Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0826U002555

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 15-06-2026

Статус: Наказ про видачу диплома

Реквізити наказу МОН / наказу закладу: №1046 СТ від 10 серпня 2026 р.

II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Фоменко Наталія Олександрівна
2. Nataliia O. Fomenko

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-0781-6806

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 113

Назва наукової спеціальності: Прикладна математика

Галузь / галузі знань: математика та статистика

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: 113 Прикладна математика

Дата захисту: 20-07-2026

Спеціальність за освітою: 113 Прикладна математика

Місце роботи здобувача: Організація відсутня

Код за ЄДРПОУ: 00000000

Місцезнаходження: ------, Київ, 00000, Україна

Форма власності: Змішана

Сфера управління:

Ідентифікатор ROR:

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): PhD 14574

Повне найменування юридичної особи: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02071180

Місцезнаходження: вул. Кирпичова, Харків, Харківський р-н., 61002, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02071180

Місцезнаходження: вул. Кирпичова, Харків, Харківський р-н., 61002, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 27.35.31, 27.35.43, 28.23.25, 30.19

Тема дисертації:

1. Символьна регресія та феноменологічні моделі в обчислювальному моделюванні гіперв'язкопружної поведінки полімерних і біологічних матеріалів

2. Symbolic regression and phenomenological models in computational modeling of hyperviscoelastic behavior of polymeric and biological materials

Реферат/анотація:

1. Фоменко Н. О. Символьна регресія та феноменологічні моделі в обчислювальному моделюванні гіперв'язкопружної поведінки полімерних і біологічних матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 113 – Прикладна математика. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Україна, Харків, 2026. Об'єкт дослідження – процеси в'язкопружного та гіперпружного деформування артеріальних стінок (з урахуванням патологій) та синтетичних еластомерів при складному механічному навантаженні. Предмет дослідження – НДС судин та TPU-зразків в умовах гіперв'язкопружного, циклічного, релаксаційного деформування; математичні вирази для потенціалу енергії пружного деформування та

параметри функції релаксації, що визначаються методом символьної регресії (СР) з урахуванням фізично-інформованих обмежень. Методи дослідження. Базуються на фундаментальних підходах механіки суцільного середовища, зокрема теорії пружності та в'язкопружності. Для моделювання НДС стінок судини людини, ураженої атеросклеротичною бляшкою, було використано МСЕ в постановці плоскої деформації. Для розв'язання визначального рівняння (інтеграла згортки) у часовій області реалізовано рекурентну схему інтегрування. Також були використані методи машинного навчання: метод СР, глибокої символьної оптимізації. Для отримання даних та валідації моделей проведено серію натурних експериментів на універсальній випробувальній машині ZwickRoell Z010. Експерим. дослідження було проведене на кафедрі механіки суцільного середовища RWTH Aachen. У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, методи дослідження, наукову новизну та практичне значення роботи. У першому розділі здійснено критичний аналіз сучасних підходів до моделювання в'язкопружної поведінки матеріалів та біомеханіки кровоносних судин. Розглянуто існуючі засоби машинного навчання для ідентифікації властивостей середовищ та обґрунтовано необхідність розробки нових обчислювальних методів. У другому розділі викладено теоретичні основи моделювання: кінематику великих деформацій, рівняння рівноваги, базові феноменологічні моделі в'язкопружності, варіаційне формулювання нелінійного МСЕ, алгоритми лінеаризації за методом Ньютона–Рафсона та засади СР. У третьому розділі представлено результати експериментального визначення в'язкопружних властивостей зразків із термополіуретану (TPU), виготовлених методом 3D-друку. Описано процедури монотонних, релаксаційних та циклічних випробувань на обладнанні ZwickRoell Z010 та наведено результати статистичного аналізу відтворюваності властивостей 3D-друкованих структур. У четвертому розділі наведено результати застосування ML-підходу на основі модифікованого алгоритму глибокої символьної оптимізації (DSO). Продемонстровано ефективність використання фізично-інформованої СР для автоматизованого синтезу конститутивних рівнянь нелінійної гіпереластичності та в'язкопружної поведінки безпосередньо з експериментальних даних. У п'ятому розділі досліджено вплив морфології атеросклеротичної бляшки на біомеханічну відповідь артеріальної стінки. Оцінено зміни НДС та параметрів петлі гістерезису під дією пульсового навантаження. За результатами дослідження отримано такі наукові результати: 1. Набуло розвитку застосування методів машинного навчання для задачі в'язкопружної поведінки гіперпружних матеріалів, що вбудовує в архітектуру її прогностичної моделі явним чином пошук потенціалу пружного деформування та функції релаксації, які на відміну від традиційних феноменологічних і керованих даними підходів, забезпечує автоматичне задоволення основних кінематичних співвідношення нелінійної механіки суцільного середовища. 2. Встановлено нові закономірності формування деформованого стану стінок судин людини, пошкоджених атеросклеротичною ліпідною бляшкою в залежності від її розмірів. 3. Вперше отримані особливості циклічного деформування стінок судин, уражених атеросклеротичною ліпідною бляшкою залежно від циклів пульсової хвилі, характерних для різних фізіологічних станів людини. Практичне значення отриманих результатів. Розроблені алгоритми, програми та макроси дозволяють формувати науково обґрунтовані рекомендації для прикладних задач. Застосування фізично-інформованої СР забезпечує автоматизований опис складної механічної поведінки гіперв'язкопружних матеріалів, що є критичним для розвитку сучасного матеріалознавства, адитивних технологій та біомеханіки. Розроблені макроси дозволяють будувати пацієнт-специфічні геометричні моделі для оцінювання стабільності атеросклеротичних бляшок у клінічній медицині. Ключові слова: математичне моделювання, метод скінченних елементів (МСЕ), в'язкопружність, гіперпружність, символьна регресія, чисельний аналіз, напружено-деформований стан, крива напруження-деформація, 3D друк, TPU-полімери, адитивні технології (FDM/FFF), розсіювання енергії, атеросклеротична бляшка, біологічні тканини.

2. Fomenko N. O. Symbolic regression and phenomenological models in computational modeling of hyperviscoelastic behavior of polymeric and biological materials. – Qualifying scientific work on the right of the manuscript. The dissertation on competition of a scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD), speciality 113 – Applied Mathematics. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – Ukraine, Kharkiv, 2026. Object of research – the processes of viscoelastic and hyperelastic deformation of arterial walls (considering

pathologies) and synthetic elastomers under complex mechanical loading. Subject of research – the stress-strain state (SSS) of vessels and TPU samples under hyperviscoelastic, cyclic, and relaxation deformation; mathematical expressions for the elastic strain energy potential and relaxation function parameters determined by the symbolic regression (SR) method considering physically-informed constraints. Methods: The theoretical provisions are based on continuum mechanics (elasticity and viscoelasticity theories). The finite element method (FEM) in a plane strain formulation was used to model the SSS of human vessel walls with atherosclerotic plaque. To solve the governing equation (convolution integral) in the time domain, a recurrence integration scheme was implemented. Machine learning methods include SR and Deep Symbolic Optimization (DSO). Mechanical testing was conducted on a ZwickRoell Z010 machine at the Department of Continuum Mechanics, RWTH Aachen University. The introduction substantiates the relevance, defines the goal, tasks, scientific novelty and practical significance of the research. The first chapter provides a critical analysis of current approaches to modeling the viscoelastic behavior of materials and the biomechanics of blood vessels. Existing machine learning tools for identifying media properties are reviewed, and the necessity of developing new computational methods is justified. The second chapter outlines the theoretical foundations, including large deformation kinematics, equilibrium equations, phenomenological viscoelastic models, nonlinear FEM variational formulation, Newton–Raphson linearization, and SR principles. The third chapter presents experimental data on the viscoelastic properties of 3D-printed thermoplastic polyurethane (TPU) samples under monotonic, relaxation, and cyclic testing, including a statistical reproducibility analysis. The fourth chapter presents ML approach based on a modified DSO algorithm. The effectiveness of using physically-informed SR for the automated synthesis of constitutive equations for nonlinear hyperelasticity and viscoelastic behavior directly from experimental data is demonstrated. The fifth chapter investigates the influence of atherosclerotic plaque morphology on the biomechanical response of the arterial wall. Using developed finite element models, changes in the SSS and hysteresis loop parameters are assessed depending on the geometric characteristics of the plaque's lipid core under pulse loading. As a result of the study, the following scientific results were obtained: 1. Advanced the application of machine learning to the viscoelastic behavior of hyperelastic materials. The developed predictive model architecture explicitly incorporates the search for the elastic deformation potential and relaxation function. Unlike traditional phenomenological and data-driven approaches, this method ensures the automatic satisfaction of the fundamental kinematic relations of non-linear continuum mechanics. 2. New regularities have been established regarding the formation of the deformed state of human blood vessel walls affected by atherosclerotic lipid plaques, depending on their size. 3. For the first time, specific features of the cyclic deformation of vessel walls affected by atherosclerotic lipid plaques have been identified as a function of pulse wave cycles, which are characteristic of various human physiological states. The practical significance of the obtained results. The algorithms, software, and macros developed in the dissertation, which allow for the formulation of scientifically grounded recommendations and conclusions for a wide range of practical problems, possess practical value. The use of physically-informed SR provides an automated description of the complex mechanical behavior of hyperviscoelastic materials, which is critical for the development of modern materials science, additive technologies, and biomechanics. The developed macros allow building patient-specific models to evaluate atherosclerotic plaque stability in clinical medicine. Keywords: mathematical modeling, finite element method (FEM), viscoelasticity, hyperelasticity, symbolic regression, numerical analysis, stress-strain state, Stress-strain curve, 3D printing, TPU polymers, additive technologies (FDM/FFF), energy dissipation, atherosclerotic plaque, biological tissues.

Державний реєстраційний номер ДіР:

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Не застосовується

Підсумки дослідження: Нове вирішення актуального наукового завдання

Публікації:

- Fomenko, N.O., Larin, O.O. Investigating the Impact of Atherosclerotic Plaque Size on Human Arterial Wall Stress-Strain Hysteresis Loop and Deformed State Pattern. Strength Mater 56, 999–1009 (2024). https://doi.org/10.1007/s11223-024-00718-5
- Larin O. O., Abdusalamov R., Itskov M., Potopalska K. E., Fomenko N. O.. Thermoplastic Polyurethane Viscoelastic Properties and Usage in Quasi-Zero Stiffness Metastructures: Experimental and Numerical Investigation. Strength Mater 57, 1197–1208 (2025). https://doi.org/10.1007/s11223-026-00848-y
- Н.О. Фоменко, О.О. Ларін. Інтеграція механічних обмежень у глибоку символьну оптимізацію для відкриття в'язко-пружних моделей. № 2 (2025): Вісник НТУ “ХПІ” Серія: “Динаміка та міцність машин”. https://doi.org/10.20998/2078-9130.2025.2.346086
- I. V. Hovorukha, O. O. Larin, I. V. Polivenok, K. Ie. Potopalska, and N. O. Fomenko, “FE simulations of the static deformed state of atherosclerotic vessels based on OCT image data,” Наукові Нотатки, no. 84, pp. 137–144, Jan. 2026, doi: 10.36910/775.24153966.2025.84.22.
- . Fomenko and O. Larin, "Computer 3D-modeling of viscoelastic deformation of the aorta," 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2021, pp. 644-649, https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570106
- N. Fomenko and O. Larin, "Computational analysis of viscoelastic deformation of human blood vessels with a plaque of statistically predicted size," 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 1-6, https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916349
- Fomenko N., Larin O. ML-Approach for Modeling Viscoelastic and Physically Nonlinear Materials Based on Symbolic Regression // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2023. ICTM 2023 / ed. by M. Nechyporuk, V. Pavlikov, D. Krytskyi. Cham : Springer, 2024. Vol. 1008. C. 165–176. (Lecture Notes in Networks and Systems). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_14.
- N. Fomenko and O. Larin, "Symbolic Regression-Based Models for Hyperelastic Material," 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878012. https://ieeexplore.ieee.org/document/10878012
- Фоменко Н. О. Комп'ютерне 3D моделювання в'язко-пружного деформування кровоносних судин людини / Н. О. Фоменко, О. О. Ларін // Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених: зб. тез доп. 14-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 1-4 грудня 2020 р. / ред. Є. І. Сокол ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Харків : НТУ "ХПІ", 2020. – С. 122-123. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/63937
- Фоменко Н. О. Чисельний аналіз в'язко-пружного деформування артерій людини з бляшкою статистично прогнозованого розміру / Н. О. Фоменко, О. О. Ларін // Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 16-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 14-16 грудня 2022 р. / ред. Є. І. Сокол ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – С. 368-369., https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/8e7e621f-9f20-49ad-876a-5cb0cd5b4cdb/content.
- Фоменко Н. О., Ларін О. О. Моделювання поведінки м’яких біологічних тканин за допомогою символьної регресії // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я (MicroCAD-2024) : тези доп. XXXII Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 22–24 трав. 2024 р.). Харків : НТУ «ХПІ», 2024. Ч. І. С. 124. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/96442.

Наукова (науково-технічна) продукція:

Соціально-економічна спрямованість:

Охоронні документи на ОПІВ:

Впровадження результатів дисертації: Впроваджено

Зв'язок з науковими темами: 0124U000450, 0121U100730

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Ларін Олексій Олександрович
2. Oleksiy O. Larin

Кваліфікація: д.т.н., професор, 05.02.09

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-5721-4400

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02071180

Місцезнаходження: вул. Кирпичова, Харків, Харківський р-н., 61002, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Мікуліч Олена Аркадіївна
2. Olena A. Mikulich

Кваліфікація: д.т.н., проф., 01.02.04

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-4522-596X

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Луцький національний технічний університет

Код за ЄДРПОУ: 05477296

Місцезнаходження: вул. Львівська, Луцьк, Луцький р-н., 43018, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR: 02vn54r74

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Деркач Олег Леонідович

2. Oleh L. Derkach

Кваліфікація: к.т.н., с.д., 05.02.09

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-6783-8516

Додаткова інформація: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57217115124; https://www.webofscience.com/wos/author/record/H-2074-2014

Повне найменування юридичної особи: Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417319

Місцезнаходження: вул. Садово-Ботанічна, Київ, 01014, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Водка Олексій Олександрович
2. Oleksii O. Vodka

Кваліфікація: к. т. н., доц., 05.02.09

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-4462-9869

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02071180

Місцезнаходження: вул. Кирпичова, Харків, Харківський р-н., 61002, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Шаповалова Марія Ігорівна
2. Mariia I. Shapovalova

Кваліфікація: д.філософ, доц., 113

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-4771-7485

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02071180

Місцезнаходження: вул. Кирпичова, Харків, Харківський р-н., 61002, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VIII. Заключні відомості

Власне Прізвище Ім'я По-батькові голови ради	Львов Геннадій Іванович
Власне Прізвище Ім'я По-батькові головуючого на засіданні	Львов Геннадій Іванович
Відповідальний за підготовку облікових документів	Фоменко Наталія Олександрівна
Реєстратор	Юрченко Тетяна Анатоліївна
Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є відповідальним за реєстрацію наукової діяльності	Юрченко Тетяна Анатоліївна