при максимально можливому навантаженні та від 70 до 470 циклів (від 2 до 10 років) при мінімальному навантаженні у трубопроводі з дефектом середніх розмірів, А у випадку дефекту, що стохастично розвивається кількість циклів до відмови складає від 42 до 700 (від 14 місяців до 20 років) при максимально можливому навантаженні.

2. Досліджено вплив композиційного бандажу на ресурс трубопроводу з дефектом середніх розмірів. Проведені розрахунки для визначення раціональних розмірів композиційного бандажу для криволінійної частини трубопроводу з дефектом із середніми розмірами. Визначено значення внутрішнього тиску, при якому еквівалентні напруження досягають границі міцності у трубопроводі з бандажем різної товщини (від 25 мм до 175 мм). Встановлено, що при наявності бандажу 75 мм при глибині дефекту менше ніж 40 % від товщини трубопроводу еквівалентні напруження зменшуються на 10 % та при максимально можливому навантаженні не виникають пластичні деформації. У випадку глибини дефекту більше ніж 40 % від товщини трубопроводу у трубопроводі еквівалентні напруження зменшуються від 25% до 50% при різних розмірах дефекту відповідно та дорівнюють границі плинності Кількість циклів до відмови при використанні композиційного бандажу збільшилась у 100 разів, що робить можливою подальшу експлуатацію трубопроводу.

3. Проведено оцінку залишкової міцності насоса, який використовується в енергетичному машинобудуванні з урахуванням зменшення товщини стінок корпусних деталей від ерозійно-корозійного зносу. Визначено НДС конструкції при стоншенні стінок корпусу від 10% до 30%, яке можливо при тривалій експлуатації. Отримані значення кількості циклів до відмови при урахуванні накопичення втомних пошкоджень та впливу експлуатаційного зносу конструкції.

Об'єктом дослідження є процеси накопичення нелокалізованої втомної пошкоджуваності, а також вплив наявності та розвитку у часі локалізованих корозійних дефектів на міцність та надійність елементів конструкцій, які використовуються при транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні.

Предмет дослідження – показники надійності, а також ймовірнісні характеристики параметрів НДС та втомної пошкоджуваності, які накопичуються в елементах конструкцій, що досліджуються, з урахуванням наявності та прогнозу стохастичного розвитку корозійних дефектів в них.

Основна частина дисертації включає Вступ, Розділ 1 – «Аналіз сучасних підходів до вирішення задач надійності елементів конструкцій з набутими пошкодженнями», Розділ 2 – «Теоретичні основи моделювання елементів конструкцій з дефектами корозійного типу», Розділ 3 – «Ймовірнісне оцінювання міцності та надійності трубопроводів із корозійними дефектами та прогноз їх залишкового ресурсу», Розділ 4 – «Аналіз можливості підвищення надійності конструкції шляхом використання композитних ремонтних накладок», Розділ 5 – «Оцінка залишкового ресурсу корпусних елементів насосів енергетичної системи» та Висновки, а також містить 72 рисунки та 18 таблиць.

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **Розділі 1** представлено аналіз робіт, які спрямовані на прогнозування надійності елементів конструкцій у машинобудуванні, здійснено аналіз науково-технічної літератури щодо дослідження корозійно пошкоджених елементів конструкцій, що використовуються в транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні. Виділено основні методи для визначення залишкового ресурсу конструкцій, які використовуються в транспортуванні енергоносіїв та енергетичному машинобудуванні та мають набуті в експлуатації дефекти. Проаналізовано підходи до оцінки накопичення втомної пошкоджуваності.

У **Розділі 2** представлено теоретичні основи розв'язання задачі статистичної оцінки елементів конструкцій із пошкодженнями, зокрема, оцінка прогнозованих габаритних розмірів дефектів при статистичному моделюванні та визначено методологію дослідження. Наведено вирішення задачі пружно-пластичного деформування з кінематичним зміцненням при кусково-лінійній діаграмі деформування. Визначено залежності кінетики росту розмірів корозійного дефекту у трьох напрямках у часі, а також, що його габаритні розміри у фіксований момент часу, випадкові та підпорядковуються лог-нормальному закону розподілення. В рамках континуальної механіки пошкоджуваності удосконалені методи оцінки надійності та прогнозу залишкового ресурсу пошкоджених ділянок елементів конструкцій.

У **Розділі 3** розроблено параметричні математичні моделі визначення напружено-деформованого стану криволінійної частини трубопроводу за наявності тривимірного поверхневого дефекту корозійного характеру. Здійснено дослідження особливостей формування концентрації напружень в пошкоджених ділянках елементів конструкцій із урахуванням експлуатаційної варіації навантаження та стохастичного характеру розвитку корозійного пошкодження. З використанням розробленого підходу до прогнозування надійності елементів конструкцій визначено параметри пошкоджуваності та кількість циклів до відмови коліна трубопроводу з тривимірним поверхневим дефектом, що розвивається у часі із урахуванням експлуатаційної варіації навантаження.

У **Розділі 4** досліджено вплив композиційного бандажу на ресурс трубопроводу з дефектом. Для визначення раціональних розмірів композиційного бандажу проведено розрахунки криволінійної частини трубопроводу з дефектом з розмірами, які були отримані під час діагностики трубопроводу, що знаходиться в експлуатації. Здійснені розрахунки для визначення раціональних розмірів композиційного бандажу для криволінійної частини трубопроводу з дефектом із середніми розмірами. Відповідно до розробленої математичної моделі накопичення втомних пошкоджень визначено

кількість циклів до відмови при використанні композиційного бандажу на криволінійній частині трубопроводу з дефектом середніх розмірів.

У **Розділі 5** здійснено оцінку залишкової міцності насоса, який використовується в енергетичному машинобудуванні з урахуванням зменшення товщини стінок корпусних деталей від ерозійно-корозійного зносу. На основі розробленої математичної моделі накопичення втомних пошкоджень та з використання отриманих результатів об НДС конструкції визначено параметр пошкоджуваності для усіх можливих рівнів стоншення стінки конструкції. Проведено дослідження щодо оцінки надійності даних конструкцій з урахуванням ерозійно-корозійного зносу.

У **Висновках** зазначено науково-практичні задачі, що були розв'язані в роботі, викладені найбільш важливі наукові та практичні результати, надані рекомендації щодо впровадження результатів дослідження.

Ключові слова

Надійність, залишковий ресурс, континуальна пошкоджуваність, втома, корозійні дефекти, магістральні трубопроводи, відцентрові насоси.

Список публікацій здобувача

1. Потопальська К. Є. Огляд сучасних моделей розвитку корозійних пошкоджень та напрямів дослідження їх впливу на міцність і надійність елементів трубопровідних систем. *Вісник НТУ “ХПІ” Динаміка та міцність машин*. 2016. № 46. С. 60–66.

2. Ларін О. О., Потопальська К. Є. Оцінка залишкової міцності криволінійної ділянки трубопроводу зі статистично заданим корозійним дефектом, що розвивається у часі. *Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”*. 2017. №60. С. 137–146.

3. Потопальська К.Є. Ларін О. О. Оцінка залишкової міцності криволінійної ділянки трубопроводу з корозійним об’ємним дефектом, що розвивається. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2017. № 3(53). С. 12–19.

4. Потопальська К. Є., Ларін О. О. Оцінка надійності та прогнозування ресурсу елементів трубопроводу з урахуванням процесів накопичення втоми та розвитку корозії. *Вісник Хмельницького національного університету: наук. журн.* 2019. №1. С. 46 – 52.

5. Larin O., Potopalska K., Mygushchenko R. Statistical estimation of residual strength and reliability of corroded pipeline elbow part based on a direct FE-simulations. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics.* 2018. № 1. P. 80–95.

6. Потопальская К.Е., Ларин А. А., Келин А. А., Нарыжная Р. Н., Трубаев А.И. Анализ прочности насоса с целью продления его ресурса. *Ядерна та радіаційна безпека.* 2018. № 3. С. 30–35.

7. Larin O., Potopalska K., Mygushchenko R. Reliability of the Rubber Tube of Automotive Hydraulic Braking System Under Fatigue Failures Considering Random Variation of Load and the Process of Aging of Material. *Journal of Solid Mechanics.* 2019. № 2. P. 361–374.

8. Larin O., Potopalska K. E. An estimation of the residual reliability of the pipeline elbow with VSD: *Innvative solutions in repair of gas and oil pipelines,* С. 214–227.

9. Mirchev Y., Larin O. O., Potopalska K. E. Investigation of influence of the repair bandage on the stress-strain state of the pipeline elbow with VSD. „*NDT days 2016*”/ „*Дни на безразрушителния контрол 2016*”. 2016. № 1(187). P. 411–414.

10. Потопальська К. Е. Скінчено-елементний аналіз впливу корозійного дефекту еліпсоїдної форми, що розположений на криволінійній частині труби на її напружено-деформований стан. *Современные проблемы естественных наук – Тараповские чтения, м. Харків, 10-22 березня 2016 р., Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2016. Ч. 1, С. 63..*

11. Потопальська К. Е. Моделювання корозійного дефекту прямокутної форми на коліні магістрального трубопроводу. Інформаційні техноло- 21 гії: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції у 4-х частинах, м. Харків, 18-20 травня 2016 р.

Харків: НТУ «ХП», 2016. Ч. 1, С. 64.

12. Потопальська К. Є., Ларін О. О. Оцінка залишкової міцності криволінійної ділянки трубопроводу з корозійним об'ємним дефектом, що розвивається. Актуальні проблеми інженерної механіки; тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса, 16-19 травня 2017 р. Одеса: ОДАБА, 2017. С. 226–227.

13. Потопальська К. Є., Ларін О. О. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводів із зовнішнім корозійним дефектом при відмовах внаслідок втоми. Сучасні проблеми механіки та математики: тези доповідей міжнародної конференції у 3-х томах, м. Львів, 22-25 травня 2018 р. Львів: ІППИМ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2018. Т. 2, С. 230–231.

14. Потопальська К. Є., Ларін О. О. Статистична оцінка залишкової міцності та надійності корозійно пошкодженого трубопроводу: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018 у 4-х частинах, м. Харків, 16- 18 травня 2018 р. Харків: НТУ «ХП», 2018. С. 55.

15. Ларін О. О., Потопальська К. Є. Оцінка залишкового ресурсу коліна трубопроводу з пошкодженням корозійної природи при відмовах, що викликані втомою: Матеріали XIX-МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Київ, 19-22 червня 2018 р., Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. Ч. 2, С. 85-86.

ANNOTATION

Potopalska K.E. Predicting the reliability of structural elements with local corrosion damage based on the statistical evaluation of static and cyclic strength. - Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in specialty 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines (13 – Mechanical Engineering). – National Technical University, «Kharkiv Politechnical Institute», 2019.

Machine-building structures used in power engineering are worked under conditions of intense cyclic loading and the action of aggressive external or working environments. Long-term using of structures in such conditions is led to corrosion or formation of volumetric defects on working surfaces, thinning of the walls of hull parts and other. It can have led to the appearance of additional zones of localization of deformed state in structural elements that can be differ significantly from the design values, and together with the cyclic nature of the load can led to an intensive accumulation of fatigue of the material and failure. Untimely detection of that defects caused of emergencies, environmental disasters, and cause significant consumer losses. Predicting the reliability of elements of such structurals is an urgent problem whose solution makes it possible to prevent them from sudden failures, to plan repair work, to evaluate operational risks, and so on.

The aim of the work is to develop computational approaches to predicting the reliability and estimation of the residual life of structural elements used in energy transportation and power engineering, which have acquired corrosive nature defects based on a statistical evaluation of the stress-strain concentration and fatigue accumulation processes.

For solving the tasks formulated on the basis of the stated aim, the approaches to the estimation of the reliability of structural elements used in transportation of energy carriers and power engineering with corrosion-damaged areas has been improved, which are allowed to predict the possible development of corrosion damages and the processes of accumulation of fatigue, which have the follow scientific novelty:

1. New regularities have been obtained concerning the effect of volumetric defects of corrosive nature on the concentration of stresses in structural elements used in the transport of energy carriers and in power engineering under different parameters of these defects in curvilinear sections of structures.

2. For the first time, statistical estimate has been obtained regarding the possible variation of stress concentration in structural elements used in energy transportation and in power engineering in the conditions of forecast of possible stochastic development of corrosion in time and taking into account operational variation of cyclic loading.

3. The statistical models and methods of estimating the process of development of damage in multi- and small-cycle fatigue have been developed, which, unlike the existing models, are taken into account the random change of the deformed state parameters over time, which is caused by the formation of stress concentrations around volumetric surface defects.

4. For the first time have been established the regularities of the influence of corrosion defects of various degrees of development on the prediction of the reliability of the residual life of structural elements based on the improved statistical models of the estimation of the process of fatigue damage accumulation.

Using the developed approach to predict the reliability of structural elements, the following practical problems were solved:

1. The parameters of damage and the number of cycles to failure of the elbow of the pipeline with three-dimensional surface defect of the average sizes were defined, with taking into account operational variation of load, which have values in the range from 1 to 50 cycles (up to 1.5 years) at the maximum possible load and from 70 to 470 cycles (2 to 10 years) at minimum load in the pipeline with a defect of medium size, And in the case of a defect stochastically developing number of cycles to failure is from 42 to 700 (from 14 months to 20 years) at the maximum possible load.

2. The effect of composite bandage on the mean-sized pipeline resource was investigated. Calculations have been made for determine the rational dimensions of the composite bandage for the curved portion pipeline with the mean-sized defect. The

value of the internal pressure at which equivalent stresses reach the strength limits in the pipeline with a bandage of different thickness (from 25 mm to 175 mm) was determined. It is established that in the presence of a 75 mm bandage with a defect depth of less than 40% of the thickness of the pipeline, the equivalent stresses are reduced by 10% and plastic deformation does not occur at the maximum load. In the case of a defect depth is greater than 40% of the pipeline thickness in the pipeline, the equivalent stresses are reduced from 25% to 50% at different defect sizes, respectively, and equal to the yield strength. The number of cycles to failure when using a composite bandage has increased 100 times, which is making possible for the pipeline to be operated further.

3. Estimation of the residual strength of the pump used in power engineering has been made, taking into account the reduction of the wall thickness of the body parts in consequence from erosion-corrosion wear. The design deformed state was determined when the walls of the housing are thinned from 10% to 30%, which is possible for long-term operation. The values of the number of cycles to failure were obtained with taking into account the accumulation of fatigue damage and the impact of operational wear of the structure.

The object of the study is the processes of accumulation of non-localized fatigue damage, as well as the influence of the presence of localized corrosion defects which is development over time on the strength and reliability of structural elements used in energy transportation and in power engineering.

The subject of the study is the reliability indicators, as well as the probabilistic characteristics of the parameters of the deformed state and fatigue damage, which are accumulated in the elements of the investigated structures, taking into account the presence and prediction of stochastic development of corrosion defects in it.

The main part of the dissertation includes Introduction, Section 1 – «Analysis of modern approaches to solving the problems of reliability of structural elements with acquired damage», Section 2 – «Theoretical bases of modeling elements of structures with corrosion defects», Section 3 – «Probability assessment of strength and reliability of pipeline with corrosion defects and the prediction of their residual life-time» ,

Section 4 – «Analysis of the possibility of improving the reliability of the structure by using composite bandage», Section 5 – «Assessment of the residual life-time of the housing elements of pumps of the energy system» and Conclusions, and also contains 74 figures and 18 tables.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates its aim and objectives, defines the object, subject and methods of research, scientific novelty and practical significance of the work.

Section 1 is presented the analysis of works aimed at predicting the reliability of structural elements in mechanical engineering, the analysis of scientific and technical literature on the study of corrosion-damaged structural elements used in energy transportation and in power engineering. The main methods for determining the residual life-time of structures used in energy transportation and power engineering and which have acquired defects were identified. Approaches to the estimation of fatigue accumulation were analyzed.

Section 2 is presented the theoretical foundations for solving the problem of statistical estimation of structural elements with defects, in particular, the estimation of the predicted overall defect sizes in statistical modeling, and a research methodology is defined. The solution of the problem of elastic-plastic deformation with kinematic hardening at a multi-linear deformation diagram is presented. The dependences of the kinetics of growth of the corrosion defect sizes in three directions in time are determined, and also that its overall dimensions at a fixed moment of time are random and obey the log-normal distribution law. Within the framework of continuous damage mechanics, methods of reliability estimation and prediction of residual life-time of damaged sections of structural elements have been improved.

In Section 3 the parametric mathematical models for determining the stress-strain state of the curved part of the pipeline in the presence of a three-dimensional surface defect of corrosive character are developed. The peculiarities of stress concentration formation in the damaged parts of structural elements were studied, taking into account the operational variation of the load and the stochastic nature of the development of corrosion defect. Using the developed approach to predicting the

reliability of structural elements, the parameters of damage and the number of cycles to failure of the pipeline elbow with volumetric defect, which develops over time with taking into account the operational variation of the load, were determined.

Section 4 is investigated the effect of composite bandage on a life-time of pipeline with defect. In order to determine the rational dimensions of the composite bandage, calculations of the curved part of the pipeline with defect with the dimensions obtained during the diagnostics of the pipeline in operation were performed. Calculations were made to determine the rational dimensions of the composite bandage for the curved portion of the mean-sized defect pipeline. According to the developed mathematical model of accumulation of fatigue damage, the number of cycles to failure using a composite bandage on a curved part of a pipeline with a defect of medium size was determined.

Section 5 is assessed the residual strength of the pump used in power engineering with taking into account the reduction of the wall thickness of the body parts from erosion-corrosion wear. On the basis of the developed mathematical model of accumulation of fatigue damage and using the results obtained on the deformed state of the structure, the parameter of damage for all possible levels of thinning of the wall of the pump was determined. Research to evaluation the reliability of these structures, taking into account erosion-corrosion wear has been carried out.

The conclusions are summared the scientific and practical problems that have been solved in the paper, outlined the most important scientific and practical results, and provided recommendations for the implementation of the research results.

Keywords

Reliability, residual life, continual damage, fatigue, corrosion defects, main pipelines, centrifugal pumps.

Publications:

1. Potopalska, K. Ye. Review of modern models of development of corrosion damage and research tendency of their influence to strength and reliability of elements

of pipeline systems. *Visnyk NTU "KhPI" Dynamika ta mitsnist mashyn.* 2016. №. 46. C. 60–66.

2. Larin, O. O., Potopalska, K. Ye. The reliability prediction of pipeline elbow based on a statistical corrosion defect which is developing in time. *Mizhvuzivskiyi zbirnyk "Naukovi notatky"*. 2017. №60. C. 137–146.

3. Potopalska K. Ye., Larin, O. O. Estimation of residual strength of pipeline's elbow with volumetric corrosion defect which is developing. *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu.* 2017. № 3(53). S. 12–19.

4. Potopalska, K. Ye., Larin, O. O. Evaluation and forecasting of resource elements of the pipeline taking into account the processes of accumulation of fatigue and corrosion development. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu : nauk. zhurn.* 2019. №1. C. 46 – 52.

5. Larin, O., Potopalska, K., Mygushchenko, R. Statistical estimation of residual strength and reliability of corroded pipeline elbow part based on a direct FE-simulations. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics.* 2018. № 1. P. 80–95.

6. Potopal'skaya K.E., Larin A. A., Kelin A. A., Nary`zhnaya R. N., Trubaev A.I. Analysis of the Pump Strength to Extend its Lifetime. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka.* 2018. № 3. C. 30–35.

7. Larin, O., Potopalska, K., Mygushchenko, R. Reliability of the Rubber Tube of Automotive Hydraulic Braking System Under Fatigue Failures Considering Random Variation of Load and the Process of Aging of Material. *Journal of Solid Mechanics.* 2019. № 2. P. 361–374.

8. Larin, O., Potopalska, K. E. An estimation of the residual reliability of the pipeline elbow with VSD: *Innvative solutions in repair of gas and oil pipelines,* C. 214–227.

9. Mirchev, Y., Larin, O. O., Potopalska, K. E. Investigation of influence of the repair bandage on the stress-strain state of the pipeline elbow with VSD. „*NDT days 2016*”/ „*Dni na bezrazrushitelniya kontrol 2016*”. 2016. № 1(187). P. 411–414.

10. Potopalska, K. E. Skincheno-elementnyi analiz vplyvu koroziinoho defektu

elipsoidnoi formy, shcho rozpolozhenyi na kryvoliniinii chastyni truby na yii napruzhenno-deformovanyi stan: «Sovremenny`e problemy` estestvenny`kh nauk – Tarapovskie chteniya», Kharkiv , 16. C. 63.

11. Potopalska, K. E. Modeliuvannia koroziiinoho defektu priamokutnoi formy na kolini mahistralnogo truboprovodu: Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia, Kharkiv , 16. C. 65.

12. Larin, O. O., Potopalska, K. Ye. Otsinka zalyshkovoii mitsnosti kryvoliniinoi dilianky truboprovodu z koroziiinym obiemnym defektom, shcho rozvyvaietsia: Aktualni problemy inzhenernoi mekhaniky; tezy dopovidei IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Odesa , 17. C. 226–227.

13. Potopalska, K. Ye., Larin, O. O. Otsinka zalyshkovoho resursu truboprovodiv iz zovnishnim koroziiinym defektom pry vidmovakh vnaslidok vtomy: Mizhnarodna naukova konferentsiia «Cuchasni problemy mekhaniky ta matematyky», Lviv , 18. C. 230–231.

14. Potopalska, K. Ye., Larin, O. O. Statystychna otsinka zalyshkovoii mitsnosti ta nadiinosti koroziiino poshkodzhеноho truboprovodu: XXVI Mezhdunarodnaia nauchno-praktycheskaia konferentsiia «Ynformatsionnye tekhnolohyy: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, obrazovanye, zdorove» (MicroCAD-2018), 18. C. 55.

15. Larin, O. O., Potopalska, K. Ye. Otsinka zalyshkovoho resursu kolina truboprovodu z poshkodzhenniam koroziiinoi pryrody pry vidmovakh, shcho vyklykani vtomoiu: «Prohresyvna tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita», Kyiv , 18. C. 85–86.

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З НАБУТИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ	8
1.1 Сучасний стан питань прогнозування надійності	
1.2 Аналіз існуючих моделей розвитку корозії	15
1.2.1 Моделювання розвитку корозійних процесів	15
1.2.2 Моделювання корозійних дефектів та їх вплив на міцність конструкцій	18
1.3 Аналіз існуючих моделей накопичення втомних пошкоджень та оцінки ресурсу при поступових відмовах	22
1.4 Особливості експлуатації елементів конструкції, що використовуються в транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні	8
1.4.1 Класифікація та особливості конструкцій	9
1.4.2 Умови експлуатації, види навантаження	11
1.4.3 Типові експлуатаційні пошкодження та причини їх виникнення	12
1.4.4 Огляд стану компонентів енергетичних станцій	
1.5 Висновки до розділу та постановка задачі	28
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ДЕФЕКТАМИ КОРОЗІЙНОГО ТИПУ	30
2.1 Постановка задачі оцінки надійності конструкцій з об'ємним дефектом	30
2.2 Математична постановка задачі визначення НДС елементів конструкції з дефектами	32
2.3 Математичне моделювання корозійного дефекту	39
2.4 Математичне моделювання пошкоджуваності при відмовах, що викликані накопиченням багато- або малоциклової втоми	
2.5 Висновки до розділу	

РОЗДІЛ 3. ІМОВІРНІСНЕ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ТРУБОПРОВОДІВ ІЗ КОРОЗІЙНИМИ ДЕФЕКТАМИ ТА ПРОГНОЗ ЇХ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ

3.1	Побудова SE-моделей елементів конструкцій з пошкодженнями	44
3.1.1	Побудова геометричної моделі коліна трубопроводу	39
3.1.2	Побудова SE-моделей елементів конструкцій з пошкодженнями	42
3.1.3	Створення SE-сітки	43
3.2	Аналіз міцності конструкцій з типовими пошкодженнями	75
3.3	Аналіз втомних пошкоджень трубопроводу при корозійних дефектах типового розміру часі	2.5
3.4	Статистичне оцінювання можливої варіації НДС елементів конструкції з корозійним дефектом, що стохастично змінюється у часі	82
3.5	Статистичний аналіз втомних пошкоджень трубопроводу при корозійних пошкодженнях	86
3.6	Аналізу надійності пошкоджених елементів конструкції з дефектом, що стохастично розвивається у часі	
3.7	Висновки до розділу	
	РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИТНИХ РЕМОНТНИХ НАКЛАДОК	89
4.1	Аналіз ступеню відновлення міцності пошкоджених елементів конструкції	89
4.2	Аналіз міцності конструкцій з типовими пошкодженнями з урахуванням впливу композиційного бандажу	95
4.3	Оцінювання надійності пошкодженого елемента конструкції після ремонту композиційним бандажем	100
4.4	Висновки до розділу	

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ КОРПУСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НАСОСІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ	104
5.1 Аналіз залишкової міцності корпусу насоса з урахуванням його стоншення під час експлуатації	104
5.1.1 Побудова розрахункової моделі насоса	104
5.1.2. Аналіз статичної міцності	109
5.2 Аналіз втомної міцності та залишкового ресурсу насоса з урахуванням його стоншення під час експлуатації	116
5.3 Висновки до розділу	
ВИСНОВКИ	124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	127
ДОДАТКИ	